

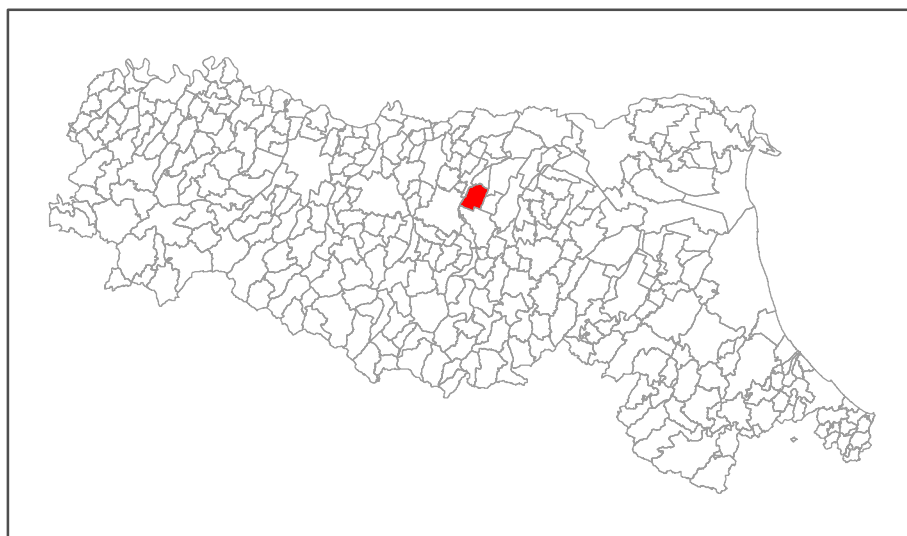
MICROZONAZIONE SISMICA

Adeguamento alle DGR 476/2021 e 564/2021

Relazione illustrativa

Regione Emilia–Romagna

Comune di Nonantola



Soggetto realizzatore:
Dott. Geol. Alessandro Ghinoi

Collaboratore:
Dott. Geol. Stefano Capocchi

Luglio 2024
(revisione: Aprile 2025)

MICROZONAZIONE SISMICA DEL COMUNE DI NONANTOLA (MO)

APPROFONDIMENTO DI III LIVELLO

RELAZIONE ILLUSTRATIVA

Responsabile

Geom. Masetti Gianluigi

Soggetto realizzatore

Dott. Geol. Alessandro Ghinoi

Collaboratori

Dott. Geol. Stefano Capocchi

Luglio 2024 (revisione: Aprile 2025)

INDICE

1	PREMESSA.....	4
2	Inquadramento territoriale e cartografico	6
3	Definizione della pericolosità sismica di base e degli eventi sismici di riferimento	8
3.1	Caratteristiche sismotettoniche	8
3.2	Classificazione sismica del territorio comunale.....	13
3.3	Pericolosità sismica del territorio comunale	13
3.4	Sismicità del territorio comunale	15
4	Aspetti geologici, geomorfologici ed idrogeologici	20
4.1	Aspetti geologici generali e stratigrafia locale	20
4.2	Aspetti geomorfologici	23
4.3	Aspetti idrogeologici.....	25
5	Dati geotecnici e geofisici	28
6	Modello del sottosuolo.....	30
7	Interpretazioni e incertezze.....	35
8	Metodologie di elaborazione e risultati	35
8.1	Analisi di risposta sismica locale	36
8.2	Analisi della suscettività alla liquefazione	43
8.2.1	Calcolo dei cedimenti post-sismici	44
9	Elaborati cartografici	47
9.1	Elaborati cartografici di I LIVELLO.....	47
9.1.1	Carta geologico-tecnica	47
9.1.2	Carta delle indagini	49
9.1.3	Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs)	50
9.1.4	Carta delle frequenze naturali dei terreni	51
9.1.5	Carta delle MOPS.....	52
9.2	Elaborati cartografici di III LIVELLO.....	54
10	Confronto con la distribuzione degli eventi passati	59
11	Bibliografia.....	61

1 PREMESSA

Il PUG di Nonantola è stato adottato con deliberazione di Consiglio Comunale n. 3 del 15/01/2024. Sebbene l'Amministrazione comunale disponga già di uno Studio di Microzonazione Sismica di III livello, datato 2014, per l'approvazione del PUG è necessario aggiornare tale Studio alle più recenti normative regionali.

Pertanto, su incarico dell'Amministrazione comunale e con il costante confronto con il Servizio Geologico sismico e dei Suoli regionale, lo scrivente ha predisposto il presente **Studio di Microzonazione Sismica di III livello del Comune di Nonantola** quale **aggiornamento** del vigente Studio di Microzonazione Sismica - redatto nel 2014 per il Quadro Conoscitivo del PSC-2013 - nel rispetto del seguente quadro normativo:

- 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) di cui alla Deliberazione della Giunta Regionale 29 Aprile 2019, N. 630", integrata con D.G.R. n. **564/2021**.

Per gli aspetti tecnici, si è fatto inoltre 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.

Come detto, il Comune di Nonantola, durante l'iter di costruzione del PSC-2013, aveva condotto uno studio di Microzonazione sismica con approfondimenti di III° Livello, affidandolo alla cura del Dott. Geol. Gianpiero Mazzetti (CENTROGEO). Lo Studio (da qui in poi citato come "**MZS-2014**") ha rappresentato uno dei primi prototipi che hanno contribuito alla definizione degli Standard Nazionali di Microzonazione Sismica ed è stato validato dalla Regione Emilia Romagna nel 2014.

La MZS-2014 era stata redatta con riferimento alle DGR 1032/2012, DAL 112/2007 e "I.C.M.S." del Dipartimento della Protezione Civile e Conferenza delle Regioni e P.A. (Gruppo di lavoro MS, 2008). La struttura del database presentava già una forma molto vicina a quella attualmente definita dagli Standard Nazionali, ma la tipologia e il numero di cartografie prodotte differisce da quanto richiesto dagli attuali Standard e dalle DGR regionali. Nel frattempo sono stati introdotti aggiornamenti (in particolare nelle delibere regionali) sia relativi a metodologie di analisi, sia a criteri di rappresentazione, con l'introduzione di nuovi indici di pericolosità sismica.

Da qui è discesa la necessità di aggiornamento della MZS-2014, che interesserà una porzione di territorio comunale definita considerando il perimetro del Territorio Urbanizzato (da qui in poi "**TU**") al 31.12.2018 (secondo quanto definito dalla L.R. 24/2017), fornito dal progettista del PUG, e le seguenti aree urbanizzate e in corso di urbanizzazione: 1) Piano Particolareggiato "Fondo Consolata", 2) Nuovo Centro Sportivo della Soc. Modena FC 2018 s.r.l., 3) Piano Particolareggiato "La Fornace", 4) Piano Particolareggiato "Comparto C.22 – Zona Sportiva".

Il perimetro complessivo è stato quindi ampliato di un offset di circa 50-100 m (con modifiche locali), in modo da ricomprendere i "territori contermini al territorio urbanizzato, che non presentano fattori preclusivi o fortemente limitanti alle trasformazioni urbane" e verrà da qui in poi denominato "**limite delle aree indagate**" (nelle cartografie prodotte: "**Limite area indagine**").

In prima istanza si è reso necessario implementare il database delle indagini inserendo quelle realizzate sul territorio comunale dopo il 2014, con particolare attenzione alle indagini penetrometriche, dato che la MZS-2014 aveva già al suo interno un numero sufficiente e ben distribuito arealmente di indagini geofisiche. In particolare, si è cercato di reperire prove penetrometriche statiche con piezocono (da qui in poi "**CPTU**"), poiché più affidabili delle statiche meccaniche (da qui in poi "**CPT**") nell'interpretazione della litostratigrafia e nelle verifiche di suscettività a liquefazione. In collaborazione con l'Ufficio tecnico comunale, è stato

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: <https://www.protezionecivile.gov.it/it/pubblicazione/indirizzi-e-criteri-la-microzonazione-sismica>

possibile esaminare tutte le relazioni geologiche a corredo di interventi diretti o Piani estraendo ubicazione e dati numerici delle indagini penetrometriche eseguite. Su un totale di 106 indagini recuperate, solo 15 sono rappresentate da CPTU. Considerata la forte prevalenza numerica di CPT rispetto alle CPTU, in accordo con il servizio Geologico sismico e dei suoli della Regione Emilia-Romagna (Resp. Dott. Luca Martelli), si è deciso di utilizzare anche le prime per la ridefinizione delle aree instabili per liquefazione della Carte delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (da qui in poi “**MOPS**”) e per le analisi di suscettività a liquefazione.

Il database delle indagini, costituito sia dalle indagini pregresse (fino al 2014), sia da quelle integrate per questo aggiornamento (post-2014), è stato realizzato utilizzando il software SoftMS (versione 4.2), messo a disposizione dal Centro per la Microzonazione Sismica e le sue applicazioni (CentroMS), così come la Struttura di archiviazione MS e CLE versione 4.2.

Nella seconda fase sono state eseguite nr. 13 analisi di risposta sismica locale (da qui in poi “**RSL**”) utilizzando il set di accelerogrammi predisposto da EUCENTRE per Nonantola (così come per l’intera Regione Emilia-Romagna) con tempo di ritorno di 475 anni, ancorandoli alla profondità del bedrock sismico già individuata dalla MZS-2014. Le ubicazioni delle RSL sono state scelte con l’obiettivo di indagare ogni singola area definita dal **limite delle aree indagate**. Il risultato di questa fase di analisi ha permesso di ricavare gli spettri in accelerazione alla superficie, i fattori di amplificazione per i vari intervalli di periodi, nonché i profili di CSR e di deformazione co-sismica da utilizzare per le verifiche a liquefazione e per i calcoli dei cedimenti post-sismici nei terreni granulari insaturi, saturi e coesivi. Il calcolo dell’Indice di Potenziale Liquefazione (da qui in poi “**IPL**”) è stato eseguito su 222 CPT/CPTU a disposizione utilizzando la procedura di calcolo sviluppata da Boulanger & Idriss (2014). Nella terza fase sono state prodotte tutte le cartografie di MZS 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. Nella fattispecie, le cartografie prodotte sono:

- **Carta delle indagini**
- **Carta geologico-tecnica**
- **Carta delle sezioni geologiche**
- **Carta delle frequenze naturali dei terreni**
- **Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS)**
- **Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs)**
- **Carta di microzonazione sismica Livello 3 - FPGA**
- **Carta di microzonazione sismica Livello 3 – FA0105 ($0,1s \leq T \leq 0,5s$)**
- **Carta di microzonazione sismica Livello 3 – FA0408 ($0,4s \leq T \leq 0,8s$)**
- **Carta di microzonazione sismica Livello 3 – FA0711 ($0,7s \leq T \leq 1,1s$)**
- **Carta di microzonazione sismica Livello 3 – FA0515 ($0,5s \leq T \leq 1,5s$)**
- **Carta di microzonazione sismica Livello 3 – FH0105 ($0,1s \leq T \leq 0,5s$)**
- **Carta di microzonazione sismica Livello 3 – FH0510 ($0,5s \leq T \leq 1,0s$)**
- **Carta di microzonazione sismica Livello 3 – FH0515 ($0,5s \leq T \leq 1,5s$)**
- **Carta di microzonazione sismica Livello 3 - HSM**
- **Carta-di-microzonazione-sismica-Livello-3 - H0408**
- **Carta-di-microzonazione-sismica-Livello-3 - H0711**
- **Carta-di-microzonazione-sismica-Livello-3 - H0515**
- **Carta dei cedimenti post-sismici**

Nell’ultima fase è stata redatta la presente relazione e sono state prodotte indicazioni normative per la riduzione del rischio sismico, alla luce dei nuovi risultati ottenuti da questo studio in termini di amplificazioni e indici di potenziale liquefazione, parte integrante delle norme di Piano del PUG.

2 INQUADRAMENTO TERRITORIALE E CARTOGRAFICO

Il territorio comunale di Nonantola si sviluppa nella media pianura modenese, in un settore influenzato, dal punto di vista deposizionale, dalle alluvioni del fiume Panaro; si estende su una superficie di circa 55 Km² con geometria sub rettangolare allungata in direzione SO-NE, delimitato a ovest dal tracciato del fiume Panaro (Figura 1).

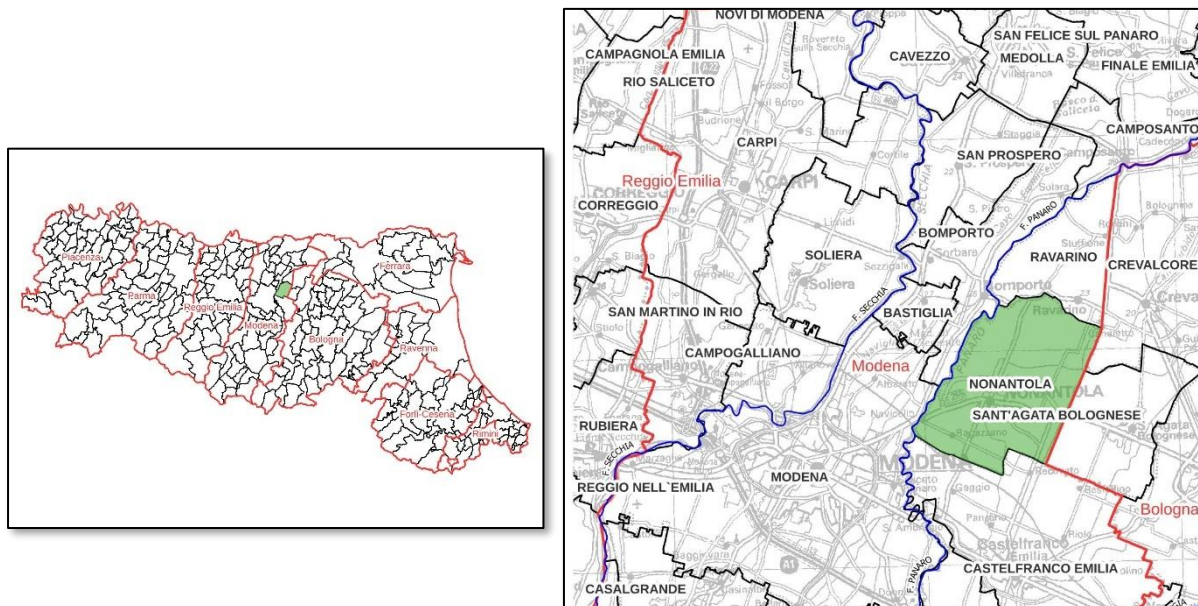


Figura 1 - Inquadramento amministrativo regionale del territorio comunale di Nonantola.

La paleo-dinamica fluviale ha definito un assetto paesaggistico relativamente omogeneo, contraddistinto da superfici sub-pianeggianti, debolmente degradanti da SSO verso NNE, con le zone relativamente più elevate lungo la sponda destra del Fiume Panaro e lungo il dosso a direzione O-E di Ravarino, che segna il confine settentrionale di Nonantola; le zone relativamente più basse si trovano nell'area delle valli della "Partecipanza", dove si creano condizioni morfologiche favorevoli a ristagni d'acqua (Figura 2).

Le quote sono comprese tra 26 e 30 m s.l.m. in prossimità del Fiume Panaro, tra 23 e 26 m s.l.m. nella fascia settentrionale, tra 20 e 23 m s.l.m. lungo il confine orientale – nord orientale e tra 27 e 30 m s.l.m. nel settore meridionale. Sono quote che nel complesso inseriscono il territorio comunale all'interno della fascia orografica di media pianura.

Nella cartografia regionale, il territorio comunale di Nonantola è compreso nelle Tavole alla scala 1:25.000:

- 202NO denominata "Crevalcore"
- 202SO denominata "Nonantola"
- 201SE denominata "Modena"

nelle Sezioni alla scala 1:10.000:

- 202050 denominata "Bomporto"
- 202060 denominata "Crevalcore"
- 202090 denominata "Nonantola"
- 202100 denominata "S. Agata Bolognese"
- 201120 denominata "Modena Nord Est"
- 202130 denominata "Gaggio"

negli Elementi alla scala 1:5.000:

- 202053 denominato “La Selvatica”
- 202052 denominato “La Grande”
- 202063 denominato “Ravarino Sud”
- 202094 denominato “Nonantola Ovest”
- 202091 denominato “Nonantola Est”
- 202104 denominato “Il Torrazzuolo”
- 201122 denominato “Il Torrazzo”
- 202093 denominato “Rubbiara”
- 202092 denominato “Redù”
- 202103 denominato “Maggi”
- 202134 denominato “Gaggio”
- 202131 denominato “Recovato”

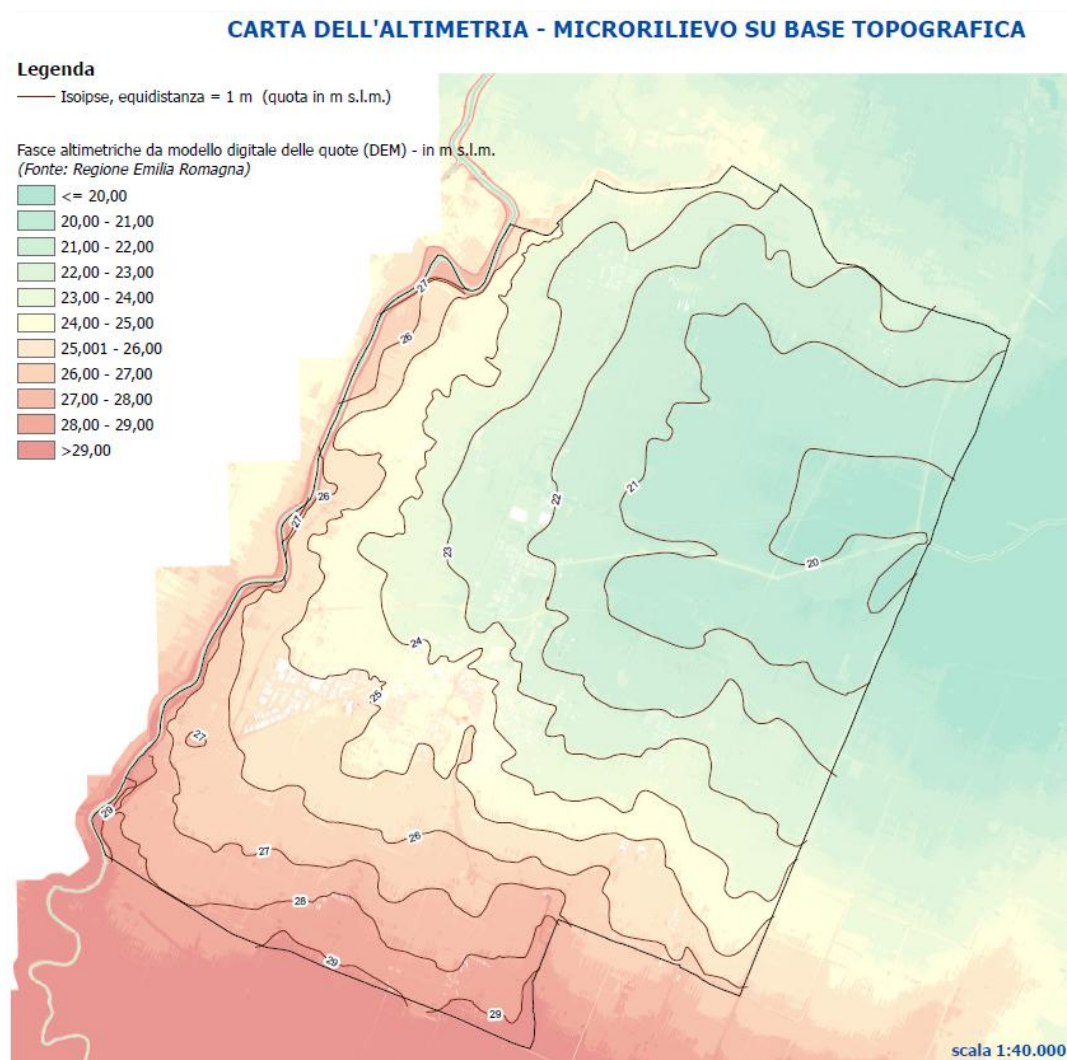


Figura 2 - Inquadramento altimetrico del territorio comunale di Nonantola (altimetria da rilievo Lidar).

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

3.1 Caratteristiche sismotettoniche

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 Nonantola, 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).

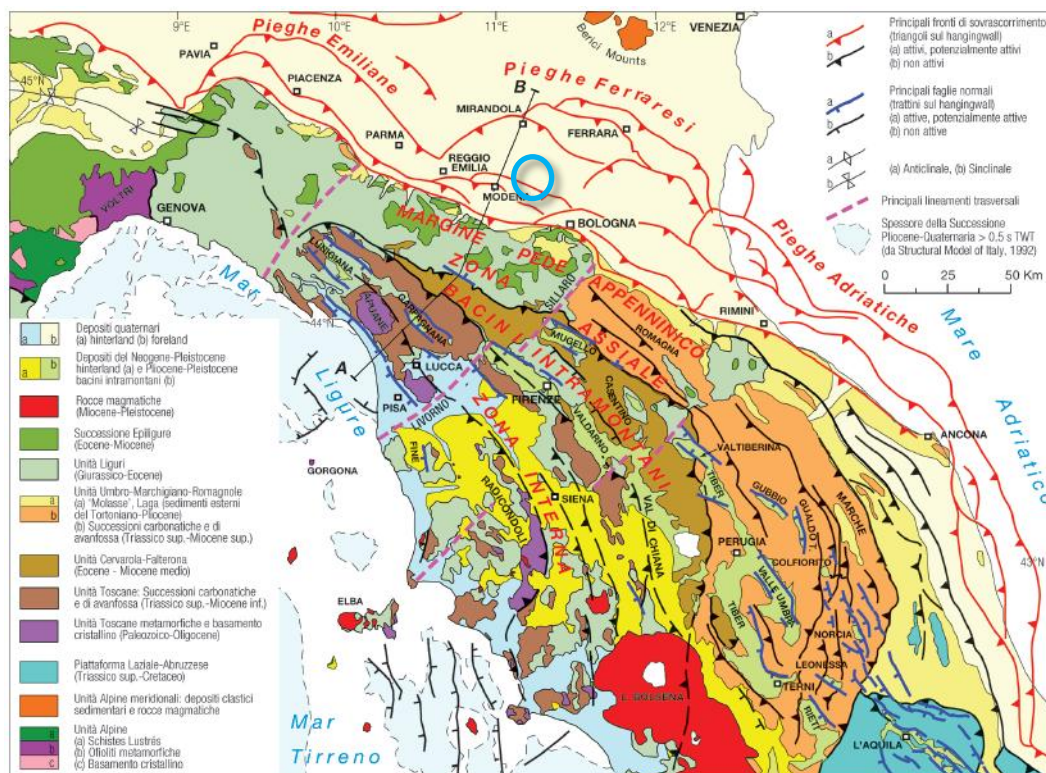


Figura 3 - Schema tettonico dell'Appennino settentrionale e della Pianura Padana (fonte: Note illustrative della Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna ed aree limitrofe, a cura di Martelli et al., 2017). Il cerchio azzurro identifica il territorio comunale di Nonantola.

In modo più specifico, il territorio comunale di Nonantola si colloca nella fascia dei fronti sepolti padani (Figura 4), in un bacino di *piggyback* formatosi tra le “Pieghe Ferraresi” a nord e il Fronte di Thrust pedeappenninico a sud.

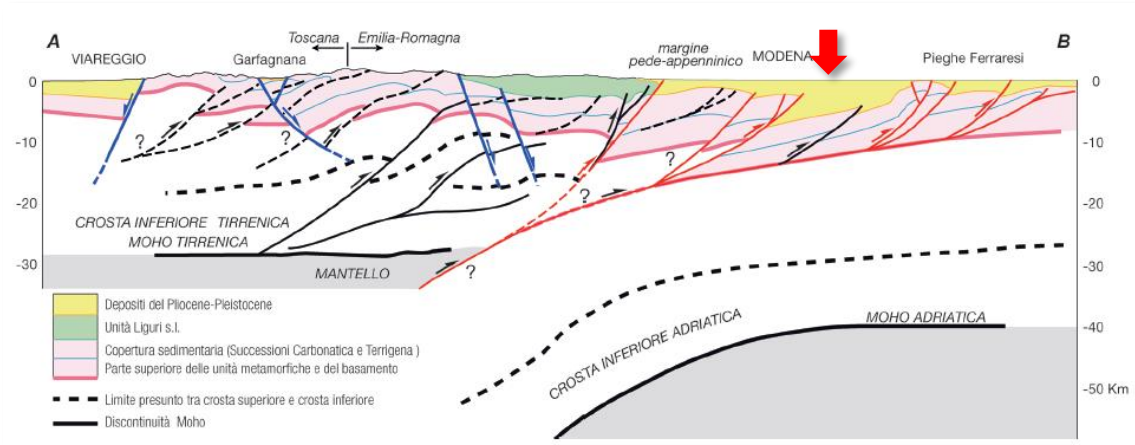


Figura 4 - Sezione geologica dal Mar Ligure al Po, la cui traccia è riportata in Figura 3 (fonte: Note illustrative della Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna ed aree limitrofe, a cura di Martelli et al., 2017). La freccia rossa identifica il territorio comunale di Nonantola.

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. Queste dorsali sepolte (Pieghe Emiliane e Pieghe Ferraresi di Pieri e Groppi, 1981) sono i veri fronti della catena appenninica.

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 specifici settori, soprattutto lungo le Pieghe Ferraresi, che anche recentemente sono state 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., 2017a).

Le ricerche in campo sismotettonico svolte dal Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna, hanno messo in evidenza gli elementi strutturali attivi del territorio, riconosciuti sulla base di dati morfologici e geologici. In particolare, a seguito degli eventi sismici avvenuti dopo il 2004, la Regione Emilia Romagna ha provveduto all'aggiornamento della precedente Carta sismotettonica pubblicata, predisponendo per altro un'implementazione delle reti sismiche e la realizzazione di nuovi studi, estesi ad un'area più ampia del territorio regionale, che hanno permesso di acquisire una considerevole quantità di nuovi dati e caratterizzare meglio le strutture tettoniche.

Nelle figure seguenti sono riportate la mappa delle principali strutture attive e potenzialmente attive riconosciute (Figura 5), uno stralcio della Carta Sismotettonica (2016) della Regione Emilia-Romagna comprendente il Comune di Nonantola (Figura 6) e la sezione C-C' (Figura 7), da cui si può osservare come il territorio comunale di Nonantola non sia interessato da strutture tettoniche che hanno interessato la copertura pleistocenica e coincida con uno dei settori della pianura in cui più profonda è la base del SERS, ovvero dove maggiore è stato l'accumulo sedimentario continentale, e dove maggiori risultano anche i tassi di subsidenza.

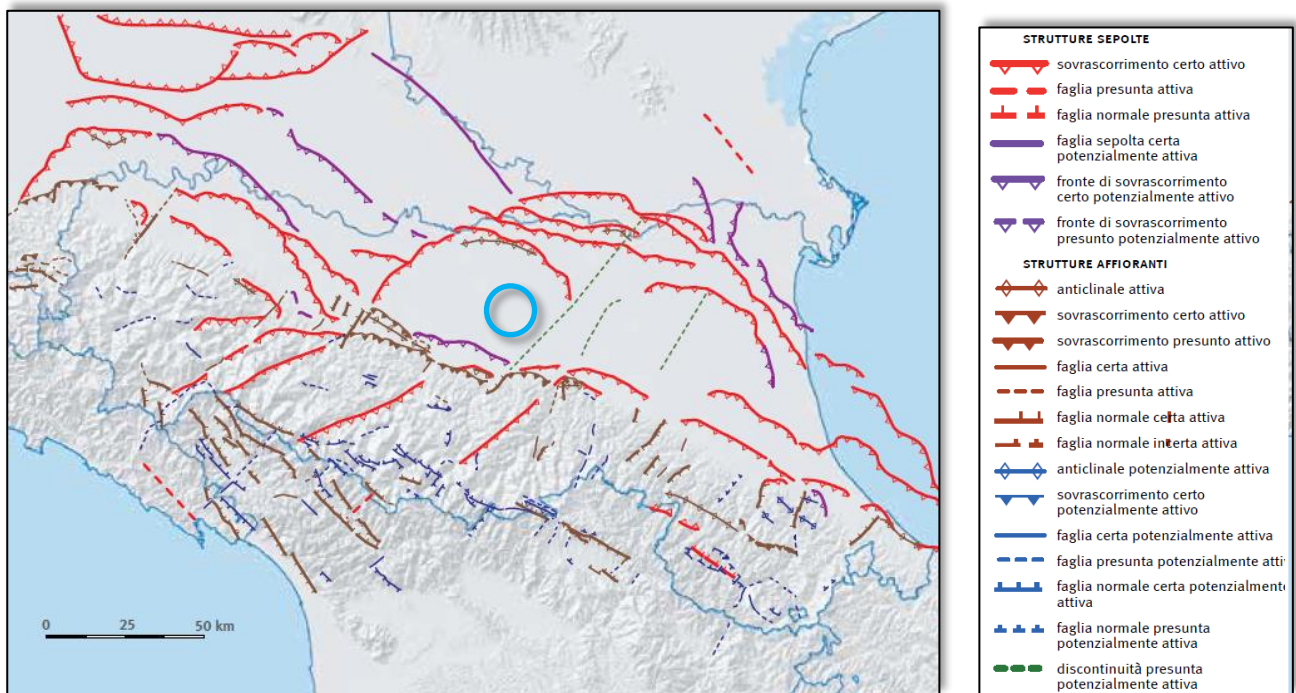


Figura 5 - Mappa di sintesi delle strutture tettoniche attive e potenzialmente attive riconosciute nell'Appennino toscano-emiliano-romagnolo e nella Pianura Padana centrale e orientale (da Martelli et al., 2017b). Il cerchio azzurro indica il territorio comunale di Nonantola.

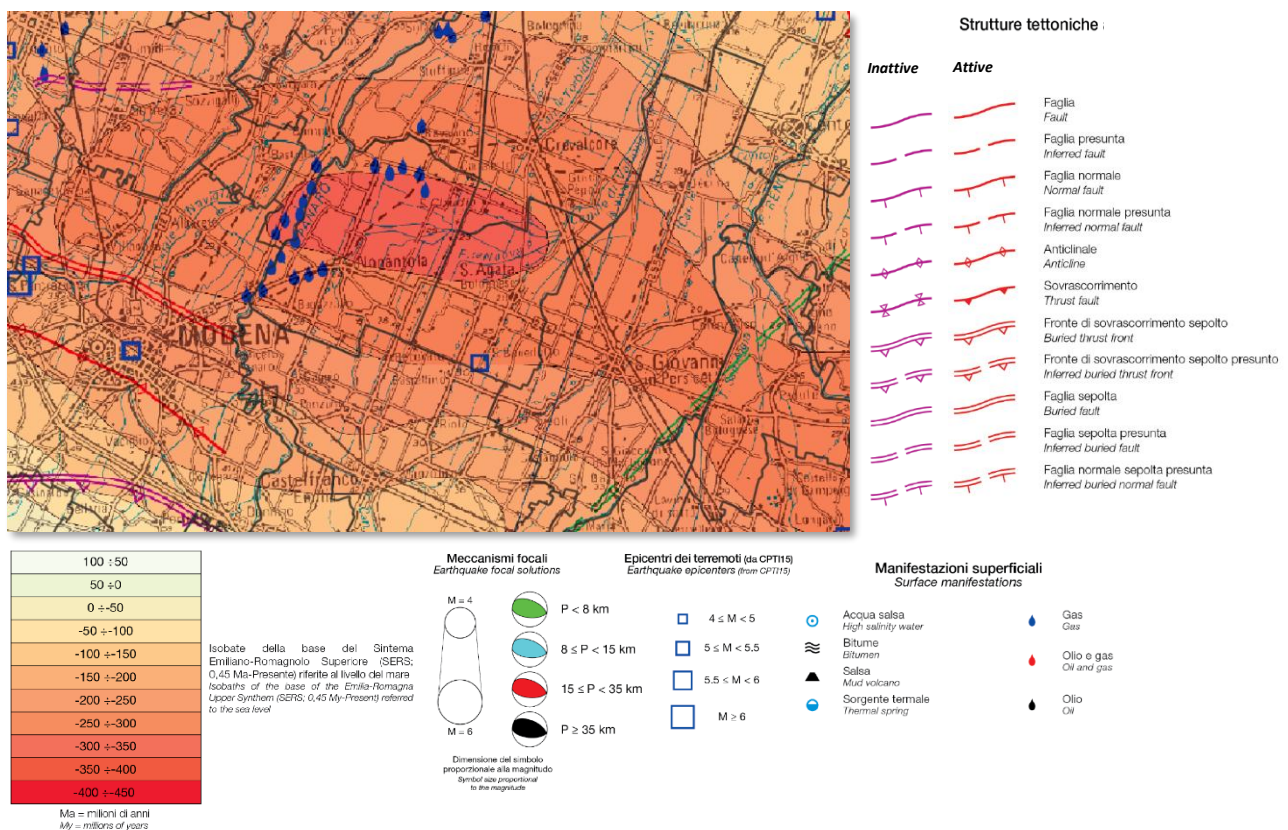


Figura 6 - Estratto della Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe (scala originale 1:250.000)

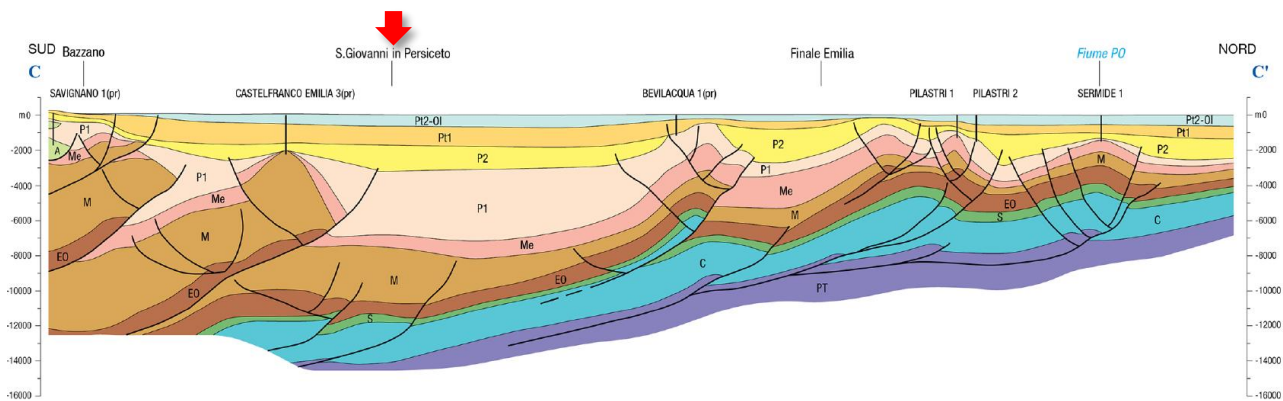


Figura 7 - Estratto della Carta delle Sezioni Profonde – sez. CCI (Regione Emilia-Romagna). La freccia rossa indica la posizione del Comune di Nonantola rispetto alla linea di sezione.

I dati sismologici strumentali indicano per il territorio di Nonantola uno scarso numero di eventi con ipocentri nei primi 8÷15 km e magnitudo comprese tra 2 e 4 (Figura 8).

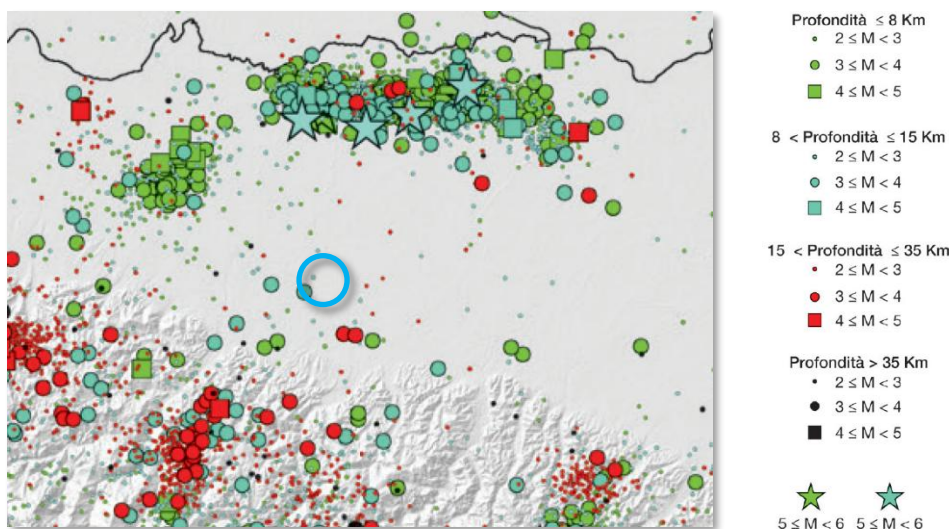


Figura 8 - Mappa dei terremoti strumentali $M_w \geq 2$; la dimensione del simbolo è proporzionale alla magnitudo, il colore indica la profondità ipocentrale. Fonte: Note Illustrative della Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe (2017). Il cerchio azzurro indica il territorio comunale di Nonantola.

In Figura 9 si riporta il confronto tra le strutture attive e potenzialmente attive riconosciute nella “Carta Sismotettonica della Regione Emilia Romagna ed aree limitrofe” e le zone del catalogo DISS 3.2, il database delle sorgenti sismogenetiche italiane potenzialmente in grado di generare sismi con magnitudo superiore a $M 5.5$; si evidenzia come il Comune di Nonantola non ricada all’interno di alcuna sorgente sismogenetica.

Sulla base delle strutture attive e potenzialmente attive riconosciute e della distribuzione della sismicità storica e strumentale è stata proposta, da parte di Martelli et al. (2017), anche una nuova zonazione sismogenetica dell’Appennino emiliano-romagnolo e aree limitrofe, al fine di fornire un contributo per l’aggiornamento della mappa di pericolosità sismica nazionale; secondo la nuova proposta, il Comune di Nonantola ricade nella zona sismogenetica “Nonantola – Budrio (5)” (Figura 10): è una zona compresa tra le Pieghe Ferraresi e il margine appenninico (Pieghe Romagnole - thrust pedeappenninico), caratterizzata da bassa sismicità e rare evidenze di attività tettonica recente. Corrisponde alla parte meridionale della zona

912 della ZS9 (v. zona Pieghe Ferraresi); i terremoti attesi sono compressivi e profondi (>10 km), con direzione di compressione (assi P) circa N-S, lungo piani a basso angolo (di fatto corrisponde alla zona di flat delle Pieghe Ferraresi) immergenti verso sud. La magnitudo storica massima è $M \approx 5,5$, mentre quella calcolata è pari a $6,0 \pm 0,53$ (Martelli et al., 2017b).

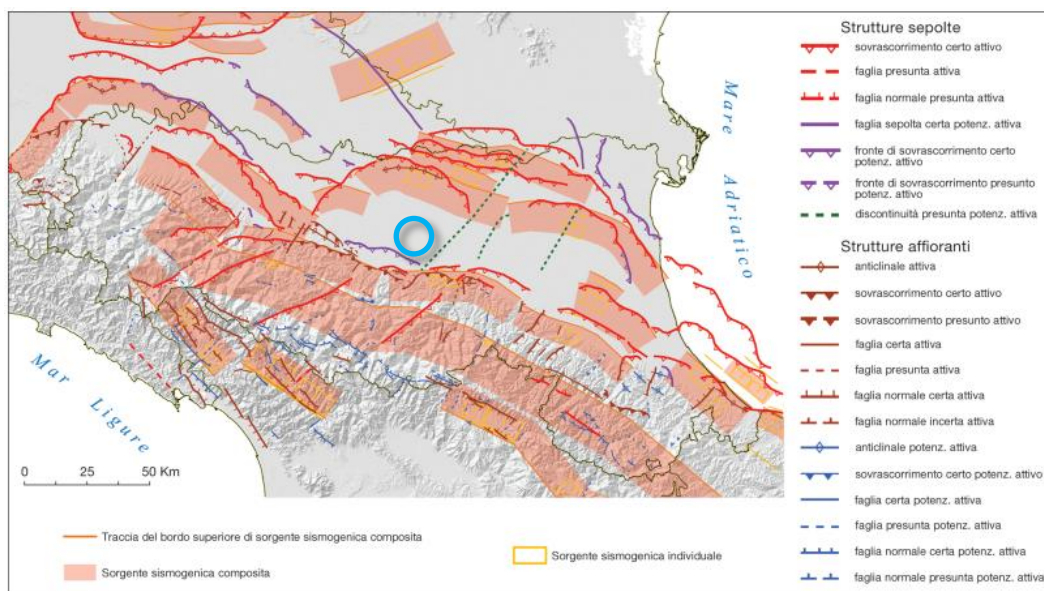


Figura 9 - Mappa di confronto tra le strutture tettoniche attive e potenzialmente attive riportate nella “Carta Sismotettonica della Regione Emilia Romagna ed aree limitrofe” e le zone sismogenetiche del DISS 3.2 (DISS Working Group, 2015).

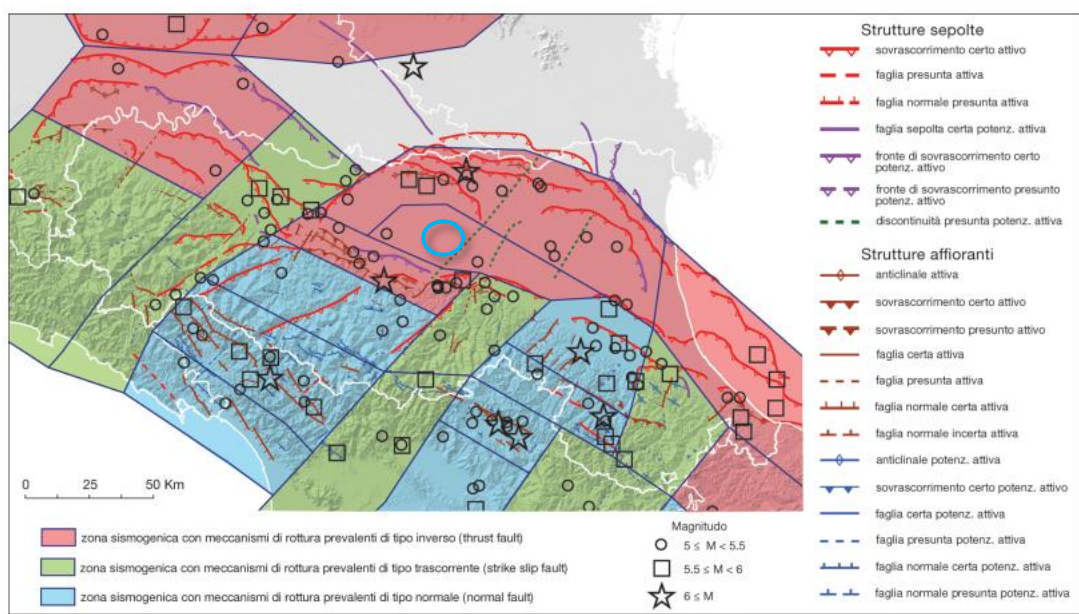


Figura 10 - Mappa di confronto tra le strutture attive e potenzialmente attive riconosciute e la zonazione sismogenetica proposta da Martelli et al. (2017a). Il cerchio azzurro identifica il territorio comunale di Nonantola.

3.2 Classificazione sismica del territorio comunale

La classificazione sismica dei comuni su tutto il territorio nazionale è stata definita dall'Allegato 1, punto 3 dell'Ordinanza n. 3274 del 20 marzo 2003, utilizzando e aggiornando la precedente proposta nel 1998.

La suddivisione è articolata in 4 zone, ciascuna delle quali è contraddistinta da un diverso valore dell'accelerazione di picco orizzontale del suolo (a_g) con probabilità di superamento del 10% in 50 anni: le prime 3 corrispondono alle zone di sismicità alta ($S=12$), media ($S=9$) e bassa ($S=6$), contemplati nella Legge 64/74, mentre la zona 4 è di nuova introduzione.

Il Comune di Nonantola è classificato in **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.

Si specifica che 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. L'azione sismica è definita, per ogni sito, dai parametri di pericolosità sismica previsti dalle norme tecniche per le costruzioni NTC 2018, superando, quindi, la differenza tra valori di accelerazione previsti dagli studi di pericolosità sismica a scala nazionale e valori previsti dalla normativa antisismica per un suolo di riferimento.

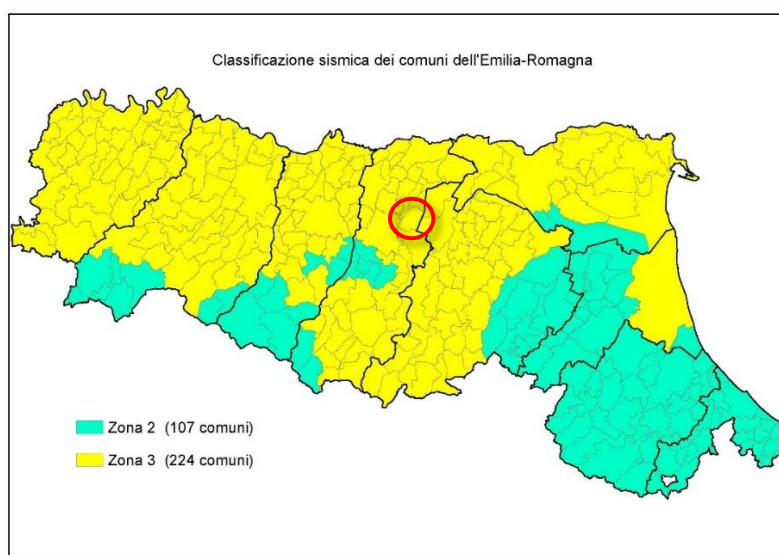


Figura 11 - Classificazione sismica dei comuni dell'Emilia-Romagna aggiornata al luglio 2018. (Nel cerchio rosso il Comune di Nonantola)

3.3 Pericolosità sismica del territorio comunale

Secondo la mappa di pericolosità sismica nazionale MPS04² (Figura 12), attuale riferimento ufficiale per il calcolo dell'azione sismica ai fini della progettazione, la pericolosità sismica del versante padano dell'Appennino settentrionale e della Pianura Padana decresce gradualmente dal crinale appenninico alla pianura lombardo-veneta.

Di seguito si riporta il dettaglio intorno a Nonantola della mappa di pericolosità sismica nazionale (Figura 13) con i valori di PGA con una probabilità di superamento del 10% in un periodo di 50 anni (con un periodo di ritorno di 475 anni) e la loro frequenza di occorrenza annua. Questi parametri evidenziano le aree ove si possono verificare sismi di elevata intensità e dunque quelle in cui si rileva una maggiore pericolosità. Considerando un tempo di ritorno di 475 anni, il Comune di Nonantola presenta un'accelerazione attesa al suolo (PGA) compresa tra 0.150g e 0.175g.

² (<http://zonesismiche.mi.ingv.it/>; Gruppo di lavoro MPS, 2004; Stucchi et al., 2011)

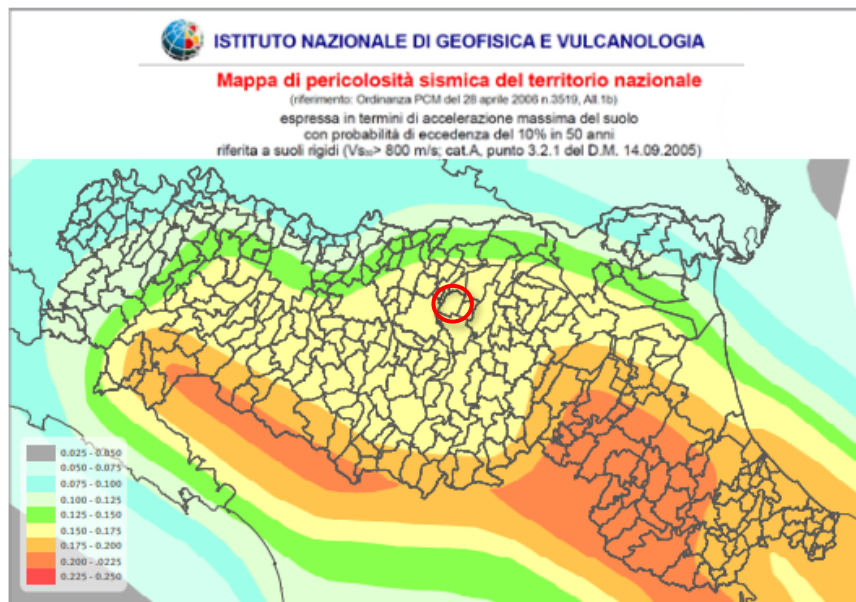


Figura 12 - Mappa di pericolosità sismica nazionale MPS04. Il cerchio rosso identifica il Comune di Nonantola.

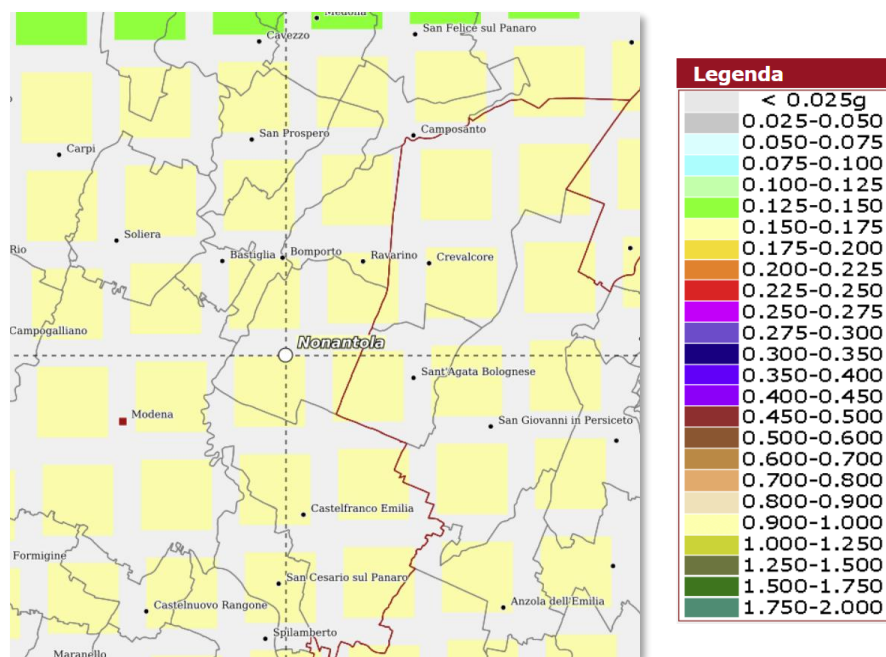


Figura 13 - Valori di PGA attesi per il territorio comunale di Nonantola con il 10% di probabilità di superamento in 50 anni, calcolato dallo studio di pericolosità sismica dell'INGV.

La disaggregazione del valore di a_g con la medesima probabilità di eccedenza (Figura 14) mostra come il contributo percentualmente maggiore (20-25%) alla pericolosità sismica di base del territorio comunale sia determinato da sismi di magnitudo compresa tra 4.5 e 5.0, con epicentro tra 0 -10 km di distanza dal territorio comunale; con percentuale minore, tra 15 e 20%, vi sono sismi di magnitudo compresa tra 4.0 e 4.5, con epicentro tra 0-10 Km; con percentuale, tra 11 e 15%, vi sono sismi di magnitudo compresa tra 5.0 e 5.5, con epicentro tra 0-10 Km; con percentuale, tra 9 e 11%, vi sono sismi di magnitudo compresa tra 4.5 e 5.0, con

epicentro tra 10-20 Km; con percentuale, tra 7 e 9%, vi sono sismi di magnitudo compresa tra 5.0 e 5.5, con epicentro tra 10-20 Km; infine, con percentuale, tra 5 e 7%, vi sono sismi di magnitudo compresa tra 5.5 e 6.0, con epicentro tra 0-20 Km.

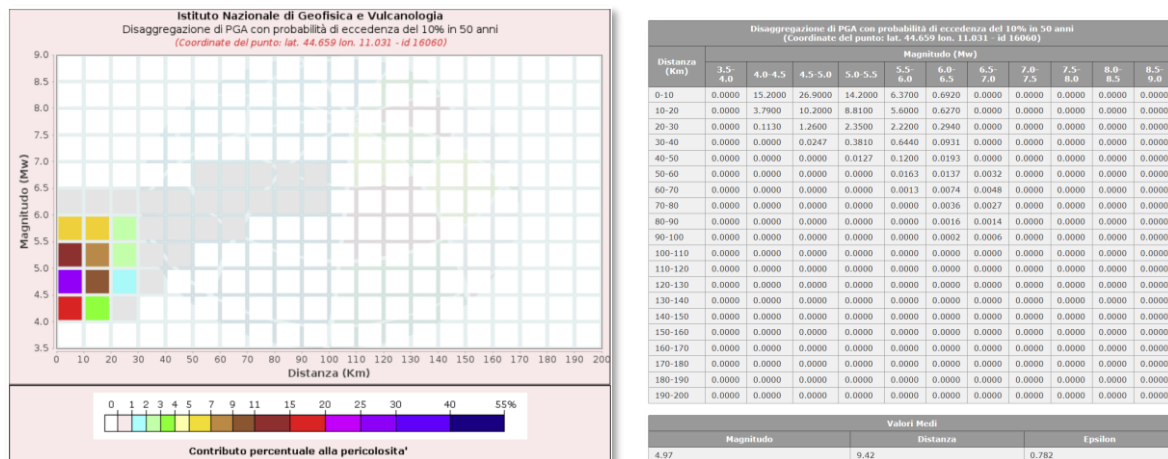


Figura 14 - Disaggregazione del valore di a_g con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni per il territorio comunale di Nonantola.

3.4 Sismicità del territorio comunale

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 (Figura 15).

Nella tabella di Figura 15 sono riassunti gli eventi di maggior intensità al sito in cui viene indicato, per ciascun evento, oltre all'intensità al sito stessa (Int.), l'anno, il mese (Me), il giorno (Gi), l'ora (Ho), il minuto (Mi) ed, eventualmente, il secondo (Se), in cui si è verificato, la denominazione dell'area epicentrale, il relativo numero di dati di intensità macrosismica (NMDP), l'intensità massima epicentrale in scala MCS (Io) e la magnitudo momento (Mw).

Dall'analisi della tabella in Figura 15 e dalle carte di Figura 16 emerge come i massimi eventi sismici avvertiti a Nonantola, compresi tra i gradi 5 e 6 della scala MCS, si siano verificati nel territorio di pianura ad ovest di Nonantola, tra le province di Parma e Reggio Emilia fino al confine occidentale con quella di Modena. Altri eventi cadono tra le province di Bologna e Ferrara, nella Lucchesia e nella bassa modenese (l'evento con epicentro Medolla del 29 maggio 2012).

COMUNE DI NONANTOLA - PROVINCIA DI MODENA
Microzonazione Sismica - APPROFONDIMENTO DI III LIVELLO
RELAZIONE ILLUSTRATIVA

Effetti	In occasione del terremoto del									
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP	Io	Mw
HD	1117	01	03	15	15		Veronese	55	9	6.52
6	1671	06	20	10			Modenese-Reggiano	8	7	5.27
5-6	1983	11	09	16	29	5	Parmense	850	6-7	5.04
5	1832	03	13	03	30		Reggiano	97	7-8	5.51
5	1873	05	16	19	35		Reggiano	15	6-7	5.01
5	1909	01	13	00	45		Emilia Romagna orientale	867	6-7	5.36
5	1914	10	27	09	22		Lucchesia	660	7	5.63
5	1996	10	15	09	55	5	Pianura emiliana	135	7	5.38
5	2012	05	29	07	00	0	Pianura emiliana	87	7-8	5.90
4-5	1873	06	29	03	58		Alpago Cansiglio	197	9-10	6.29
4-5	2000	06	18	07	42	0	Pianura emiliana	304	5-6	4.40
4	1901	10	30	14	49	5	Garda occidentale	289	7-8	5.44
4	1904	02	25	18	47	5	Reggiano	62	6	4.81
4	1916	05	17	12	50		Riminese	132	8	5.82
4	1916	08	16	07	06	1	Riminese	257	8	5.82
4	1923	06	28	15	12		Modenese	22	6	5.04
4	1937	12	10	18	04		Frignano	28	6	5.30
4	1987	05	08	11	10	2	Bassa modenese	24	6	4.44
F	1875	03	17	23	51		Costa romagnola	144	8	5.74
F	1957	08	27	11	54		Appennino modenese	58	5	4.73
3-4	1997	05	12	22	13	5	Pianura emiliana	56	4-5	3.68
3	1915	01	13	06	52	4	Marsica	1041	11	7.08
3	1996	12	16	09	09	5	Pianura emiliana	115	5-6	4.06
3	1998	03	26	16	26	1	Appennino umbro-marchigiano	409		5.26
2-3	1886	12	06	17	07	1	Ferrarese	604	6	4.43
2	1931	06	10	17	02		Modenese	14	4	4.59
2	1996	10	26	04	56	5	Pianura emiliana	63	5-6	3.94
NF	1898	01	16	13	10		Romagna settentrionale	110	6	4.59
NF	1904	11	17	05	02		Pistoiese	204	7	5.10
NF	1909	08	25	00	22		Crete Senesi	259	7-8	5.34
NF	1965	11	09	15	35		Appennino reggiano	32	5	4.17
NF	1967	04	03	16	36	1	Reggiano	45	5	4.44
NF	1988	03	15	12	03	1	Reggiano	160	6	4.57
NF	2002	06	08	20	13	0	Frignano	115	4	4.23
NF	2002	06	18	22	23	3	Frignano	186	4	4.30

PlaceID IT_38756
Coordinate (lat, lon) 44.678, 11.041
Comune (ISTAT 2015) Nonantola
Provincia Modena
Regione Emilia-Romagna
Numero di eventi riportati 35

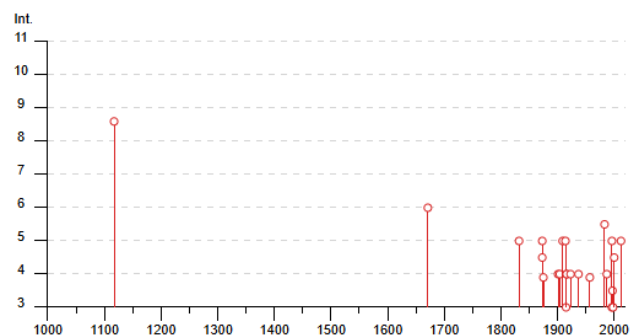
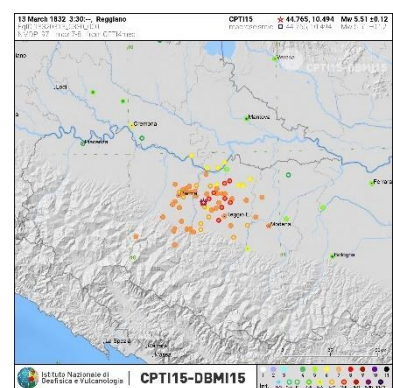
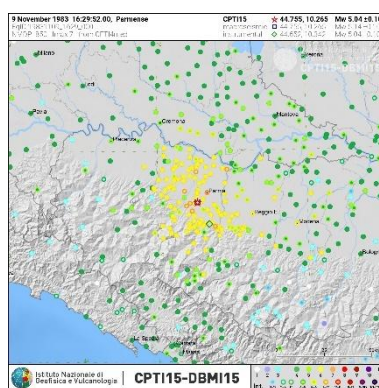
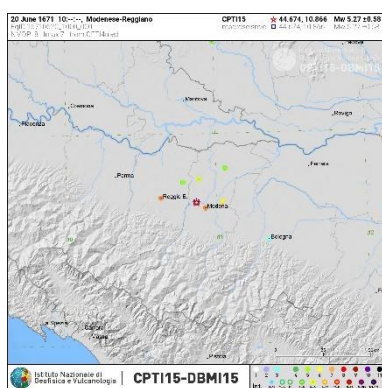


Figura 15 - Storia delle intensità macrosismiche al sito di Nonantola (fonte: DBMI15, Locati et al. 2022). Legenda: **Int.** - Intensità al sito (MCS); **Io** - Intensità epicentrale (MCS); **Mw** - Magnitudo momento (epicentrale); **NMDP** - Numero di punti, numero di osservazioni macrosismiche disponibili per il terremoto.



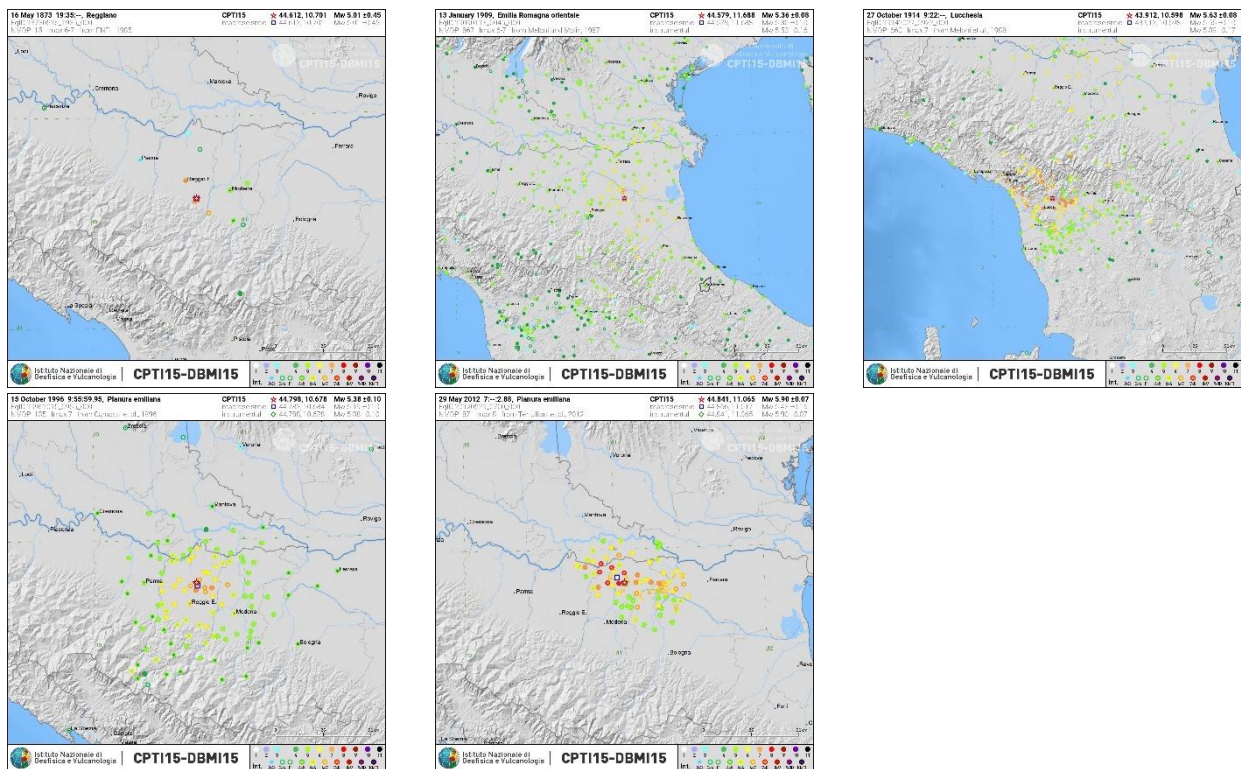


Figura 16 – Ubicazioni degli 8 eventi sismici con più alta intensità al sito per Nonantola (Int. >= 5 MCS) (fonte: DBMI15).

Sovrapponendo alle sorgenti sismogenetiche dell'INGV gli epicentri dei sismi che hanno dato storicamente effetti macrosismici maggiori (MCS ≥ 5) all'interno del territorio comunale di Nonantola (Figura 17), è possibile constatare come le maggiori intensità al sito siano state determinate da sismi avvenuti all'interno delle sorgenti sismogenetiche collocate nei settori delle Pieghe Emiliane, a ovest, e delle Pieghe Ferraresi, a nord; solo tre sorgenti ricadono al di fuori delle sorgenti sismogenetiche, nella fascia subsidente della pianura compresa tra il fronte di trust pedeappenninico e le Pieghe Ferraresi, ed oltre il crinale appenninico, nella Lucchesia.

Le sorgenti sismogenetiche interessate sono:

- **ITCS009** – Busseto-Cavriago,
- **ITCS049** – Campegine-Correggio,
- **ITCS051** - Carpi-Poggio Renatico.

La sorgente sismogenetica composta **ITCS009** “Busseto-Cavriago” è ritenuta capace di produrre sismi con Mw massima pari a 6.8. La geometria è determinata principalmente sulla base di osservazioni geologiche: lo strike varia da 120° a 140°; il dip varia da 20° a 40°; il rake è assunto corrispondente ad un sovrascorrimento puro (90°-120°); la slip rate varia da 0,16 a 0,53 mm/anno; le profondità minima e massima sono state individuate, rispettivamente, a -2.0 e -8.0 km.

La sorgente sismogenetica composta **ITCS049** “Campegine-Correggio” è ritenuta capace di produrre sismi con Mw massima pari a 6.6. 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.

La sorgente sismogenetica composta **ITCS051 “Carpi-Poggio Renatico”** è ritenuta capace di produrre sismi con Mw massima pari a 6.9. 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.

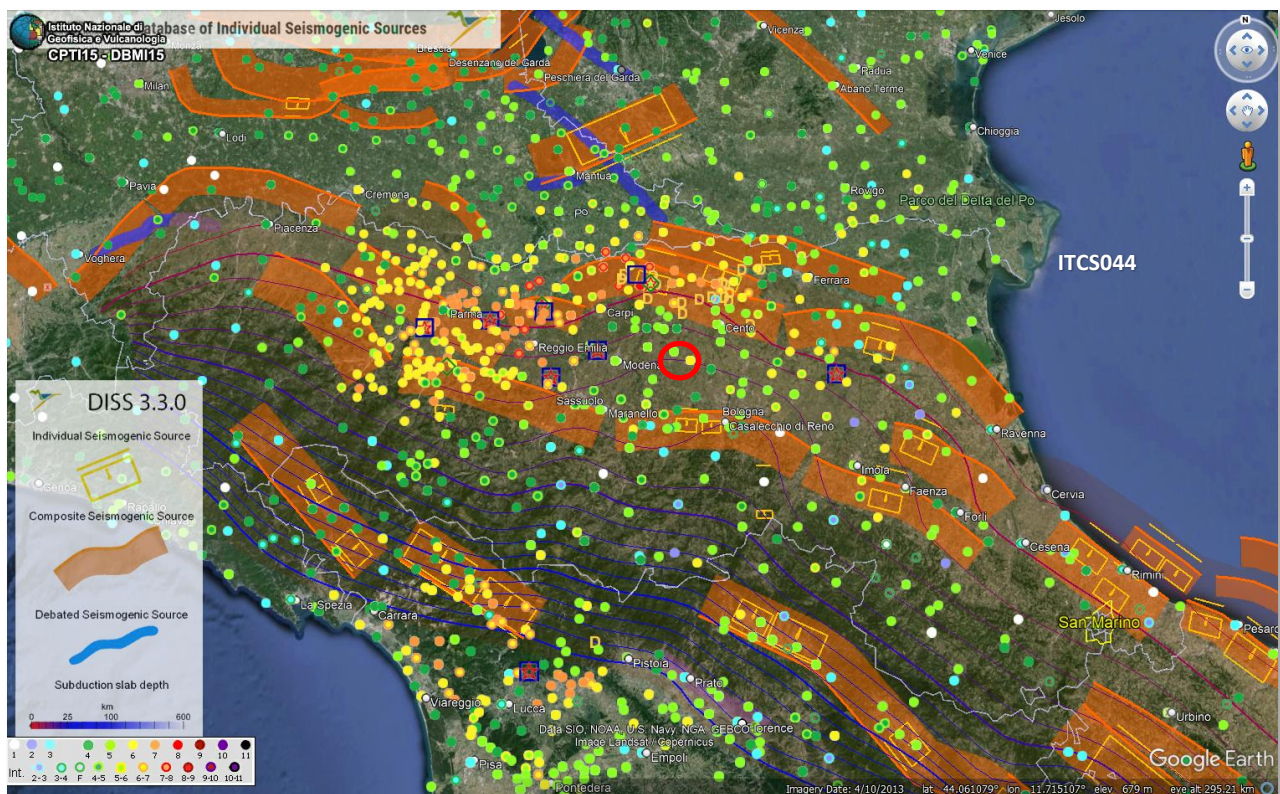


Figura 17 – Sovrapposizione degli eventi sismici che hanno determinato intensità macrosismiche ≥ 5 gradi MCS nel territorio di Nonantola e sorgenti sismogenetiche censite dal database DISS 3.3 dell'INGV. Il cerchio rosso identifica il territorio comunale di Nonantola.

Per quanto riguarda la presenza di faglie capaci³, il database ITHACA (Figura 18) individua 2 sovrascorrimenti che intersecano il territorio comunale con direzione ONO-ESE a nord del Capoluogo. Sono le faglie 93763: “S Giovanni in Persiceto – Modena” e 93764: “S. Pancrazio – Modena”. La prima ha una lunghezza di 17,7 km, cinematica inversa, ultimo periodo d’attività nel Pleistocene Inferiore, coinvolge le unità carbonatiche ed ha una magnitudo massima di 6.5.

La seconda ha una lunghezza di 25 km, cinematica inversa, ultimo periodo d’attività nel Pleistocene Inferiore, coinvolge le unità carbonatiche ed ha una magnitudo massima di 6.7.

³ ITHACA adotta la seguente definizione di faglia capace:

- Una faglia è definita capace quando ritenuta in grado di produrre, entro un intervallo di tempo di interesse per la società, una deformazione/dislocazione della superficie del terreno, e/o in prossimità di essa.
- La deformazione attesa può essere sia una dislocazione ben definita lungo un piano di rottura (fault displacement/offset) che una deformazione distribuita (warping).
- La riattivazione attesa viene definita in funzione del regime tettonico in atto, rispetto al quale deve essere compatibile. Elementi secondari possono però mostrare rotture “anomale”, ad esempio movimenti compressivi in un ambiente distensivo, a causa di geometrie locali delle strutture riattivate.

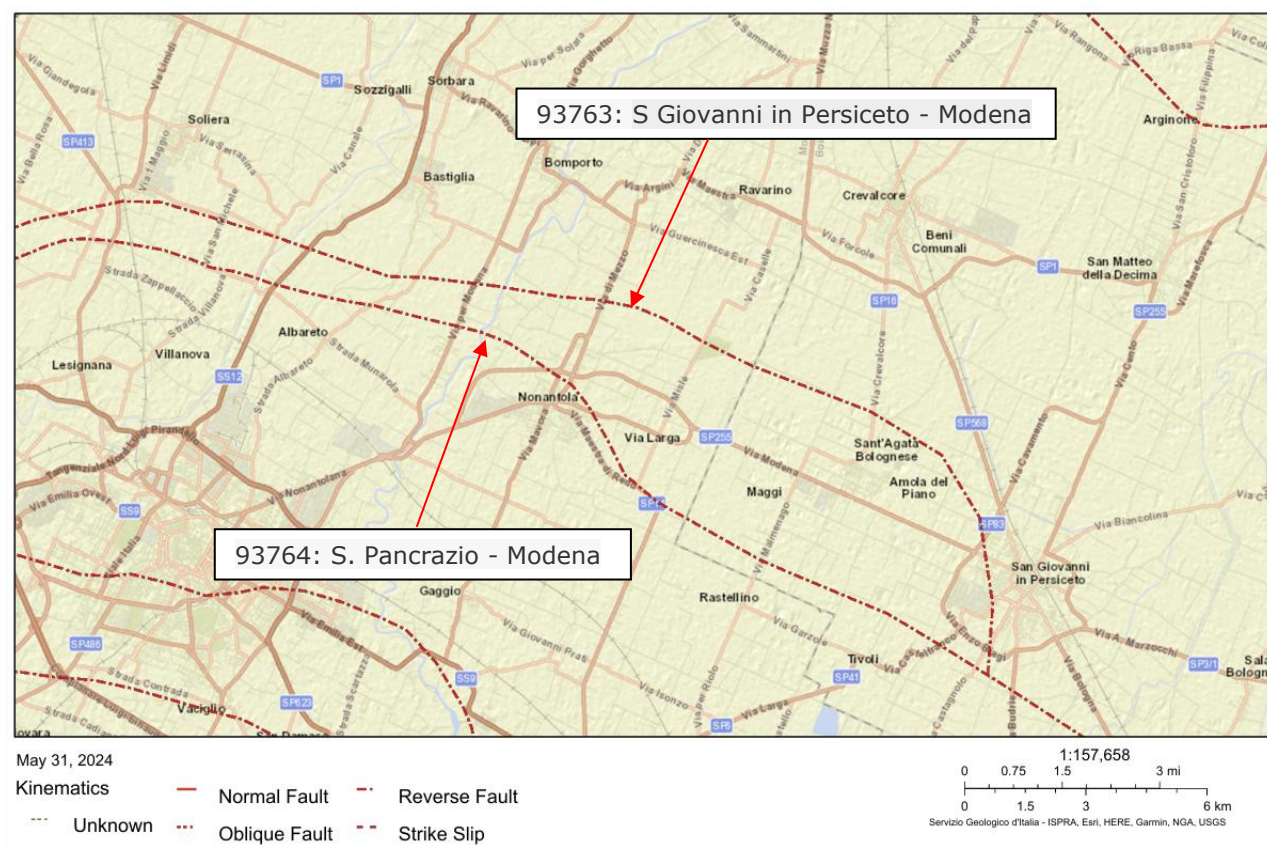


Figura 18 – Estratto del database “ITHACA” delle faglie attive e capaci.

4 ASPETTI GEOLOGICI, GEOMORFOLOGICI ED IDROGEOLOGICI

4.1 Aspetti geologici generali e stratigrafia locale

I contenuti del presente capitolo sono in parte tratti dalla Relazione Tecnica a supporto degli Studi di Microzonazione Sismica del Comune di Nonantola redatta nel Maggio 2014 a cura dello Studio Geologico CENTROGEO, opportunamente implementati ed aggiornati sulla base delle più recenti pubblicazioni in materia.

Come anticipato nel capitolo 3, la struttura geologica in corrispondenza del territorio comunale di Nonantola, e della più ampia fascia “Soliera – Bastiglia – S. Agata Bolognese – S. Giovanni in Persiceto”, è parte della zona di transizione tra il fronte di thrust pedeappenninico e le Pieghe Romagnole – a sud - e le Pieghe Ferraresi – a nord -, e caratterizzata da una depressione sinforme, con asse orientato all’incirca O-E ed immersione E. Le Pieghe Romagnole costituiscono assetti strutturali positivi sepolti, sovrascorsi sul fianco settentrionale ed embriciati in direttrice settentrionale, che hanno determinato l’innalzamento della base del Pliocene a $-3.0 \div -2.0$ km dal p.c. Il substrato pre-pliocenico, procedendo verso nord, si approfondisce rapidamente sino a giungere a $-7.5 \div -8.5$ km dal p.c. in corrispondenza dell’asse della sinclinale; più a nord, mediante una sequenza di faglie inverse e sovrascorrimenti, disposti ad embrici, il substrato interseca il settore delle Pieghe Ferraresi e le isobate risalgono a $-1.0 \div -2.0$ km dal p.c. giungendo alla massima culminazione assiale in prossimità di Novi di Modena, località Cavone, dove il tetto si rinviene circa a $-220 \div -300$ m dal p.c.

Le principali faglie neotettoniche, individuate nel contesto del progetto C.N.R. “Progetto Finalizzato Geodinamica, Sottoprogetto Neotettonica” (1987), non evidenziano la presenza di ripercussioni in superficie e dislocazioni attive in corrispondenza del territorio di Nonantola. Nel sottosuolo di quest’ultimo, in base ai dati AGIP e R.E.R., il tetto del Quaternario Marino (Qm. CARG ER) si rileva a circa -450 m s.l.m., in corrispondenza della depressione sinforme di cui sopra (Figura 19). Tale struttura è coperta da sedimenti di piana fluvio-deltizia di ambiente marino marginale ed in parte di piana alluvionale e di conoide distale, seguiti, verso l’alto stratigrafico, da alluvionali formate da livelli sabbiosi più o meno continui, sovente lentiformi, intercalati a sequenze prevalentemente limo-argillose.

Tali sequenze appartenenti al Sintema Emiliano-Romagnolo, nel sottosuolo dell’area in cui si trova Nonantola, non evidenziano la significativa presenza di deformazioni correlate ad azioni tettoniche, come invece si osserva nelle zone poste a circa $20 - 25$ Km ad ovest (Correggio – Bagnolo – Novellara).

L’interfaccia acque dolci - acque salmastre è generalmente rinvenibile, tra Nonantola, Sorbara e Soliera, tra $-450/-500$ m e $-600/-650$ m dal piano campagna.

La successione sedimentaria continentale, che contraddistingue i depositi più superficiali dell’area di studio, appartiene come detto al Supersintema Emiliano-Romagnolo (ciclo Quaternario continentale Qc secondo Ricci Lucchi et alii, 1982) di età olocenico-pleistocenica, che costituisce la parte sommitale del ciclo sedimentario trasgressivo-regressivo della successione post-evaporitica del margine padano-adriatico. Il Supersintema è ripartito in due successioni sovrapposte di rango inferiore, il Sintema Emiliano-Romagnolo inferiore (AEI) e il Sintema Emiliano-Romagnolo Superiore (AES) (Di Dio et alii, 1997a, b), separati da una superficie di discontinuità stratigrafica. Nell’area d’indagine la base del sintema Emiliano-Romagnolo Superiore si colloca a profondità comprese tra i $250 - 300$ m (Figura 20).

La stratigrafia a partire dalla base dell’AES è ben ricostruita per Nonantola dalla sezione nr. 3 (SO-NE) della MZS-2014 (CENTROGEO) (Figura 21): una continua alternanza di strati sabbiosi e strati argillosi, dove i secondi hanno spessore largamente superiore ai primi.

Lo spessore più superficiale è costituito da circa 15 m di AES₈ (subsintema di Ravenna), seguito da AES₇ (subsintema di Villa Verrucchio), entrambi costituiti da alternanze di sabbie, limi e argille di tracimazione fluviale indifferenziata (Figura 22).

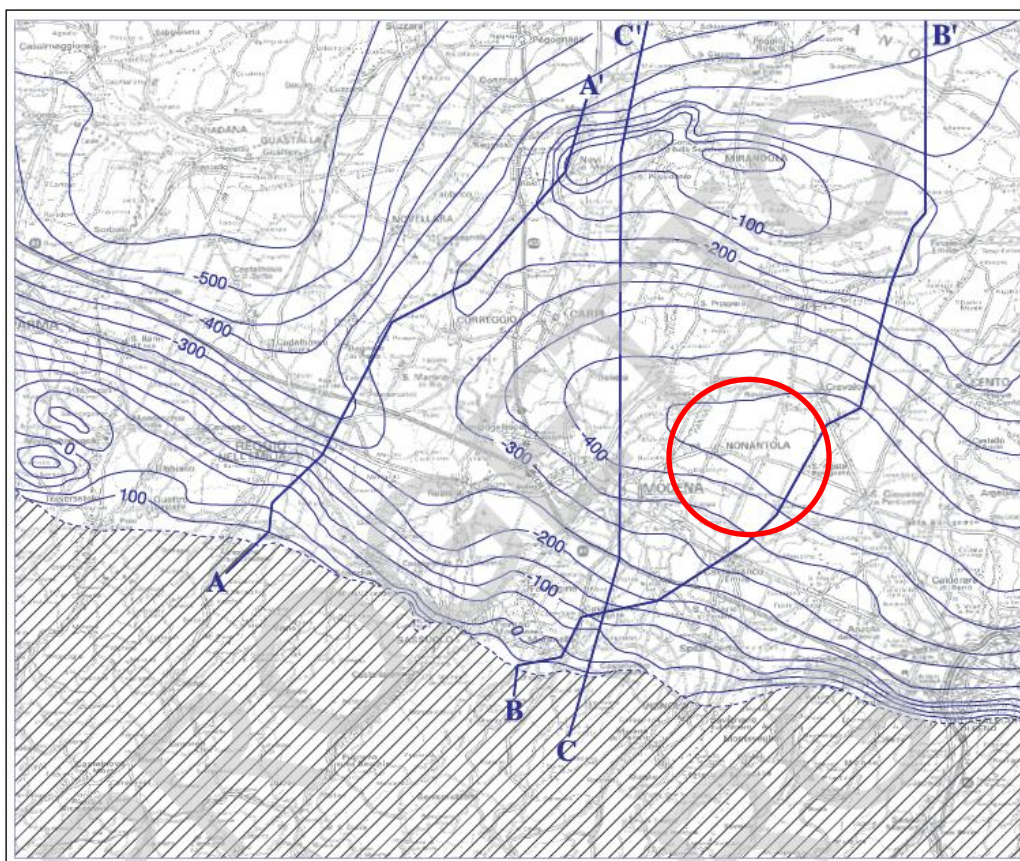


Figura 19 - Profondità (in m s.l.m.) del limite basale dei sedimenti quaternari continentali (da RER & Eni Agip, 1998 con modifiche in: Note Illustrative Foglio 201 "Modena" del Progetto CARG).

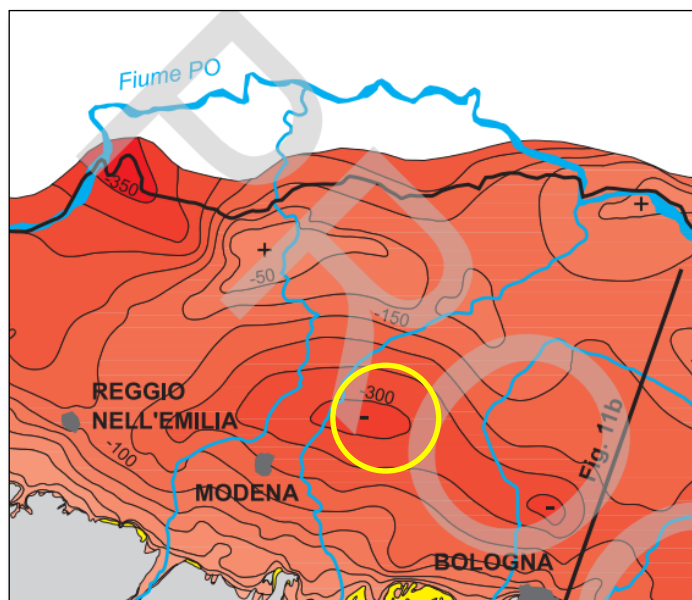


Figura 20 - Isobate della base del Sistema Emiliano-Romagnolo superiore (fonte: Progetto CARG). Il cerchio giallo identifica l'area di studio.

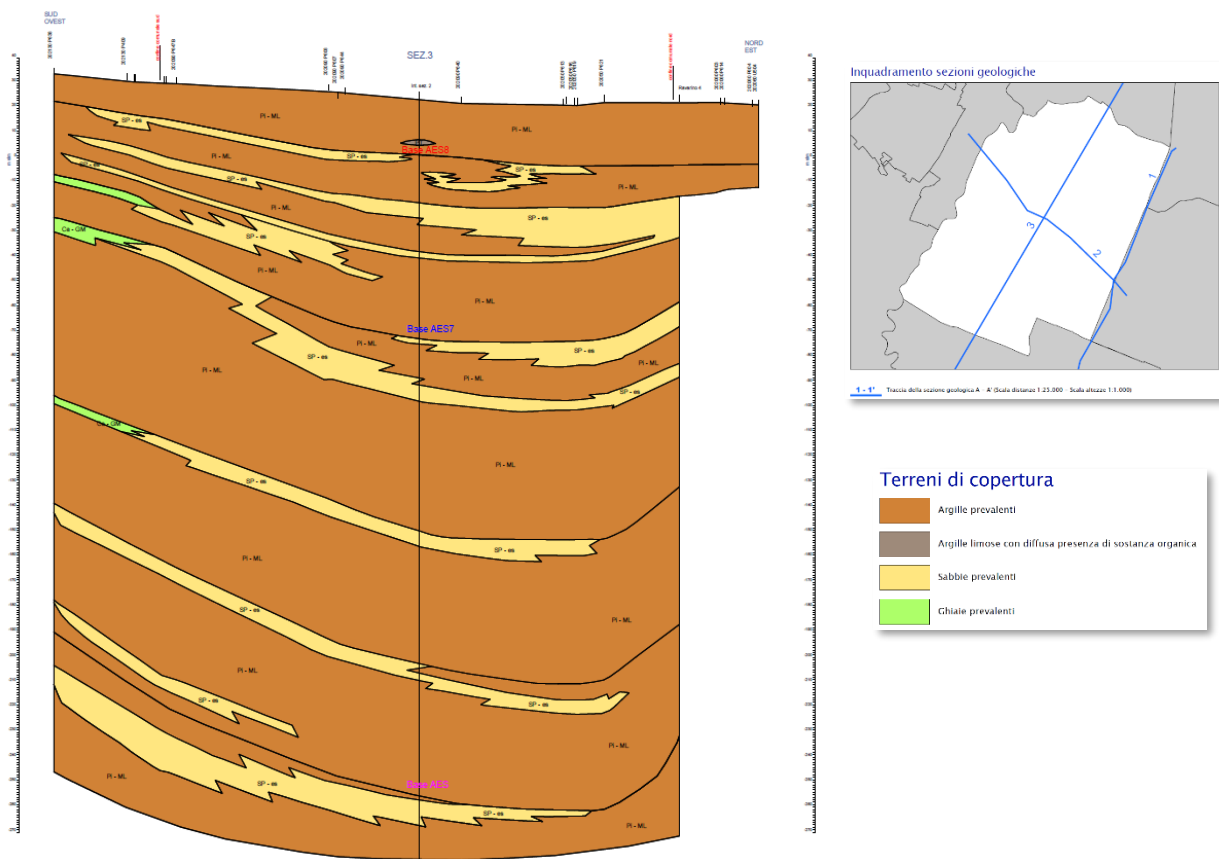


Figura 21 – Sezione nr. 3 (SO-NE) della MZS-2014 del Comune di Nonantola, a cura di CENTROGEO.

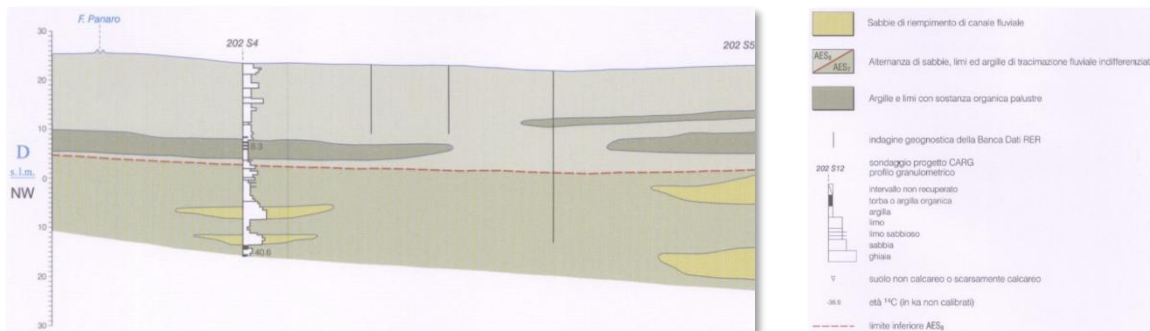


Figura 22 – Stralcio della sezione geologica D-D' del Foglio 202 "San Giovanni in Persiceto della Carta Geologica d'Italia a scala 1:50.000.

Al top del subsistema di Ravenna (AES8) è infine presente un'unità di rango stratigrafico inferiore, rappresentate dall'Unità di Modena (AES8a) (Olocene; post IV-VII sec. d.C.). Quest'ultima è costituita da una successione sedimentaria la cui deposizione è inquadrabile nell'ambito degli eventi alluvionali che hanno caratterizzato gli ultimi 1.500 anni di storia evolutiva (post IV-VII sec. d.C.). Lo spessore massimo dell'unità è di alcuni metri ed è costituito da argille e limi, in contesti di piana inondabile. Il profilo di alterazione è di esiguo spessore (poche decine di cm). Al tetto l'unità presenta localmente un suolo calcareo poco sviluppato di colore grigio-giallastro.

Nella parte meridionale e centro-orientale del territorio comunale predominano terreni del Subsistema di Ravenna, mentre nella parte occidentale e settentrionale, quelli dell'Unità di Modena.

La litologia più superficiale del territorio comunale (primi 2 m da piano campagna) è contraddistinta da depositi a granulometria variabile: le argille limose caratterizzano la parte centro-orientale a morfologia più depressa, i limi caratterizzano una stratta fascia da nord a sud nella parte centro-occidentale del territorio, mentre i limi sabbiosi, che sono la litologia prevalente, caratterizzano sia la zona più prossima all'alveo del fiume Panaro, che quella al confine settentrionale, in corrispondenza del dosso di Ravarino, che quella meridionale, interessando la quasi totalità dei centri abitati.

Nella Tav. 1 "Geomorfologia" è stata rappresentata, come inserto, la "Carta Geolitologica" riportata anche nell'immagine seguente, per la cui stesura si è fatto riferimento alla documentazione prodotta dal Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna.

Le unità affioranti nel territorio comunale sono state distinte facendo riferimento alla "Cartografia Geologica della Regione Emilia-Romagna", risultato di revisioni ed aggiornamenti effettuati dal Servizio Geologico a partire dal 2003, sia sulle coperture quaternarie che sul substrato geologico.

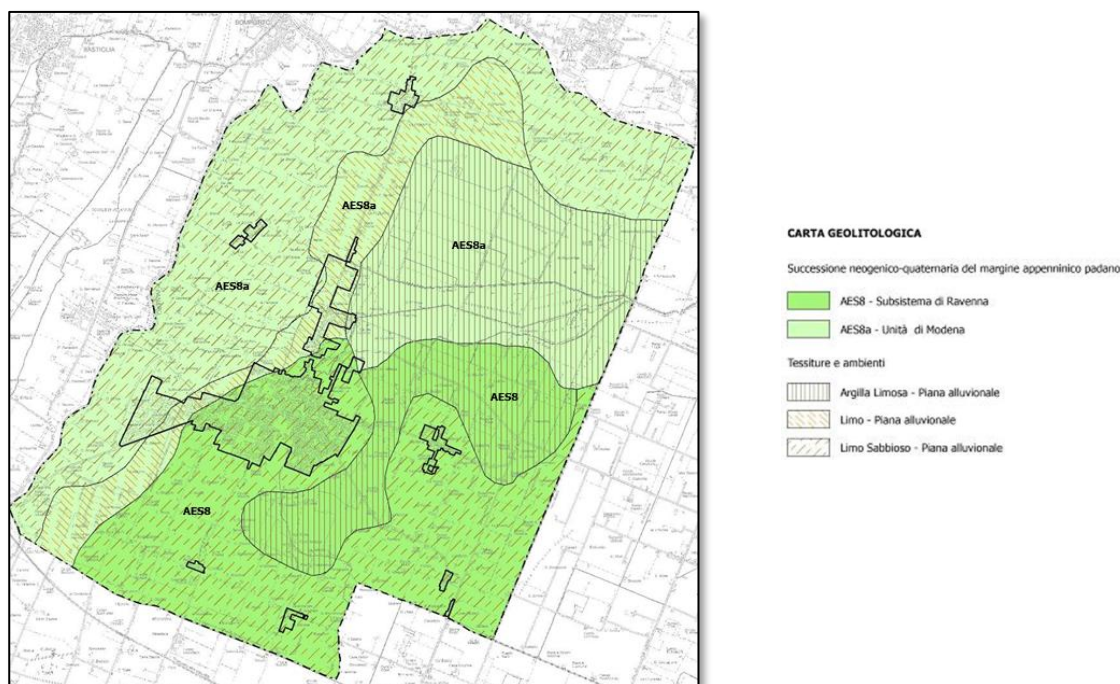


Figura 23 – Carta della litologia di superficie del territorio comunale di Nonantola (inserto della Tav. 1 "Geomorfologia" del QC-PUG).

4.2 Aspetti geomorfologici

Le caratteristiche geomorfologiche del territorio comunale sono ben descritte nella Tavola 1 "Geomorfologia" del QC-PUG.

Sono principalmente rappresentate da forme lineari rilevate, dette "dossi", corrispondenti ad alvei antichi od attuali pensili sulla pianura circostante, e da zone morfologicamente depresse all'interno delle quali l'acqua tenderebbe a ristagnare se non allontanata dai canali di bonifica. I dossi sono di forma generalmente allungata e sinuosa, poco rilevanti e dolcemente raccordati alle superfici adiacenti.

A loro volta i dossi vengono distinti in:

- **Dossi di accertato interesse:** due di essi si sviluppano nella parte meridionale del territorio, l'altro al confine settentrionale; quelli a sud rappresentano la parte terminale di morfologie con sviluppo principale a monte del territorio comunale; sono individuabili l'uno all'estremità orientale, in corrispondenza dell'ingresso, in territorio nonantolano, del tracciato del Canal Torbido, l'altro in corrispondenza dell'insediamento più recente di Bagazzano; il terzo dosso, di dimensioni maggiori, si sviluppa lungo tutto il confine settentrionale, con direzione approssimativamente E-O e costituisce parte del "Dosso di Ravarino" che si sviluppa anche nell'adiacente comune.
- **Dossi di ambito fluviale recente:** è il dosso che si sviluppa con andamento SO-NE in adiacenza all'alveo del fiume Panaro;
- **Dossi di modesta rilevanza:** si tratta di modeste forme riconoscibili ad est dell'abitato di Casette e lungo l'allineamento Redù – Via Larga.

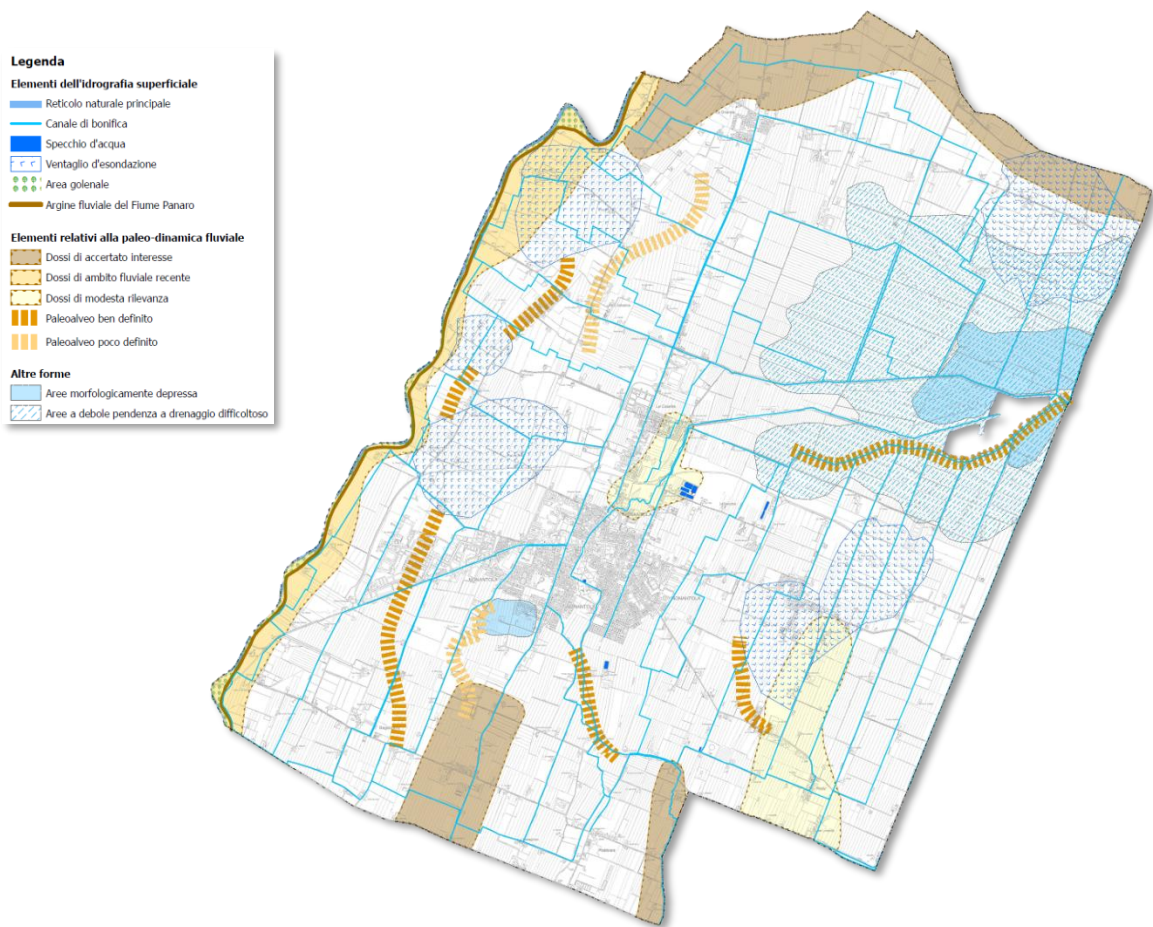


Figura 24 - Tavola 1 "Geomorfologia" del QC-PUG di Nonantola.

Oltre alle zone morfologicamente rilevate, il territorio comunale risulta caratterizzato da alcune aree a morfologia depressa, contraddistinte da quote del terreno più basse rispetto a quelle delle zone circostanti e da un bassissimo gradiente topografico; all'interno di tali aree il deflusso idrico risulta difficoltoso e l'acqua viene allontanata grazie ai canali di bonifica.

Nel territorio è riconoscibile un'area morfologicamente depressa nella parte meridionale del capoluogo, tra la Via Colombo e la Via Olaf Palme ed una, di maggiori dimensioni, in corrispondenza dell'area di riequilibrio ecologico Torrazzuolo, contraddistinta anche dalla presenza di un vaso naturale; in quest'area è stata perimetrata anche un'area a debole pendenza, a drenaggio difficoltoso.

Altre tracce paleo-idrografiche sono rappresentate dai “paleoalvei a livello della pianura”: si tratta di forme lineari sinuose, alla stessa quota del piano campagna circostante, che si rinvennero principalmente nella media pianura con direzione analoga a quella dei dossi, anch’esse indicazione di antichi alvei fluviali. Visibili principalmente attraverso l’analisi delle fotografie aeree, consentono, insieme ai dossi, di ricostruire l’evoluzione nel tempo dell’idrografia locale.

Sono infine presenti ventagli d’esondazione, ascrivibili ad episodi localizzati di rotta dei corsi d’acqua.

4.3 Aspetti idrogeologici

L’ambito territoriale del Comune di Nonantola è localizzato in corrispondenza dei corpi idrici appartenenti alla pianura alluvionale appenninica (Figura 25).

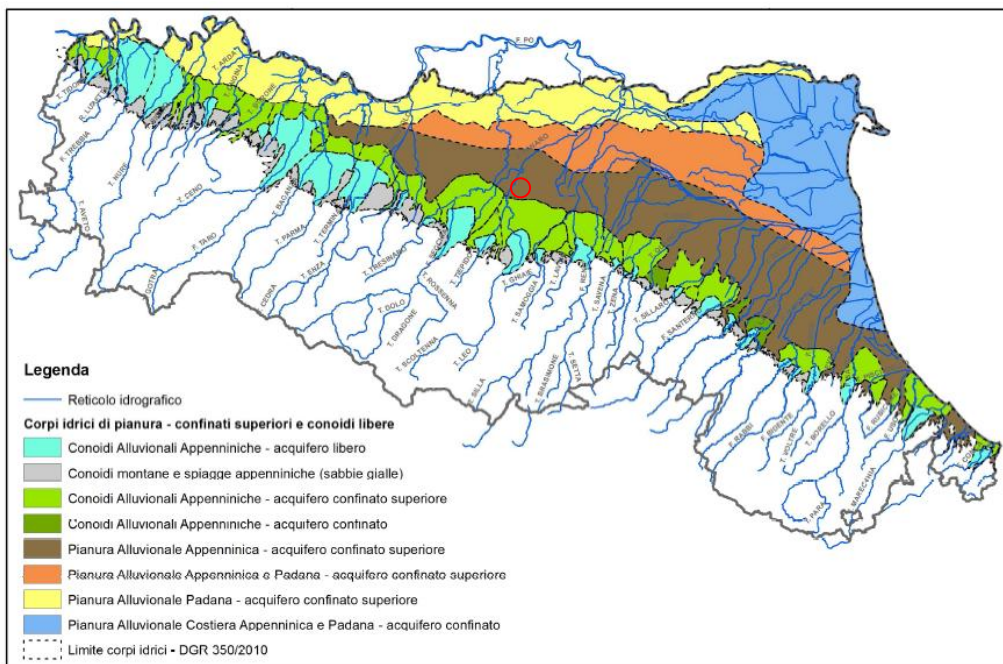


Figura 25 - Corpi idrici sotterranei di pianura liberi e confinati superiori (acquiferi A1 e A2).

Per definire il modello idrogeologico locale si è fatto riferimento a dati bibliografici, in particolare alla sezione idrostratigrafica n. 27, ubicata ad est rispetto all’area in esame con sviluppo da Sud verso Nord, desunta dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia Romagna la cui ubicazione è riportata nella Figura 26.

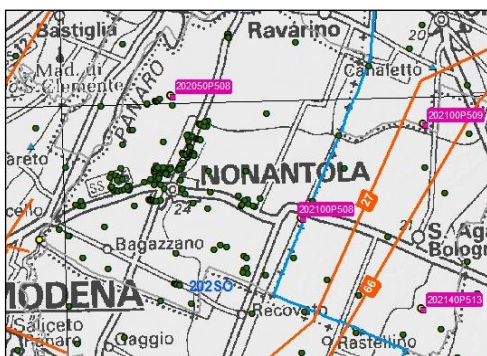


Figura 26 - Ubicazione delle Sezioni Idrostratigrafiche (Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della RER).

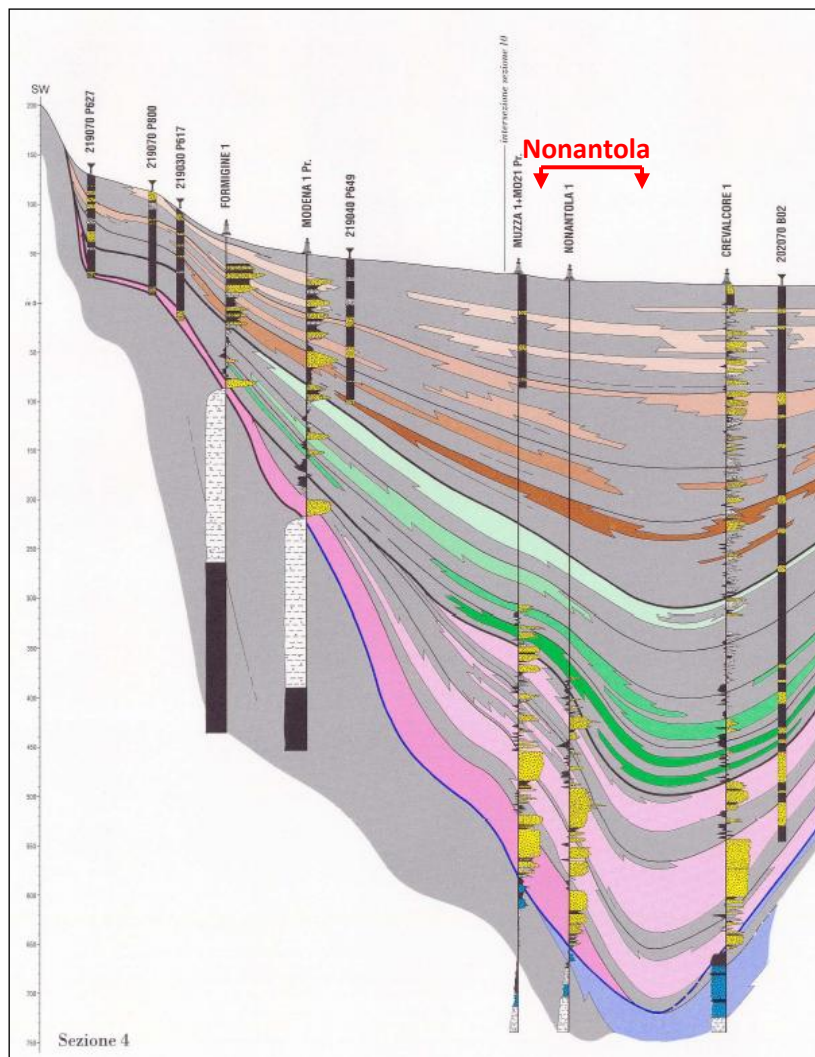


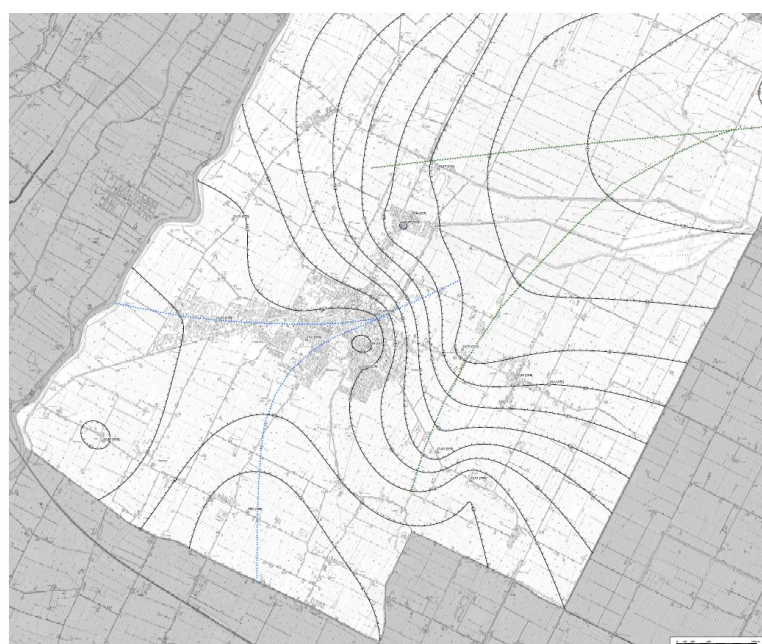
Figura 27 - Estratto della Sezioni Idrostratigrafica n. 27 rispetto all'area in studio.

Nello specifico dell'area di Nonantola il sottosuolo è caratterizzato da una sequenza monotona di argille e limi prevalenti con sottili lenti sabbiose e sabbioso-limose discontinue per estensione laterale e verticale; la grande profondità dei pozzi testimonia la scarsa disponibilità di acquiferi consistenti, ospitati in poche e sottili lenti sabbiose. Sul territorio comunale non sono presenti pozzi ad uso acquedottistico, né fontanili.

La campagna di rilevamento piezometrico **dell'acquifero freatico**, effettuata in occasione della redazione delle MZS-2014 (CENTROGEO), ha evidenziato un assetto idrogeologico principale a falda radiale divergente nei settori occidentali e meridionali e prevalentemente a falda conica convergente nelle zone centrali e centro orientali settentrionali (Figura 28 a).

L'analisi d'insieme dell'andamento della profondità dell'acqua nel sottosuolo evidenzia che generalmente il livello d'equilibrio della falda freatica è rinvenibile tra -1,5 e -2 m dal piano campagna, con lievi differenze a seconda dei luoghi (Figura 28 b).

Anche l'analisi di tutte le indagini penetrometriche raccolte nel database per questo aggiornamento, la falda superficiale ha un **valore medio di circa -2 m dal p.c.**

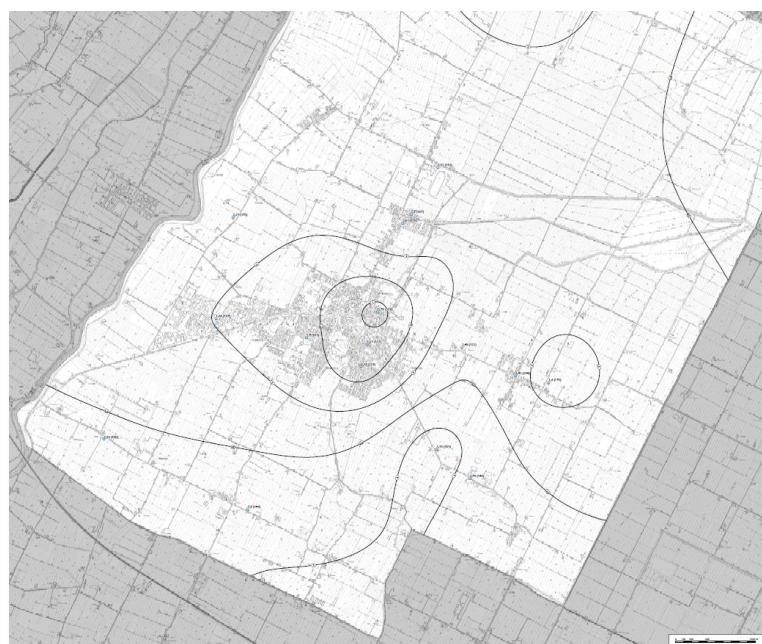


Legenda

Elementi geologici e idrogeologici

- 22,37 (129) Piezometria della falda (metri sul livello del mare) e numero d'ordine
- Isopieze della falda (metri sul livello del mare) con direzione del flusso idrico sotterraneo
- Fascia di spartiacque idrico sotterraneo
- Fascia di drenaggio idrico sotterraneo

a)



Legenda

Elementi geologici e idrogeologici

- 1,21 (111) Soggiacenza della falda (metri dal piano di campagna) e numero d'ordine
- Soggiacenza della falda (metri dal piano di campagna)

b)

Figura 28 – Carta della piezometria (a) e della soggiacenza (b) del primo acquifero. Fonte: MZS-2014 (a cura di CENTROGEO).

5 DATI GEOTECNICI E GEOFISICI

I dati elaborati in questa sede hanno preso a riferimento, oltre alle indagini contenute nello studio di MZS-2014 del Comune di Nonantola (a cura di CENTROGEO), anche i nuovi dati penetrometrici post-2014 reperiti presso l'Ufficio Tecnico comunale, contenuti nelle relazioni geologiche prodotte a corredo di progetti di edilizia privata e di edilizia/opere pubbliche.

In particolare le indagini geotecniche e geofisiche (penetrometrie statiche e prove geofisiche) raccolte ed archiviate sono:

- Da MZS-2014:
 - Nr. 252 CPT (prove penetrometriche statiche, meccaniche)
 - Nr. 13 CPTU (prove penetrometriche statiche con piezocono da banca-dati RER)
 - Nr. 2 sondaggi meccanici spinti alla profondità di 40 m (banca-dati RER)
 - Nr. 28 misure di sismica a rifrazione con metodo combinato attivo/passivo con antenna monodimensionale delle quali:
 - Nr. 9 MASW/Re.Mi.
 - Nr. 19 Re.Mi.
 - Nr. 28 HVSr (indagini geofisiche passive)
- Da raccolta dati post-2014 (questo aggiornamento):
 - Nr. 91 CPT (prove penetrometriche statiche, meccaniche)
 - Nr. 15 CPTU (prove penetrometriche statiche con piezocono)
 - Nr. 7 HVSr (indagini geofisiche passive)
 - Nr. 4 MASW.

Le indagini post-2014 sono state trasformate in formato digitale e georeferenziate, al fine di consentirne la rappresentazione in ambiente GIS e sono stati organizzati in formato vettoriale (shapefile) nel rispetto delle specifiche tecniche di riferimento⁴.



Figura 29 – Sinistra: distribuzione delle indagini penetrometriche e geofisiche nella MZS-2014; destra: distribuzione delle indagini penetrometriche e geofisiche post-2014 raccolte per questo aggiornamento.

Tutte le indagini (pre- e post-2014) sono state accorpate in un unico database attraverso apposita procedura sviluppata all'interno del SoftMS (versione 4.2). Per 222 delle totali 371 indagini penetrometriche archiviate, è stato possibile digitalizzare i valori numerici delle resistenze alla punta e laterale e, per quanto riguarda le CPTU, anche i valori di pressione neutra. Questo ha permesso di omogeneizzare sull'intero territorio la ricostruzione della litostratigrafia e di eseguire, come mostrato nel capitolo 8.2, analisi di suscettività alla liquefazione.

⁴ 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.

La profondità media raggiunta dalle prove penetrometriche meccaniche è di 15 m, con profondità minime di 10 m (a luoghi anche 5 m) e massime di 20 m. Le prove penetrometriche con piezocono raggiungono solitamente 20 m di profondità, con punte massime di 35 m per quelle presenti nel database regionale.

La presenza di livelli sabbiosi poco addensati si manifesta solitamente nei primi 5 m da p.c., ma anche i livelli più profondi mostrano generalmente un grado di addensamento non molto superiore. Gli strati argillosi, più frequenti e di spessore relativo maggiore, mostrano valori di resistenza piuttosto bassi.

Al di là di leggeri scostamenti, i valori delle frequenze fondamentali di vibrazione del terreno, ricavate dalle HVSr della MZS-2014 sono generalmente compresi tra 0,6 ÷ 1,0 Hz, indicando in accordo con quanto evidenziato dalla stratigrafia locale, spessore dei depositi soggetti ad amplificazione maggiori di 100 m.

Per quanto riguarda invece le velocità delle onde sismiche “S”, le acquisizioni eseguite in occasione della MZS-2014 hanno evidenziato generalmente valori di V_{s30} contenuti in un modesto campo di variabilità, oscillanti tra massimi di 230÷250 m/sec e minimi di 172÷180 m/sec, con profili crescenti con la profondità, caratteristici quindi della categoria sismica “C”.

L'insieme degli elementi geologici e geofisici così acquisiti, unitamente alle informazioni presenti nella letteratura, hanno permesso di ricostruire il modello geologico delle aree interessate dallo studio di microzonazione sismica, di cui viene data interpretazione nel successivo capitolo 6.

6 MODELLO DEL SOTTOSUOLO

La base per uno studio di microzonazione sismica è la definizione, quanto più accurata possibile, del modello geologico del sottosuolo, cercando di individuare come varia la successione stratigrafica all'interno delle aree in esame fino alla profondità del substrato rigido, a cui dovranno essere ancorati i segnali sismici di input per le analisi di risposta sismica locale.

Oltre agli aspetti geologico-strutturali generali descritti nel capitolo 4 di questa relazione, a seguire si cercherà di fornire un quadro litostratigrafico di maggior dettaglio per le aree da indagare del territorio comunale, attraverso l'analisi dei dati geognostici e geofisici raccolti.

Come mostrato alla fine del capitolo precedente, nel complesso, la profondità media delle indagini penetrometriche sull'intero territorio indagato ha permesso di zonizzare in modo soddisfacente, dal punto di vista litostratigrafico, i primi 10-15 m dal piano campagna e, solo a luoghi, lo spessore compreso tra 15 e 20 m. Oltre tale profondità, gli unici elementi disponibili sono alcune CPTU a 30-35 m e alcuni sondaggi a carotaggio continuo e pozzi per acqua dal database regionale delle indagini geognostiche.

La prima constatazione che si può fare sulla litostratigrafia locale indagata dalle indagini penetrometriche riguarda la completa assenza di livelli e strati ghiaiosi. Il sottosuolo nonantolano è pertanto caratterizzato da una sequenza di alternanze di argille, limi argillosi, miscele sabbiose e sabbie, dove le granulometrie più grossolane sono di spessore cumulo largamente inferiore rispetto a quelle più fini. A partire da questa constatazione, si è tentata una zonizzazione litostratigrafica dei primi 15-20 m delle aree indagate in base alla presenza/assenza di sabbie e, laddove presenti, in base alla distribuzione con la profondità dei loro spessori cumulati. Per far questo si è seguita la procedura proposta da Colombi et al. (2014)⁵. Questa zonizzazione risulterà particolarmente funzionale per la successiva costruzione della carta delle MOPS, poiché consentirà di delimitare le aree potenzialmente instabili per liquefazione ("aree di attenzione").

La procedura di Colombi et al. (2014) consente di evidenziare la presenza e la distribuzione di intervalli granulari dall'interpretazione delle indagini penetrometriche e di eseguire la seguente classificazione:

- L1: presenza di orizzonti liquefacibili spessi almeno 30-40 cm, sotto falda, nei primi 5 m;
- L2: presenza di orizzonti liquefacibili spessi almeno 1 m tra 5 e 10 m;
- L3: presenza di orizzonti liquefacibili spessi almeno 2 m tra 10 e 15 m;
- L4: presenza di orizzonti liquefacibili spessi almeno 2 m tra 15 e 20 m;
- LT1 presenza di orizzonti liquefacibili che iniziano nei primi 5 m e continuano verso il basso;
- LT2 presenza di orizzonti liquefacibili che iniziano tra 5 e 10 m e continuano verso il basso;
- LT3 presenza di orizzonti liquefacibili che iniziano tra 10 e 15 m e continuano verso il basso;
- LT4 presenza di orizzonti liquefacibili che iniziano tra 15 e 20 m e continuano verso il basso;
- N: assenza di orizzonti liquefacibili importanti nei primi 15-20 m;
- X: dato non interpretabile.

Nella classificazione di cui sopra, per "orizzonti liquefacibili" s'intendono livelli/strati sabbiosi o di miscele sabbiose, ovvero a composizione granulometrica predisponente il fenomeno della liquefazione (livelli/strati incoerenti).

Dal risultato della classificazione visibile in Figura 30 è possibile osservare come la maggior parte delle verticali penetrometriche mostri la presenza di livelli incoerenti già nei primi 2-5 m, che continuano ad essere presenti anche oltre 5 m. Meno frequenti sono le verticali in cui i livelli incoerenti cominciano ad essere presenti solo tra 5 e 10 m e che continuano anche oltre 10 m; si noti come queste verticali siano sempre spazialmente prossime alle prime.

⁵ Colombi, A., Curli, S., Ercolessi, G., Loffredo, G., Martelli, L., Minghini, F., Romagnoli, M., Stevanin, E., Veronese, T., Zanetti, D., 2014. Analisi del rischio di liquefazione dell'area produttiva "Piccola e media industria" di Ferrara. Presented at the 33° Convegno nazionale GNGTS, Regione Emilia-Romagna, Bologna, pp. 165-173.

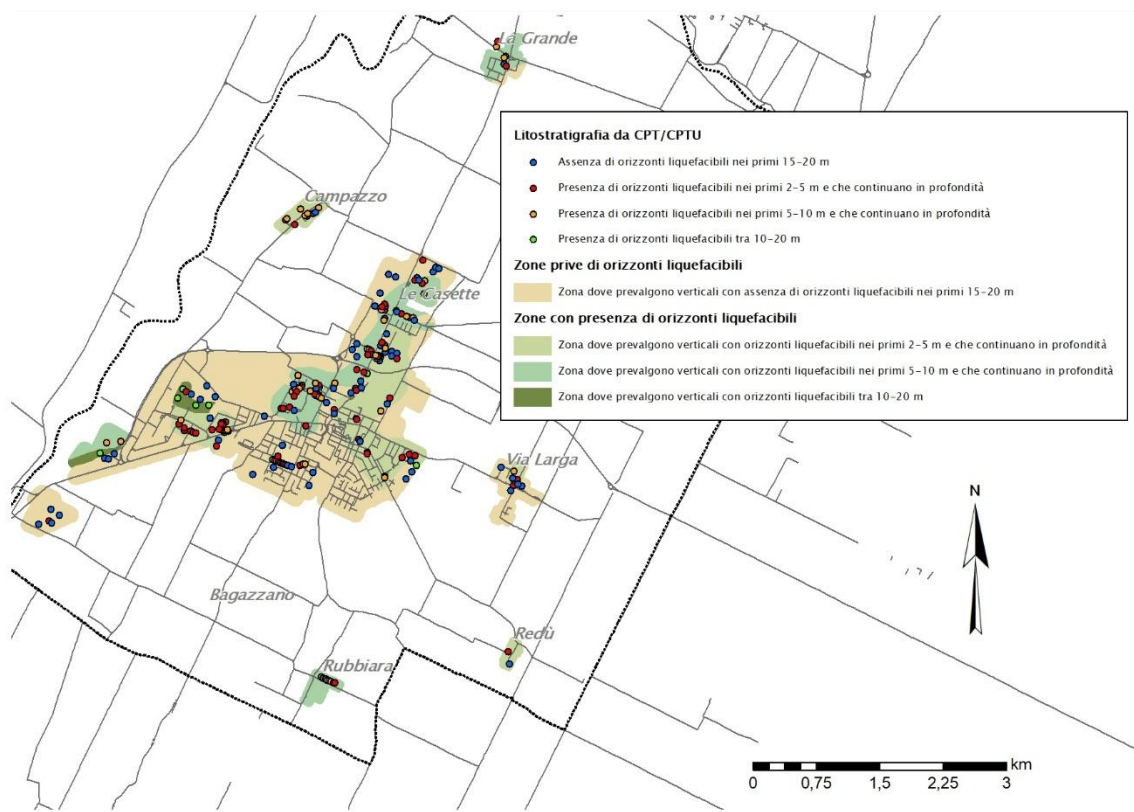


Figura 30 – Distribuzione delle classi litostratigrafiche secondo Colombi et al. (2014) dall’analisi delle 222 penetrometrie di cui si dispongono i dati numerici di resistenza in formato digitale.

Pochissime sono le verticali in cui gli strati incoerenti cominciano ad essere presenti solo tra 10 e 20 m. Piuttosto diffuse sono invece le verticali prive di livelli incoerenti, ovvero dove i 15-20 m indagati presentano esclusivamente terreni fini (argille e limi).

La classificazione delle verticali penetrometriche ha quindi permesso di zonizzare il territorio indagato nel modo seguente:

- **Zona 1** - Aree in cui sono assenti orizzonti liquefacibili importanti nei primi 15-20 m. Da 20 m alla profondità stimata del bedrock sismico (circa 150 m), sono presenti alternanze, di spessore non definibile con precisione, di argille e sabbie (con argille prevalenti).
- **Zona 2** - Aree in cui sono prevalenti le verticali LT1 (pallini rossi) sono state definite come “Aree con alternanze di terreni fini (F = argille e limi) e di terreni più grossolani (G = sabbie e miscele sabbiose) nei primi 20 m, con spessore cumulato $F > G$: i **livelli grossolani compaiono già nei primi 5 m**, a cui ne seguono altri fino a 20 m. Da 20 m alla profondità stimata del bedrock sismico (circa 150 m), sono presenti alternanze, di spessore non definibile con precisione, di argille e sabbie (con argille prevalenti)”.
- **Zona 3** - Aree in cui si addensano verticali LT1 e LT2 (pallini rossi e arancioni) sono state definite come “Aree con alternanze di terreni fini (F = argille e limi) e di terreni più grossolani (G = sabbie e miscele sabbiose) nei primi 20 m, con spessore cumulato $F > G$: i **livelli grossolani compaiono nei primi 5 m o tra 5-10 m**, a cui ne seguono altri fino a 20 m. Da 20 m alla profondità stimata del bedrock sismico (circa 150 m), sono presenti alternanze, di spessore non definibile con precisione, di argille e sabbie (con argille prevalenti)”.
- **Zona 4** - Aree in cui vi sono solo verticali LT3 (pallini verdi) sono state definite come “Aree con alternanze di terreni fini (F = argille e limi) e di terreni più grossolani (G = sabbie e miscele sabbiose) nei primi 20 m, con spessore cumulato $F > G$: i **livelli grossolani compaiono solo tra 10-20 m**. Da 20

m alla profondità stimata del bedrock sismico (circa 150 m), sono presenti alternanze, di spessore non definibile con precisione, di argille e sabbie (con argille prevalenti)”.

La zonizzazione grafica è visibile in Figura 30, mentre le rispettive colonne litostratigrafiche rappresentative delle 4 zone sono visibili in Figura 31.

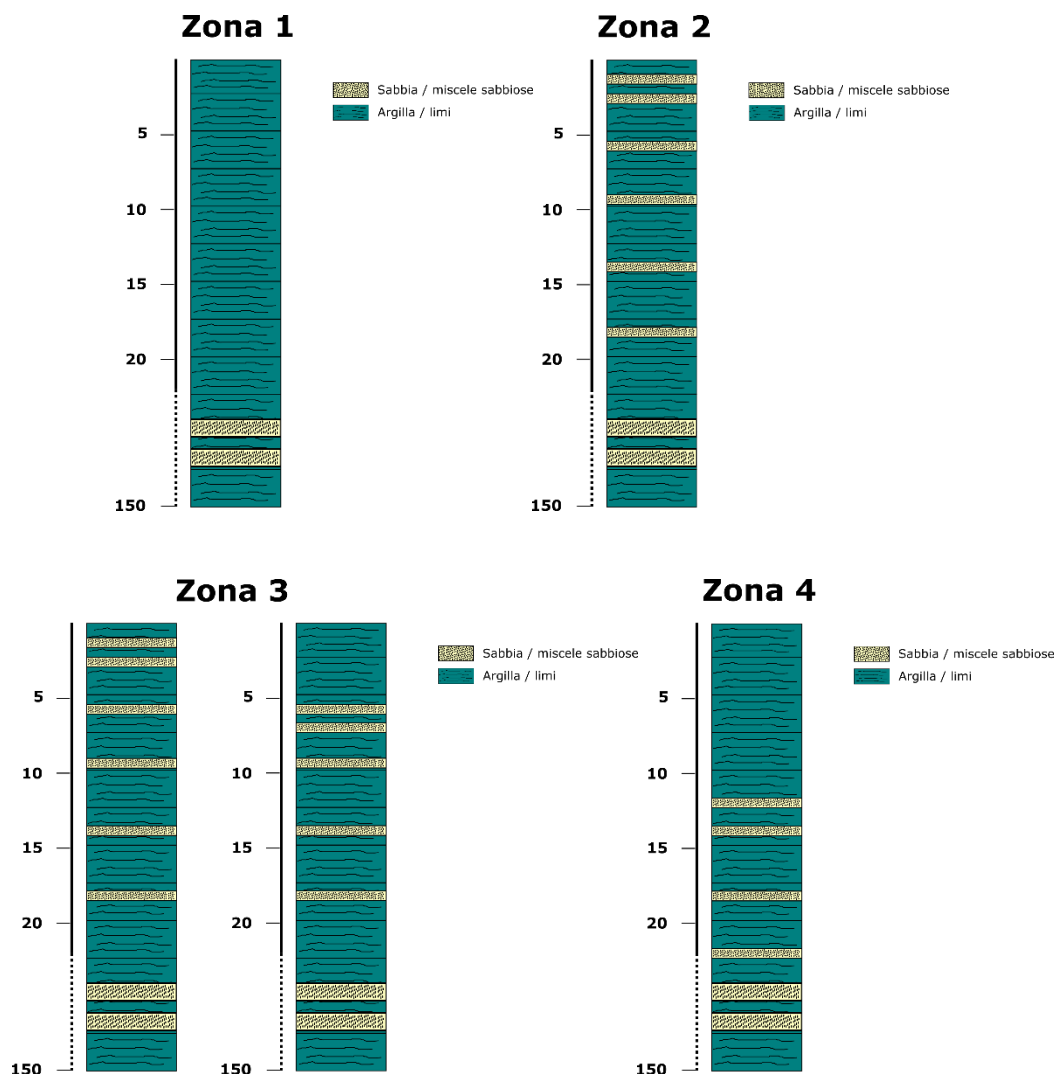


Figura 31 – Colonne litostratigrafiche rappresentative delle 4 zone in cui è stato suddiviso il territorio indagato da questo studio (vedasi Figura 30).

Relativamente alla profondità del bedrock sismico, come già anticipato è stata collocata ad una profondità di -150 ± 20 m da p.c. Nella MZS-2014, lo studio di CENTROGEO aveva condotto una interpolazione della profondità del bedrock sismico a valle di un’approfondita analisi della litostratigrafia locale, delle verticali di Vs e delle frequenze fondamentali di vibrazione del terreno. Ne era risultata una rappresentazione visibile in Figura 32 da cui si osserva una variazione di profondità del bedrock, a livello di intero territorio. Citando testualmente lo studio di CENTROGEO: “L’andamento spaziale denota la tendenza ad assecondare l’assetto del substrato pre-pliocenico, nei settori sud occidentali, occidentali fascia centrale settentrionale, dove evidenzia profondità relative del bedrock light minori: $-100 \div -120/-130$ m p.c. Le profondità relative maggiori, corrispondenti a $-140 \div -150$ m p.c., si osservano nella zona orientale centrale dove il substrato pre-pliocenico è rinvenibile alle profondità relative maggiori: $-7,5$ km p.c.; un analogo areale con profondità tra -140 e -160 m p.c. si riscontra nella fascia allungata SSE – NNO che si estende dalle zone meridionali occidentali del capoluogo, a sud di incrocio via Modena/via Mondine, a incrocio Strada Mavora/via Rubbiara a Strada

Maestra/Guazzaloca. Dalla comparazione tra le profondità del bedrock sismico sopra indicate con le sezioni stratigrafiche eseguite ed i profili litostratigrafici pubblicati dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli RER, si riscontra la tendenziale correlabilità con la parte medio basale - basale del subsistema AES₆".

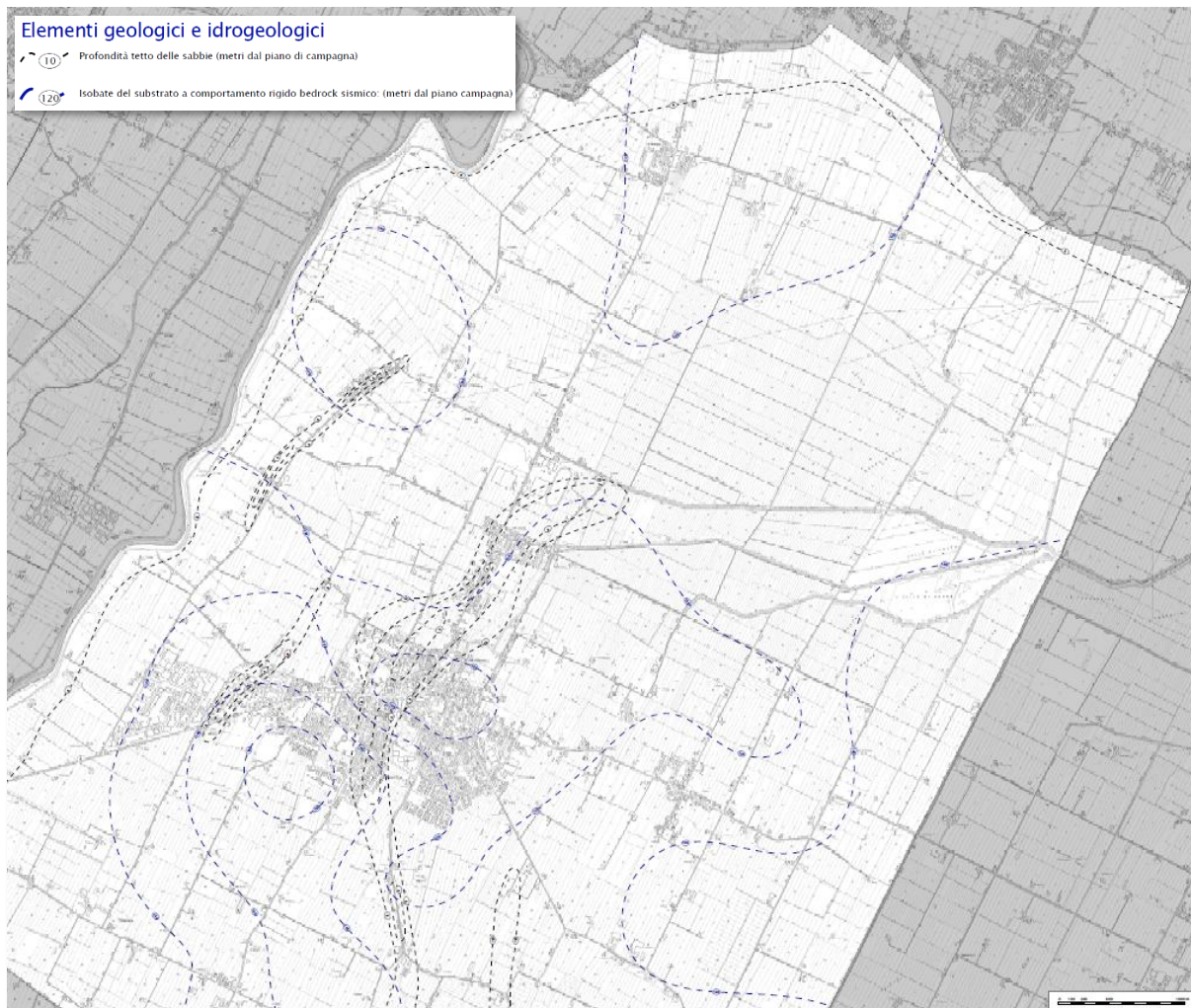


Figura 32 – “Carta tetto delle sabbie e del substrato a comportamento rigido” della Microzonazione Sismica di III livello del Comune di Nonantola (2014).

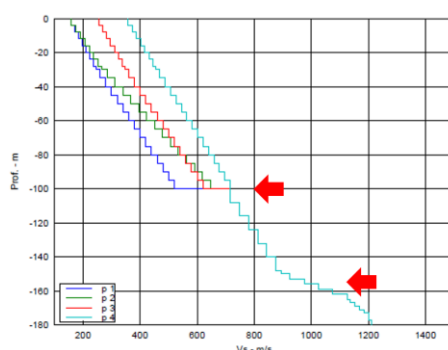


Figura 33 – Profili medi utilizzati per il calcolo dei fattori d’amplificazione per l’Ambito “Pianura 2” da Tinto et al. (2015). Le due frecce rosse indicano le due interfacce con alto contrasto d’impedenza.

Lo spettro di profondità del bedrock sismico individuato dalla MZS-2014 per Nonantola sembra accordarsi bene con l’andamento dei profili medi di Vs utilizzati dalla Regione Emilia-Romagna per definire i fattori di

amplificazione dell'Ambito "Pianura 2" (Tento et al., 2015)⁶ (Figura 33): dal grafico risulta evidente la presenza di una importante discontinuità stratigrafica responsabile di un significativo contrasto di impedenza a circa 100 m da p.c. e l'identificazione del tetto del bedrock sismico ($V_s > 800 \text{ m/s}$) a circa 150 m da p.c.

Infine, Mascandola et al. (2019)⁷ individuano, per il settore di pianura emiliano-romagnola in cui ricade il Nonantola, una profondità del bedrock sismico tra 150 e 200 m da p.c. (Figura 34).

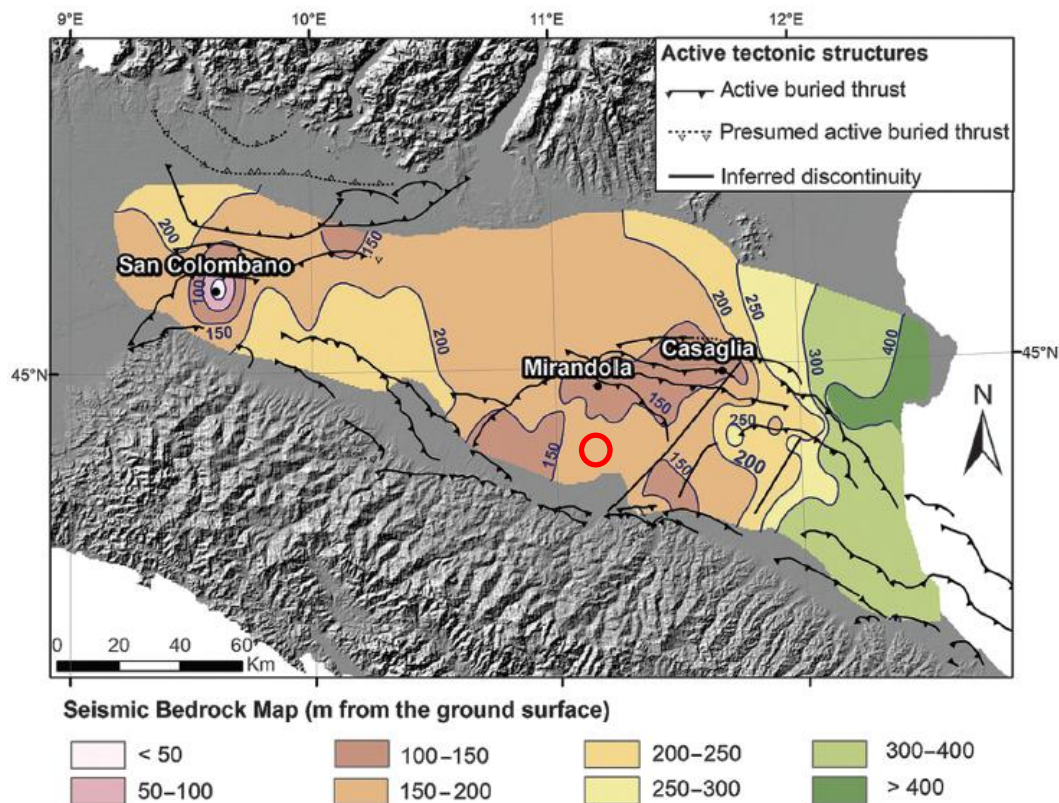


Figura 34 – Mappa della profondità del bedrock sismico (in metri dal piano campagna). Fonte: Mascandola et al. (2019). Il cerchio rosso individua il territorio comunale di Nonantola.

⁶ Tento, A., Martelli, L., Marcellini, A., 2015. Abachi per la valutazione dei fattori di amplificazione per le indagini di microzonazione sismica di secondo livello in Emilia-Romagna. CNR - Istituto per la Dinamica dei Processi Ambientali, Milano.

⁷ 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>

7 INTERPRETAZIONI E INCERTEZZE

Per quanto riguarda l'interpretazione dei dati pregressi, sia quelli già contenuti nella MZS-2014 che quelli post-2014, relativamente alle indagini penetrometriche d'archivio (CPT e CPTU) ed ai sondaggi a carotaggio, non si segnalano difficoltà interpretative: i dati originali sono sempre risultati di chiara lettura ed è spesso stato possibile estrarne il valore numerico per successive re-interpretazioni e nuove elaborazioni.

Relativamente alle indagini geofisiche (MASW/Re.Mi., Re.Mi. e HVSr), queste sono state realizzate tutte in occasione della MZS-2014 e dall'esame della relazione illustrativa relativa, a cura di CENTROGEO, non emergono difficoltà interpretative.

L'alta densità areale di indagini penetrometriche che caratterizza il Capoluogo ha agevolato l'interpolazione grafica dei dati puntuali permettendo di disegnare zone omogenee dal punto di vista litostratigrafico, verosimilmente prossime alla situazione reale, almeno per quanto riguarda gli areali edificati; nelle aree non costruite, ma anche in alcune aree del costruito scoperte da indagini, l'interpretazione risente inevitabilmente di maggiori margini d'incertezza.

Per quanto riguarda le aree del territorio urbanizzato che ricadono nelle frazioni, le indagini sono talvolta disperse, mentre altre volte si addensano esclusivamente in areali molto ristrette. Questo ha determinato un maggior grado di incertezza rappresentativa nelle aree di frazione rispetto al Capoluogo.

Per quanto riguarda la litostratigrafia profonda, compresa tra 20 m e la profondità stimata del bedrock sismico, il numero di indagini a disposizione è piuttosto esiguo e la tipologia d'indagine più ricorrente è quella dei pozzi per acqua dove, come noto, l'accuratezza stratigrafica non è sempre soddisfacente.

La stessa profondità del bedrock sismico non è certo priva di incertezze, ma il confronto con gli studi più recenti svolti per il territorio regionale ha consentito di restringere il campo di variazione del valore intorno a 150 m.

8 METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI

Come già detto nel capitolo introduttivo di questa relazione, il Comune di Nonantola possiede già uno studio di microzonazione sismica con III livello di approfondimento redatto sulla base delle indicazioni contenute in DGR 1032/2012, DAL 112/2007 e "I.C.M.S." del Dipartimento della Protezione Civile e Conferenza delle Regioni e P.A. (Gruppo di lavoro MS, 2008). Ai fini dell'approvazione, il PUG di Nonantola deve dotarsi di uno studio di Microzonazione sismica aggiornato alle più recenti delibere regionali (DGR 476/2021 e DGR 564/2021). Pertanto, questo studio, oltre ad adeguare le analisi, i risultati e la loro rappresentazione alle nuove delibere, ha ampliato il database delle indagini geognostiche consentendo di raggiungere un dettaglio di analisi superiore rispetto al precedente studio.

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

- Nr. 13 analisi di risposta sismica locale monodimensionali, distribuite in modo omogeneo all'interno delle aree indagate;
- Calcolo dell'Indice di Potenziale Liquefazione (IPL) in corrispondenza di tutte le verticali penetrometriche (CPT e CPTU);
- Calcolo dei cedimenti post-sismici in corrispondenza di tutte le verticali penetrometriche (CPT e CPTU).

Nel presente capitolo verranno, pertanto, presentati le metodologie ed i risultati delle analisi di microzonazione sismica di III livello eseguite per le aree indagate del territorio comunale, i cui dati di ingresso sono stati già ampiamente descritti nei capitoli precedenti, derivati da: indagini pregresse contenute nel precedente studio di MZS-2014 e da nuove indagini penetrometriche post-2014 recuperate presso l'Ufficio Tecnico comunale per questo aggiornamento.

8.1 Analisi di risposta sismica locale

Nonostante la precedente MZS-2014 avesse già effettuato 28 analisi di risposta sismica locale andando a coprire in modo omogeneo l'intero territorio comunale, l'aggiornamento del set di accelerogrammi da utilizzare nelle analisi introdotto già con la DGR 630/2019 ha imposto la nuova esecuzione delle analisi, in questo aggiornamento circoscritte alle sole zone del territorio urbanizzato.

I 13 punti (Figura 35) sono stati individuati in base ad un preciso criterio: la disponibilità di un sondaggio penetrometrico (preferibilmente CPTU) ad almeno 20/30 m di profondità, prossimo ad una coppia MASW (o Re.Mi.) e 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 20/30 m. Per ricostruire la stratigrafia più profonda, dalla profondità raggiunta dalla penetrometrica fino alla profondità del bedrock sismico, sono state prese come riferimento le stratigrafie di sondaggi a carotaggio continuo e di pozzi per acqua presenti all'interno del territorio comunale col criterio di maggior prossimità.

L'estrapolazione dei valori di V_s da misure (MASW/Re.Mi.)/HVSR a profondità superiori ai metri più superficiali indagati dalle indagini geofisiche è stata effettuata tramite la relazione speditiva messa a punto da Albarello et al. (2011)⁸ e ripresa da Mascandola et al. (2019):

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

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 geofisica disponibile. Ciò permette di estrapolare i valori di V_s ben oltre la profondità raggiunta dall'indagine geofisica, fino a raggiungere, eventualmente, il valore di 800 m/s (Figura 36).

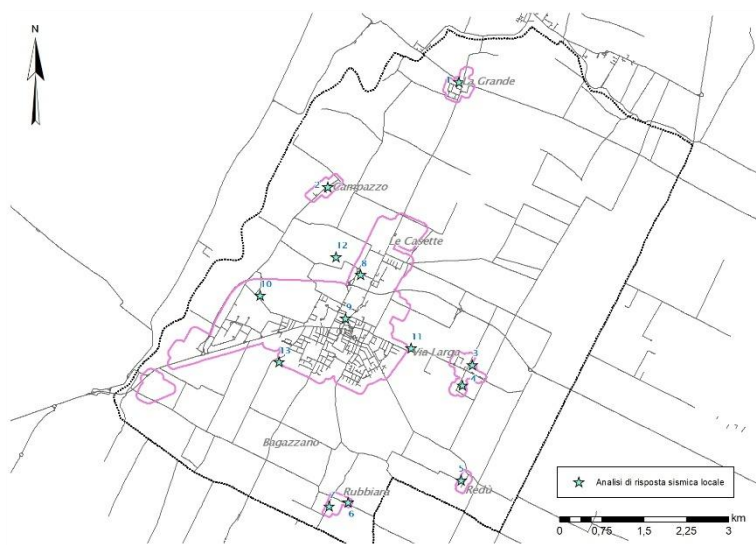


Figura 35 - Ubicazione dei 13 punti in cui sono state condotte le analisi di risposta sismica locale (RSL) per questo studio.

La disponibilità di misure di rumore ambientale da indagini HVSR, eseguite in prossimità delle MASW/Re.Mi., 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.

⁸ 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 microzonation: an example from the area damaged by the April 6, 2009 L'Aquila (Italy) earthquake. Boll. di Geofis. Teor. e Appl. 52, 513–538.

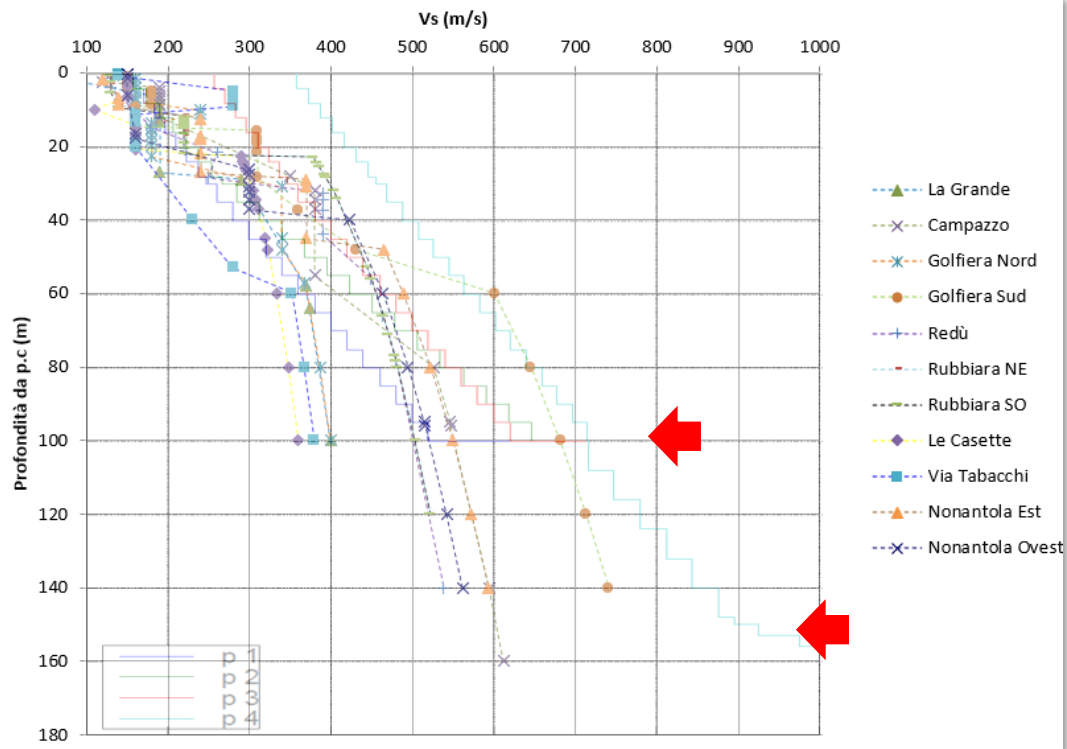


Figura 36 - Confrontato dei profili di Vs estrapolati per ognuno dei 13 luoghi di analisi di risposta sismica locale tramite la relazione (1) (linee con marcatori) e i profili medi utilizzati per il calcolo dei fattori d'amplificazione per l'Ambito "Pianura 2" da Tinto et al. (2015) (linee p1, p2, p3, p4). Le frecce rosse identificano le due interfacce di Figura 33. La profondità massima delle linee estrapolate coincide con la profondità ricavata dalla equazione (2). Dal grafico sono state escluse le due curve estrapolate relative ai siti "Nonantola Artigianale" e "Nonantola Sud" poiché i valori di profondità dell'interfaccia risonante sono risultati *outlier* rispetto ai restanti valori (rispettivamente: 70 m e 240 m).

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 13 luoghi in cui verranno effettuate le analisi di risposta sismica locale.

Numero RSL	Ubicazione	V_0 (m/s)	f_0 (Hz)	x	Profondità stimata del bedrock sismico
1	La Grande	200	0,9	0,15	100 m
2	Campazzo	200	0,75	0,22	160 m
3	Golfiera Nord	200	0,85	0,15	100 m
4	Golfiera Sud	215	1,0	0,25	140 m
5	Redù	200	0,75	0,2	150 m
6	Rubbiara NE	200	0,9	0,2	120 m
7	Rubbiara SO	200	0,9	0,2	120 m
8	Le Casette	180	0,8	0,15	100 m
9	Via Tabacchi	190	0,8	0,15	100 m
10	Nonantola Artigianale	160	0,9	0,15	70 m
11	Nonantola Est	190	0,9	0,23	130 m
12	Nonantola Ovest	180	0,8	0,23	140 m
13	Nonantola Sud	200	0,6	0,24	240 m

Tabella 1 - Identificazione della profondità delle principali interfacce risonanti nei luoghi selezionati per effettuare le analisi di risposta sismica locale per questo studio. V_0 : velocità ponderata delle onde S nei metri superficiali indagati da MASW/Re.Mi.; f_0 : frequenza di vibrazione fondamentale del terreno da misure HVSr; x: parametro selezionato per la relazione di Albarello et al. (2011). Le celle a sfondo azzurro identificano i punti in cui è stata individuata la superficie risonante più superficiale di Figura 33; le celle a sfondo verde identificano i punti in cui è stata individuata la superficie risonante più profonda di Figura 33, coincidente con il bedrock sismico.

Come si vede da Tabella 1 e da Figura 36, l'estrapolazione in profondità dei profili di Vs evidenziano entrambe le superfici risonanti di Tento et al. (2015) individuate per l'Ambito "Pianura 2". Quelle che si spingono fino a circa 150 m di profondità individuano probabilmente il bedrock sismico. Ancorando pertanto a 150 ± 20 m il set di accelerogrammi fornito da EUCENTRE per l'area di Nonantola, le analisi di risposta sismica locale di seguito descritte potranno tener conto anche della presenza dell'interfaccia più superficiale.

L'analisi di risposta sismica locale monodimensionale, lineare equivalente, nel dominio delle frequenze, è stata condotta, per i 13 siti sopra esposti, utilizzando il codice di calcolo "STRATA"⁹, 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 adattano 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 ecc.) 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 regione grazie alla selezione operata da EUCENTRE per l'intero territorio regionale¹⁰, con tempo di ritorno pari a 475 anni.

Le analisi di risposta sismica locale 1D hanno permesso di ricavare, per ognuna delle 13 aree:

- i profili di accelerazione dell'input sismico dal bedrock sismico alla superficie;
- i profili di massima deformazione dal bedrock sismico alla superficie;

⁹ 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.

¹⁰ <https://rer.eucentre.it/mainpage.jsp>

- i profili di CSR 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 dalle DGR 476/2021 e 564/2021.

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

- 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 si ricava agevolmente per lo spessore indagato dalle prove penetrometriche statiche tramite relazioni empiriche di letteratura che legano il peso di volume alle resistenze alla punta e laterale del penetrometro (ex. Robertson & Cabal, 2010¹¹). Per profondità maggiori, non indagate dalle CPT/CPTU, il valore del peso di volume è stato estrapolato con linea di tendenza lineare, crescente con la profondità.

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 i primi 10 m dal piano campagna sono state utilizzate le curve di decadimento per argille ottenute da analisi di laboratorio dinamico su un campione estratto al confine SO di Nonantola a 6,6 m di profondità e presenti nel database della pubblicazione a cura di Ciancimino et al. (2022)¹².

Per ogni sito d'indagine, la stratigrafia dei primi 20/30 m dal p.d.c. è stata ricavata dall'analisi delle indagini penetrometriche (CPT/CPTU). Oltre la profondità raggiunta dalle indagini penetrometriche, la stratigrafia è stata assunta identica a quella dei sondaggi a carotaggio continuo più prossimi, integrate fino alla profondità del bedrock sismico, da quelle dei pozzi per acqua.

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 Vs entro un intervallo di variazione che è minimo nei metri superficiali indagati dalle prove MASW/Re.Mi. 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 intorno a 150 m, con un ± 20 m di scarto.

I risultati, in termini di fattori di amplificazione, si riportano a seguire (Figura 37) per la sola PGA, rimandando alle cartografie specifiche per tutti gli altri fattori d'amplificazione richiesti dalle DGR 476/2021 e 564/2021. Come si vede in Figura 37, non vi sono grandi scostamenti nei valori dei fattori di amplificazione per la PGA, tutti ricadenti all'interno della classe 1.3-1.4 degli Standard di rappresentazione. Questo era in parte prevedibile considerando l'omogeneità litostratigrafica del territorio comunale e una altrettanto omogenea distribuzione della profondità del bedrock sismico e dell'interfaccia risonante superficiale (Figura 36).

¹¹ Robertson P.K. & Cabal K.L. (2010) – Estimating soil unit weight from CPT. 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach, CA, USA, May 2010

¹² Ciancimino, A., Cosentini, R.M., Foti, S., Lanzo, G., Pagliaroli, A., Pallara, O., 2023. The PoliTO–UniRoma1 database of cyclic and dynamic laboratory tests: assessment of empirical predictive models. Bull Earthquake Eng 21, 2569–2601. <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01573-y>

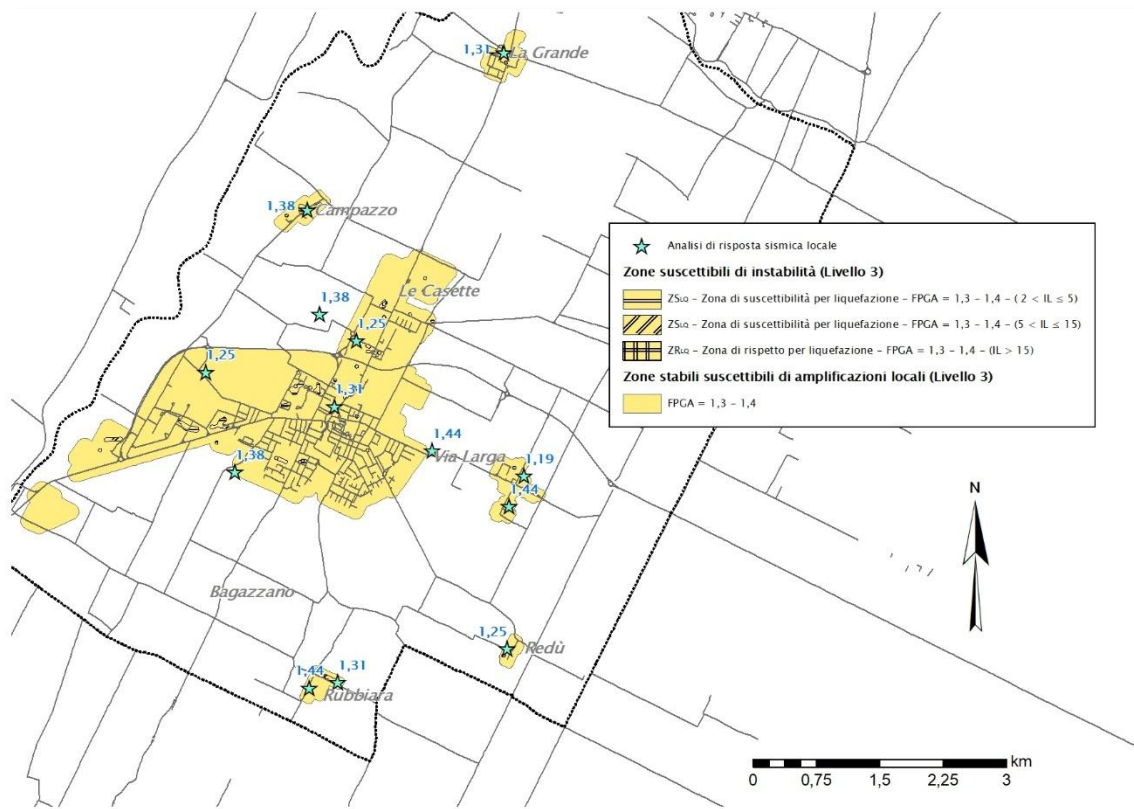
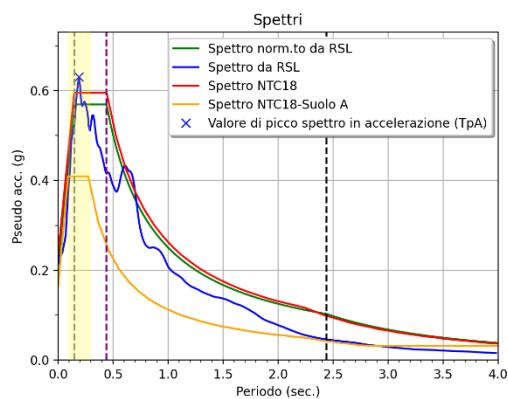
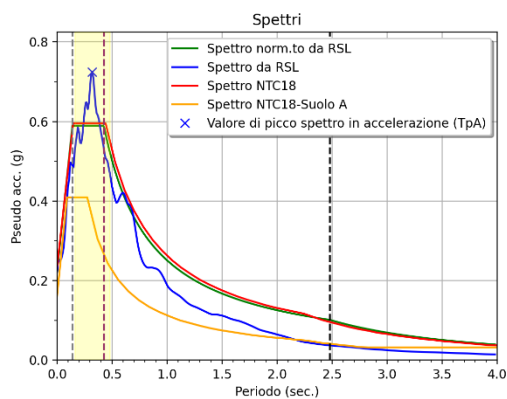


Figura 37 - Carta dei fattori d'amplificazione della PGA elaborata a valle delle risposte sismiche locali effettuate nei 13 siti d'indagine. La scelta cromatica segue le indicazioni degli Standard di rappresentazione degli elaborati di MZS nazionali.

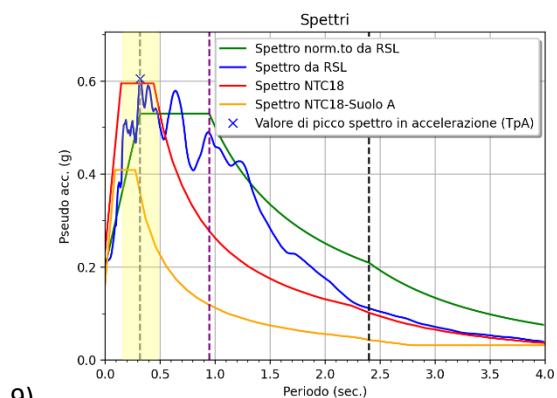
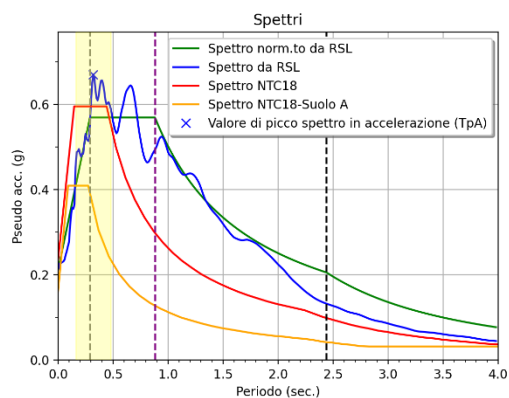
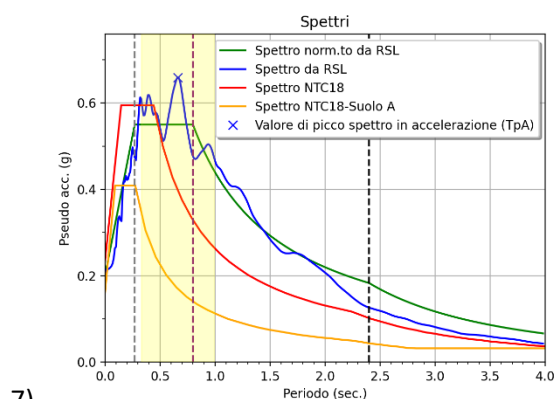
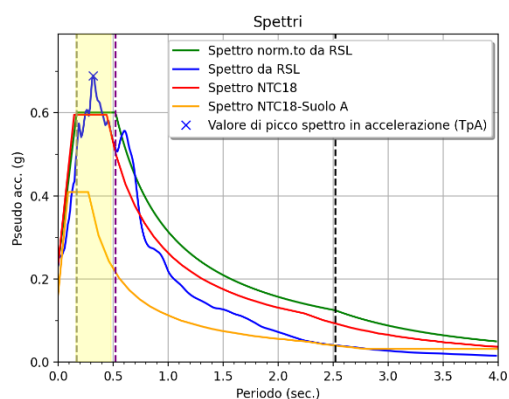
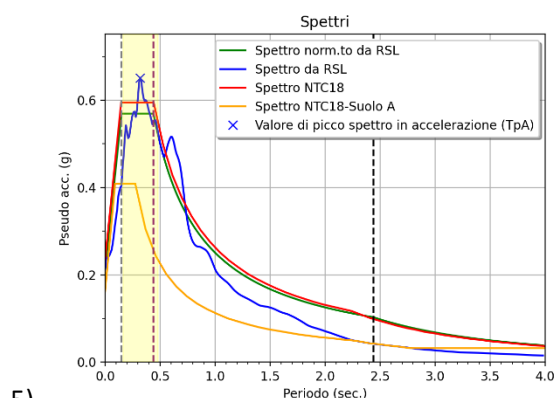
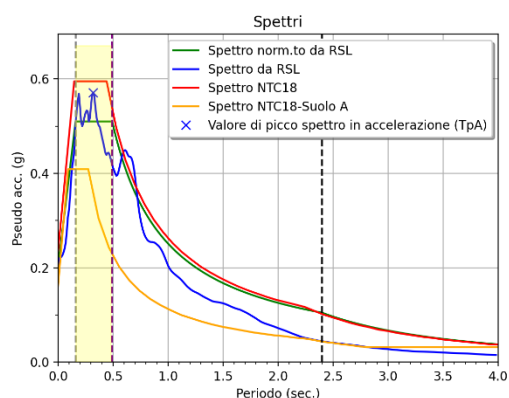
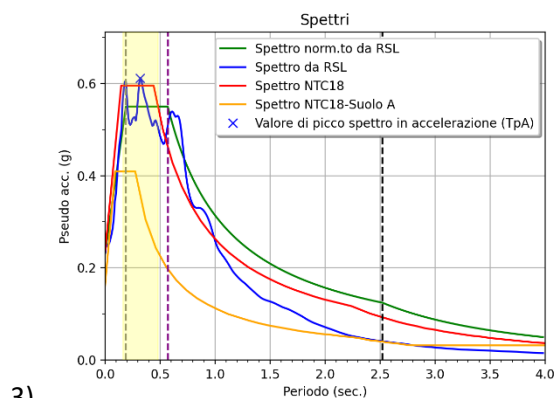
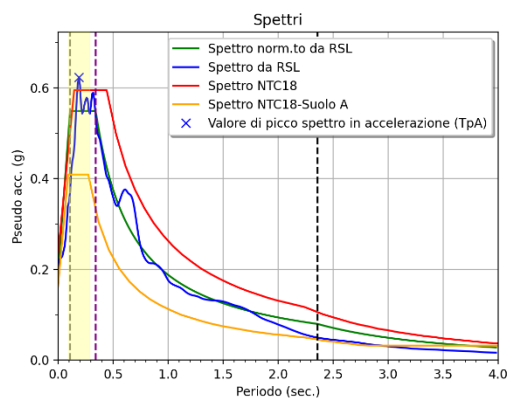
Se, infine, si mettono a confronto i risultati delle analisi di risposta sismica locale - in termini di spettri di risposta normalizzati - con gli spettri semplificati di Normativa per pari classe di suolo (Figura 38), si vede come spesso le curve non si discostino in maniera sensibile tra loro. In 5 casi gli spettri sono simili, con plateau ad accelerazione costante molto vicini sia in altezza che in ampiezza (Figura 38-1, 2, 6, 7, 11). Nei restanti casi il plateau da RSL tende ad essere più basso di quello di Normativa: tra questi ultimi, 5 mostrano un plateau molto più ampio di quello di Normativa (spettri nrr. 8, 9, 10, 12, 13), con le massime accelerazioni spettrali che vanno ad interessare quindi edifici più alti.

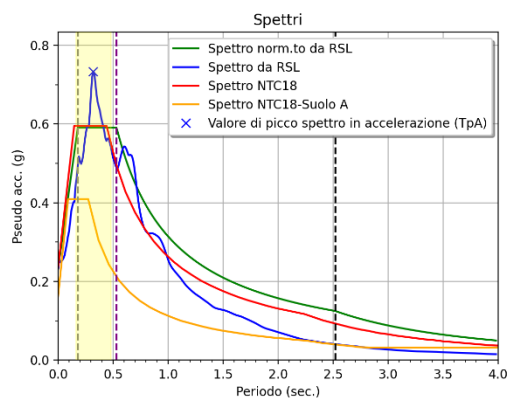


1)

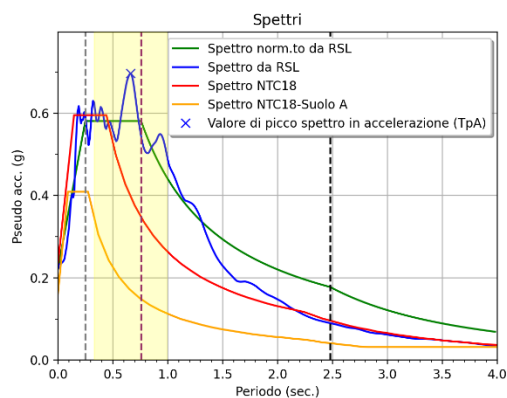


2)

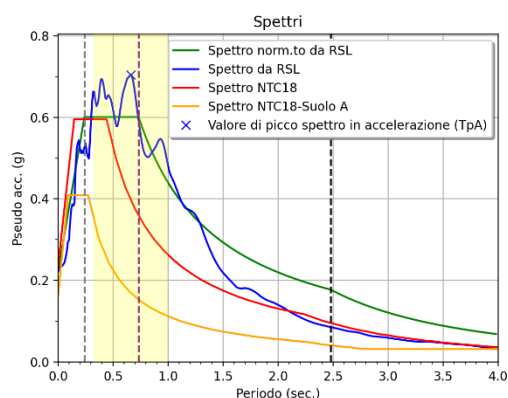




11)



12)



13)

Figura 38 - Spettri di risposta in superficie da analisi di risposta sismica locale (blu: spettro medio; verde: normalizzato) per ognuno dei 13 siti esaminati. Per confronto: spettri di risposta da metodo semplificato NTC18 su suolo A e su suolo specifico (C).



Figura 39 – Distribuzione sul territorio indagato dei risultati delle 13 RSL in termini di forma dello spettro in accelerazione ricavato, confrontato con quello di Normativa per suolo C.

Gli spettri di RSL a plateau più ampio rispetto a quello di Normativa risultano accomunati (diversamente dagli altri) da un consistente contrasto di impedenza già nei primi 20 m superficiali e, se si esamina Figura 39, si vede come questi ricadano quasi esclusivamente nel settore centro-occidentale del Capoluogo.

8.2 Analisi della suscettività alla liquefazione

Il calcolo dell'Indice di Potenziale Liquefazione (IPL) è stato eseguito in corrispondenza di ogni verticale CPT/CPTU disponibile nel database implementato per questo studio, considerando una profondità della falda media, su tutto il territorio, pari a -2 m dal piano campagna, ovvero pari alla media di tutte le misurazioni di falda effettuate in corrispondenza di tutti i sondaggi penetrometrici acquisiti.

L'analisi è stata effettuata tramite l'approccio di calcolo di Boulanger & Idriss (2014): per quanto riguarda le sole CPTU all'interno del codice di calcolo "CLiq2" della Geologismiki®; per quanto riguarda le CPT utilizzando un algoritmo di calcolo creato dallo scrivente in linguaggio Python, che utilizza le formule degli stessi Boulanger & Idriss (2014), ma sostituendo il valore di "qt" con quello di "qc" (in sostanza eliminando il valore della pressione neutra, ovviamente non misurata nelle CPT). Non è comunque tanto il valore della resistenza alla punta ad influire sull'IPL finale, quanto la stima della resistenza laterale (Facciorusso et al., 2016)¹³, più soggetta ad errori quando ricavata da CPT.

Il valore di magnitudo momento di ingresso è stato scelto pari a quello della zona sismogenetica **ZS9 nr. 912**, ovvero **6,14**, mentre i valori di accelerazione di picco al suolo, il profilo di CSR e il profilo di deformazione massima sono stati ricavati dalle singole analisi di risposta sismica locale.

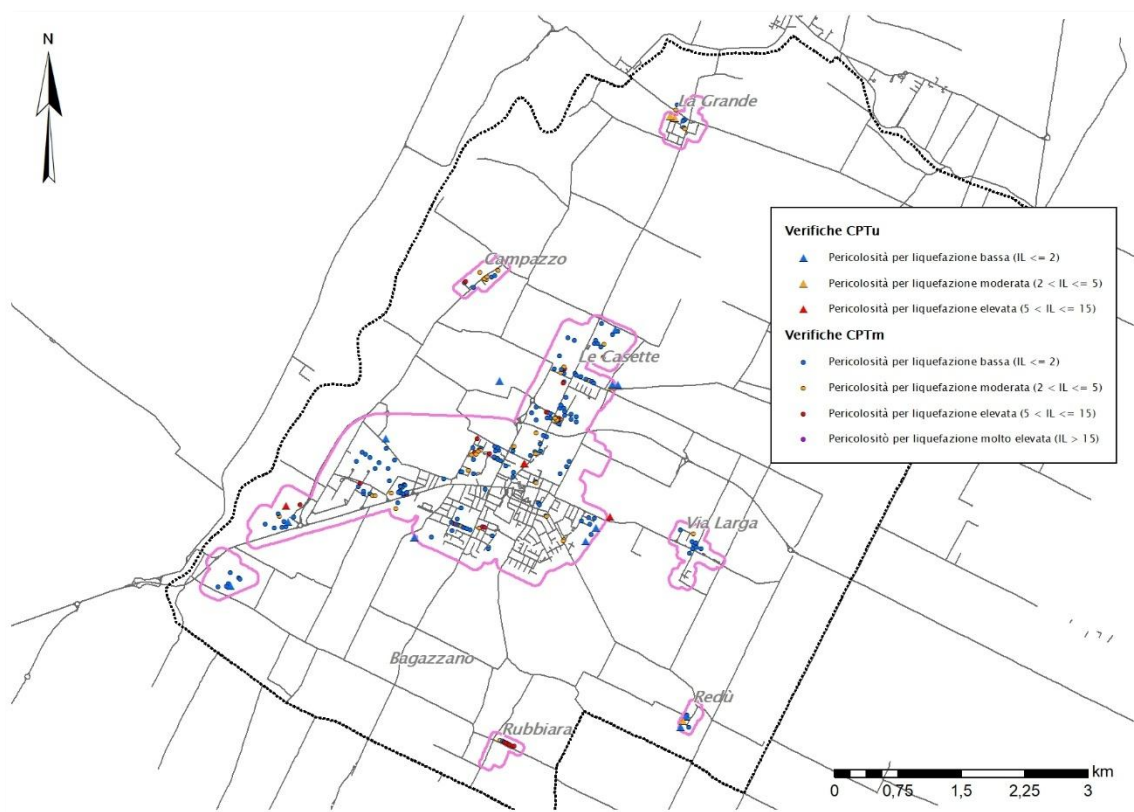


Figura 40 - Classificazione dei valori di IPL calcolati per questo studio in corrispondenza di 222 CPT/CPTU, in base alla suddivisione proposta da Sonmez (2003).

Il risultato dei calcoli eseguiti sulle 195 CPT/CPTU è visibile in Figura 40. Le verifiche a liquefazione sono contenute nella cartella "Plot\MS", nel file PDF denominato "Verifiche_Liquefazione", in cui ad ogni verifica è associato il codice identificativo del database "SoftMS", che permette di collocarla precisamente nello spazio.

¹³ 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.

L'unico valore di IL caratteristico di una pericolosità molto elevata è stato identificato nel Capoluogo, ad est del Parco di Villa Emma (via Gaetano Donizzetti, nella sua rientranza verso nord) ed è da considerare come valore anomalo rispetto all'intero contesto comunale esaminato, dove:

- 163 valori rientrano nella classe a pericolosità bassa,
- 42 valori rientrano nella classe a pericolosità moderata e
- 16 valori rientrano nella classe a pericolosità elevata.

Se quindi si esclude l'unico valore anomalo, le aree con pericolosità maggiore ($5 < IPL \leq 15$) sono:

- La frazione di Rubbiara,
- Diverse aree di limitata estensione sparse per il Capoluogo

Tutte le restanti sono a pericolosità inferiore ($2 < IPL \leq 5$), anch'esse distribuite in diverse aree di limitata estensione, in particolare nella frazione di Campazzo.

8.2.1 Calcolo dei cedimenti post-sismici

Il calcolo dei cedimenti post-sismici nel terreno indagato dalle 222 CPT/CPTU 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), 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 $\gamma_{\max}$ è la deformazione di taglio massima in semplice ampiezza indotta dal terremoto, ricavata da analisi di risposta sismica locale, integrando il risultato nello spessore d'interesse:

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

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 ottenuta dalle analisi di risposta sismica locale:

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

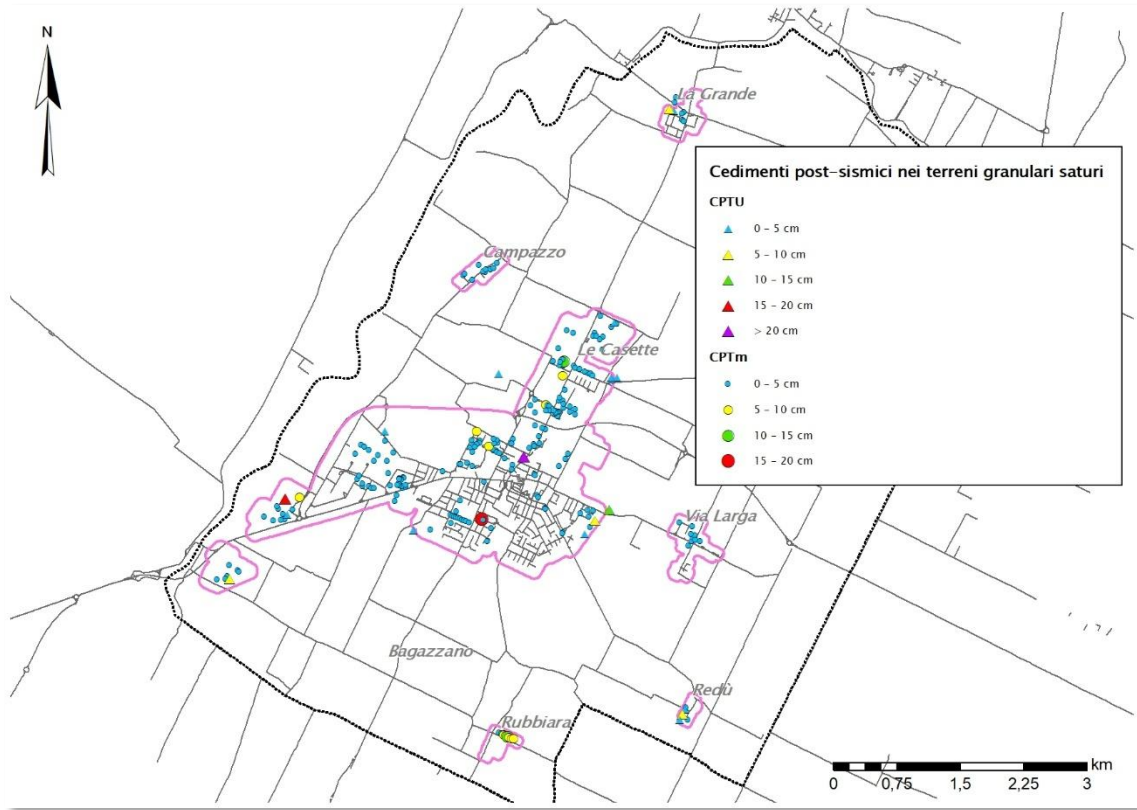


Figura 41 - Distribuzione dei cedimenti post-sismici calcolati in corrispondenza delle 222 CPT/CPTU utilizzate per questo studio. I valori numerici si riferiscono ai soli cedimenti post-simici nei livelli incoerenti saturi ed insaturi, poiché i livelli coerenti soffici non hanno evidenziato alcun cedimento.

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

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

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

Il calcolo dei cedimenti nei terreni coerenti, poco consistenti è stato effettuato tramite il metodo proposto da Robertson (2009)¹⁴. Il metodo 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.

¹⁴ 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.

Nel caso dei cedimenti nei livelli coerenti poco consistenti, i risultati conseguiti per questo studio hanno dimostrato valori sempre prossimi allo zero.

Come si vede in Figura 41, in gran parte del territorio esplorato l'entità dei cedimenti post-sismici rientra nella classe più bassa: 0-5 cm. Le classi 5-10 cm e 10-15 cm trovano luoghi di maggior addensamento a Rubbiara e nella recente urbanizzazione a nord di via Giorgina. Un solo punto ricade in classe 15-20 cm e corrisponde con la penetrometria che ha restituito il valore "anomalo" di IL (ad est di Villa Emma). Un solo punto ricade nella classe 20-23 cm ed è prossimo al lato occidentale di Via Tabacchi, in prossimità dell'angolo con via S. Lorenzo.

9 ELABORATI CARTOGRAFICI

Gli elaborati sono stati sviluppati prendendo a riferimento il “Limite delle aree indagate” che comprende al proprio interno il Territorio Urbanizzato (perimetrato ai sensi della L.R. 24/2017 e quindi corrispondente al perimetro del TU al 31.12.2018) e i “*territori contermini al territorio urbanizzato, che non presentano fattori preclusivi o fortemente limitanti alle trasformazioni urbane*”, questi ultimi individuati attraverso la creazione di un buffer di ampiezza 50-100 m (con variazioni locali) intorno ai perimetri del TU.

9.1 Elaborati cartografici di I LIVELLO

Di seguito vengono descritti brevemente i contenuti delle cartografie di I livello di approfondimento della microzonazione sismica di Nonantola, per la quale sono stati prodotti i seguenti elaborati:

- **Carta geologico-tecnica:** vi vengono rappresentati gli elementi geologici e morfologici che possono modificare il moto sismico in superficie; in particolare sono distinte le aree caratterizzate da un'omogenea litologia di superficie (primi 5 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.
- **Carta delle indagini:** in tale cartografia sono riportate le ubicazioni delle indagini (geognostiche e geofisiche) pregresse (da MZS-2014), integrate dalle post-2014 raccolte per il presente aggiornamento; tutte le prove vengono classificate in base alla tipologia.
- **Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs):** in cui sono ubicati tutti i punti di misura di Vs con indicazione, per ogni punto misura, del valore di Vs₃₀; la cartografia rimane pressoché identica a quella della MZS-2014, al netto di alcune MASW presenti nei più recenti piani particolareggiati.
- **Carta delle frequenze naturali dei terreni:** riporta i punti di misura e i risultati di indagini di sismica passiva (misure HVSR); in particolare, sono stati indicati il valore f₀ del picco significativo, corrispondente alla frequenza di risonanza fondamentale (frequenza principale). Sono stati presi in considerazione solo i picchi ricadenti nell'intervallo di frequenza 0,1÷20Hz. La cartografia rimane pressoché identica a quella della MZS-2014, al netto di alcune HVSR presenti nei più recenti piani particolareggiati.
- **Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS):** sono indicate le aree in cui si ritiene necessario effettuare indagini e analisi di microzonazione sismica e i livelli di approfondimento ritenuti necessari, distinguendo tra zone suscettibili di instabilità e zone stabili, suscettibili di amplificazioni locali, all'interno delle quali sono state operate ulteriori distinzioni, identificando delle microzone omogenee, sulla base delle caratteristiche litostratigrafiche; su indicazione del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della RER, la zonizzazione in particolare delle aree suscettibili di instabilità è stata effettuata seguendo la metodologia proposta da Colombi et al. (2014). Dopo un costruttivo confronto con la Provincia di Modena e il Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della RER, si è concordato di limitare l'estensione delle MOPS alle sole aree indagate. Diversamente, sia la precedente MZS-2014 che il PTCP della Provincia di Modena avevano esteso le MOPS all'intero territorio comunale, pur mancando di un sufficiente numero di indagini geognostiche cui ancorare le rispettive interpretazioni. I differenti approcci metodologici dei due strumenti esistenti rispetto a quello adottato per questo approfondimento non hanno consentito di realizzare una perfetta “fusione” tra le rispettive MOPS: da qui la scelta condivisa di cui sopra.

Le cartografie sono state realizzate alla scala 1:10.000, coprendo la sola porzione di territorio comunale interessata dal territorio urbanizzato.

9.1.1 Carta geologico-tecnica

Nella **Carta geologico-tecnica** sono state riportate le informazioni di base (geologia, geomorfologia, caratteristiche litotecniche, geotecniche e idrogeologiche) derivate da elaborati esistenti e da indagini geognostiche pregresse (Figura 42).

Non essendo intercorse modifiche relative alla litologia di superficie e ad altri elementi geomorfologici e idrogeologici, la Carta geologico tecnica sostanzialmente ricalca quella redatta nella MZS-2014,

aggiornandone la classificazione delle categorie litologiche in base agli Standard di microzonazione sismica nazionali più recenti (versione 4.2, 2020).

Nelle Carta geologico tecnica sono rappresentate le caratteristiche litologiche dei terreni presenti nei primi 5 metri di profondità dal p.c., classificati sulla base della tessitura prevalente; in particolare sono state distinte, sulla base delle caratteristiche tessiturali, le seguenti unità di terreni di copertura:

- **SM** – Sabbie limose, miscela di sabbia e limo;
- **ML** – Limi inorganici, farina di roccia, sabbie fini limose o argillose, limi argillosi di bassa plasticità;
- **CL** – Argille inorganiche di medio-bassa plasticità, argille ghiaiose o sabbiose, argille limose, argille magre;
- **CH** – Argille inorganiche di alta plasticità, argille grasse

Sono stati altresì indicati gli ambienti genetico - deposizionali dei terreni di copertura secondo le seguenti classi:

- pi - piana inondabile;
- es – argine/barre/canali.

Infine nella Carta geologico-tecnica sono stati indicati i pozzi e i sondaggi profondi (che in alcuni casi intercettano il substrato geologico), indicandone la profondità raggiunta e sono stati riportati i valori di soggiacenza della falda freatica, necessari alla definizione delle zone potenzialmente instabili per fenomeni liquefazione.

Dalla **Carta geologico tecnica**, riportata nella figura seguente su base semplificata, si evidenzia come le litologie di copertura prevalenti sul territorio comunale siano le argille, con le sabbie che si concentrano essenzialmente lungo il dosso attuale del Fiume Panaro e lungo il dosso di Ravarino, ma anche lungo dossi minori, tra cui quello che attraversa il Capoluogo lungo via Mavora-via di Mezzo.

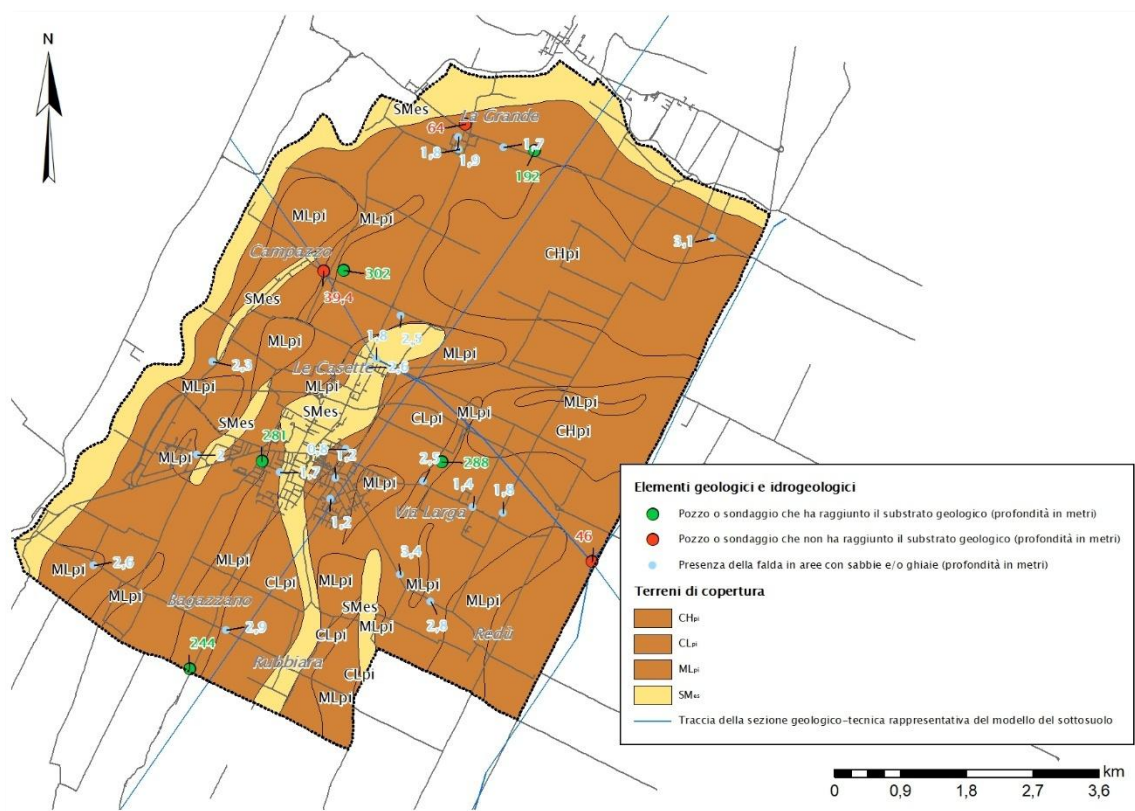


Figura 42 - Carta Geologico-Tecnica su base semplificata.

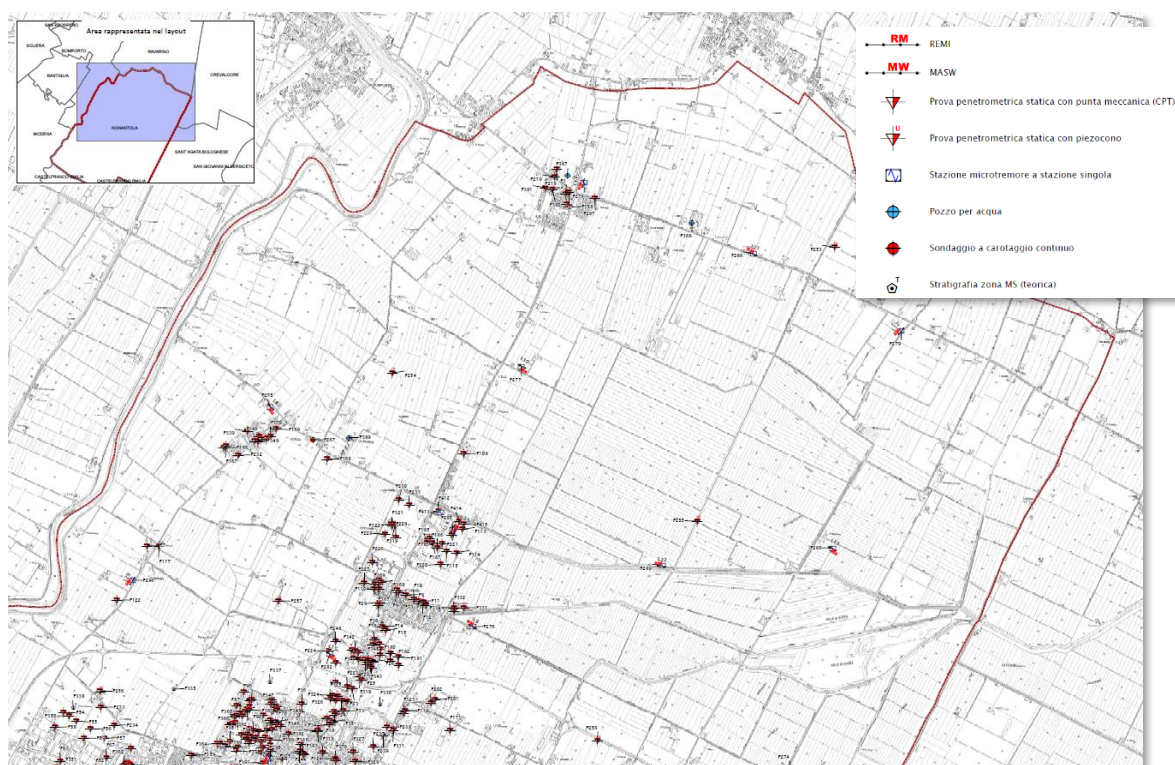
9.1.2 Carta delle indagini

Nella Carta delle indagini sono state riportate le ubicazioni delle prove penetrometriche d'archivio post-2014 (117 prove, raccolte per il presente aggiornamento) e di quelle geognostiche e geofisiche pregresse, contenute nella precedente MZS-2014.

Le indagini sono state distinte in base alla tipologia in:

- sondaggio a carotaggio continuo
- pozzo per acqua
- prova penetrometrica statica con punta meccanica (CPT)
- prova penetrometrica statica con piezocono (CPTU)
- Re.Mi. e MASW
- stazione microtremore a stazione singola (HVSr)

Nella figura seguente si riporta un estratto della Carta delle Indagini; per tutte le indagini è stato indicato il codice identificativo bi-univoco con la banca-dati associata.



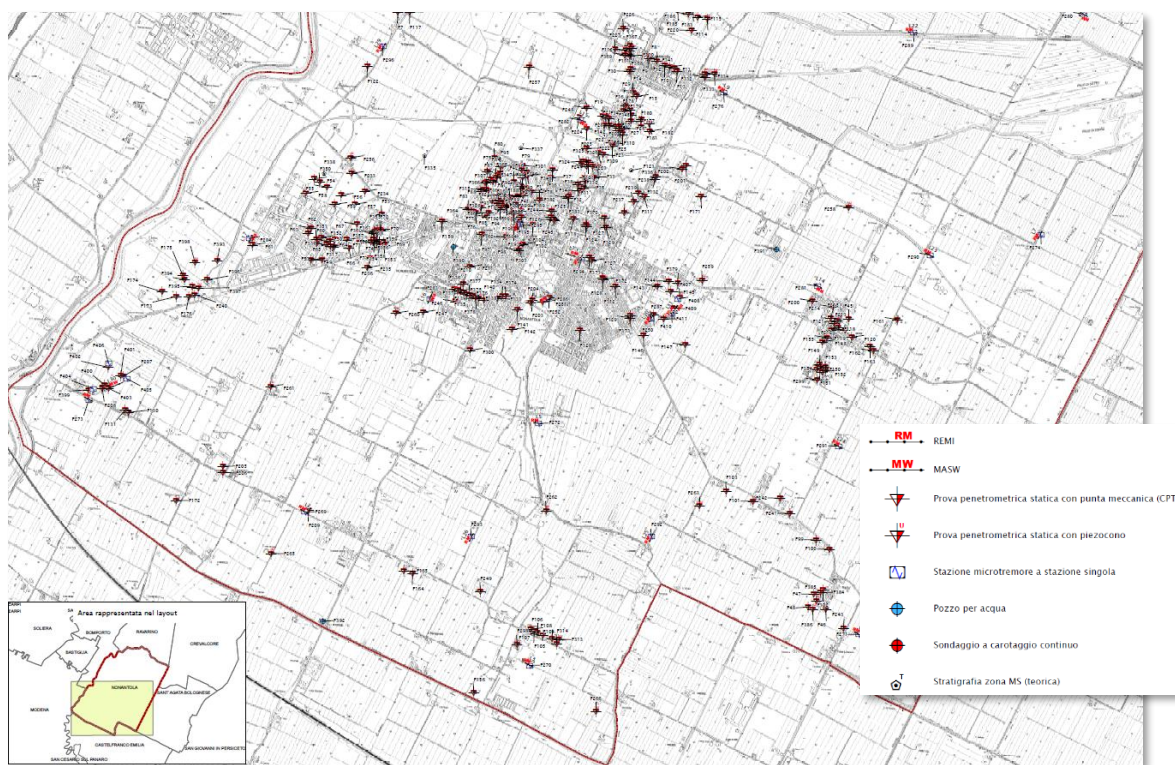


Figura 43 – Estratti della carta delle indagini (sopra: settore settentrionale; sotto: settore meridionale).

Come si vede in Figura 43, le frazioni risultano ben coperte da indagini, mentre il Capoluogo vede addensarsi le indagini nei settori settentrionale ed occidentale, lasciando alquanto scoperto il settore meridionale.

9.1.3 Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs)

La Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs) mostra la distribuzione spaziale di tutti i valori di V_{S30} ricavati dalle indagini d'archivio presenti sul territorio comunale; i punti di misura sono rappresentati prevalentemente da indagini Re.Mi. e in numero largamente inferiore da indagini MASW. Nella carta, a ciascun punto d'indagine è associato il corrispondente valore di V_{S30} (in m/s), dove:

$$V_{S30} = \frac{30}{\sum \frac{h_i}{V_{S_i}}}$$

h_i = spessore (in metri) dello strato i-esimo (fino alla profondità di 30 m);
 V_{S_i} = velocità (in m/s) dello strato i-esimo (fino alla profondità di 30 m).

Per la stesura di questa carta, non essendo state eseguite nuove indagini specifiche, sono state utilizzate le indagini già presenti nella MZS-2014 a cui si sono aggiunte alcune HVSr e MASW pertinenti ai più recenti Piani Particolareggiati. E' possibile osservare come i valori di V_{S30} risultino compresi nel range 170-250 m/s e siano uniformemente distribuiti sull'intero territorio comunale.

Nella figura seguente si riportano gli estratti della cartografia.

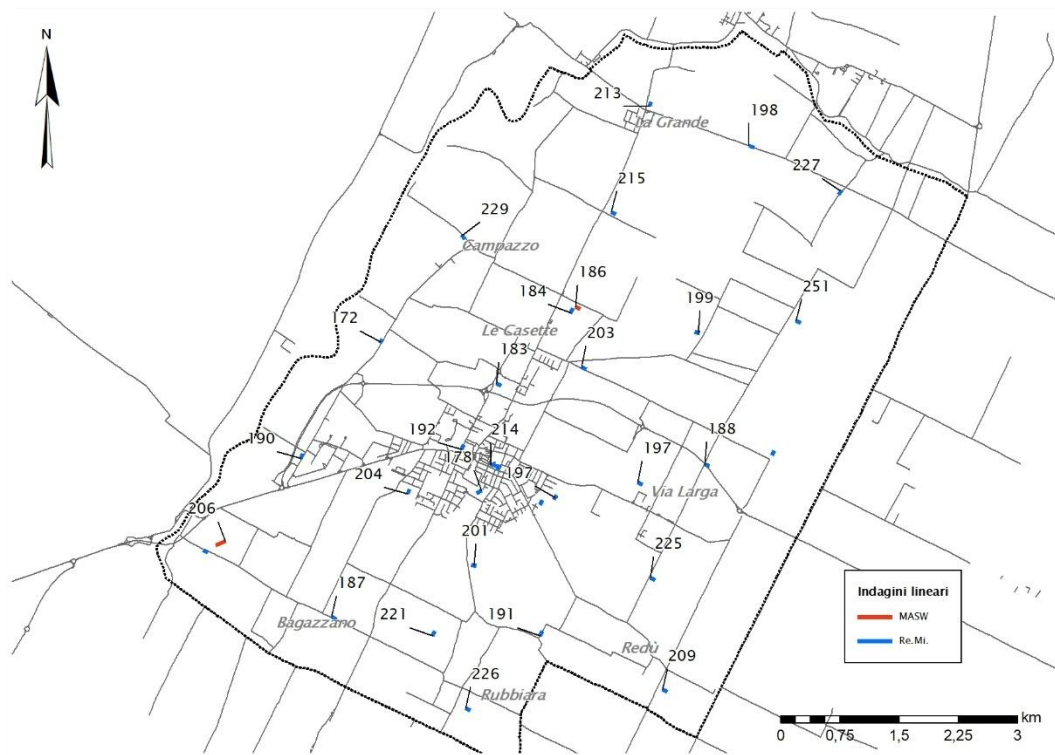


Figura 44 – Carta delle velocità delle onde di taglio S (Vs) su base semplificata.

9.1.4 Carta delle frequenze naturali dei terreni

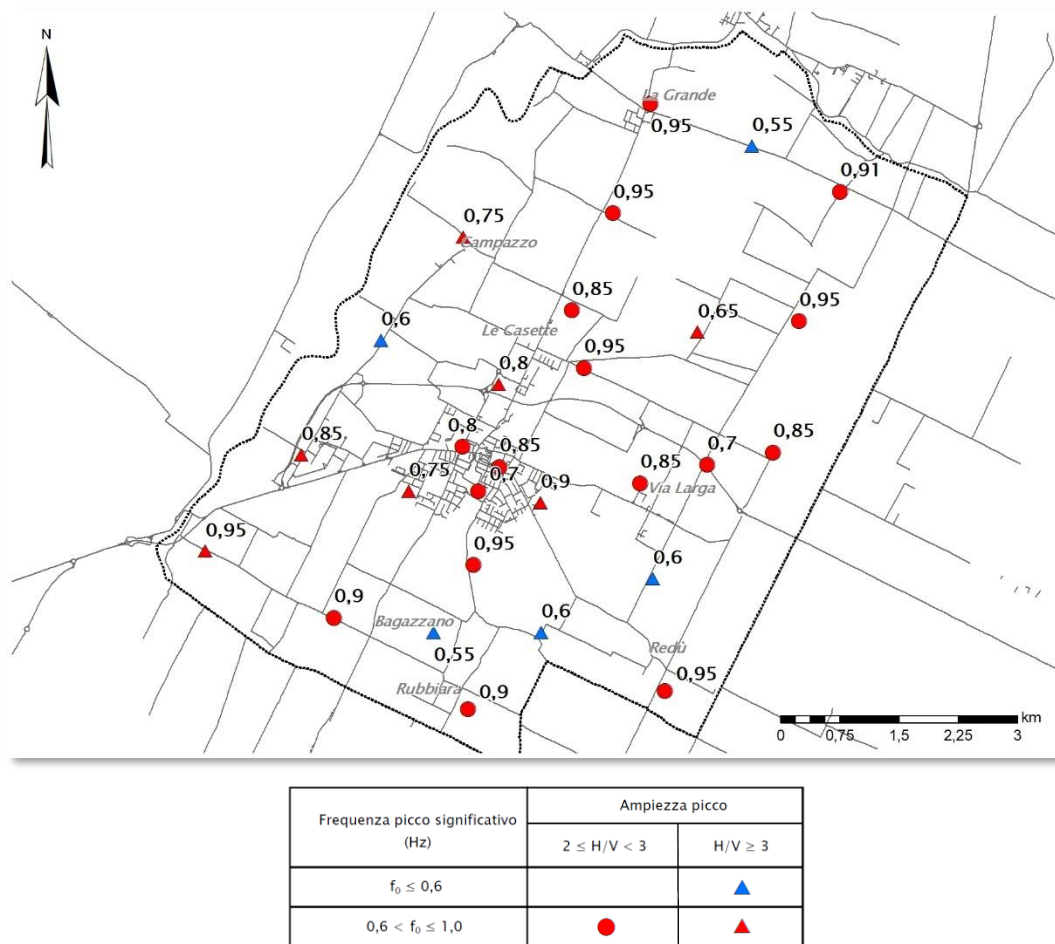
Nella **Carta delle frequenze naturali dei terreni** sono stati riportati tutti i punti di misura (35 complessivamente) derivanti dalle indagini della MZS-2014 e post-2014, con associati i risultati delle singole prove. In particolare sono stati indicati il valore f_0 del picco significativo, corrispondente alla frequenza di risonanza fondamentale (frequenza principale); sono stati inoltre tralasciati i picchi con frequenze superiori ai 20 Hz, in quanto di scarso significato ai fini della MZS. Per rendere graficamente più evidenti le variazioni in relazione alla posizione, sono state utilizzate colorazioni differenti per distinguere le prove a seconda della frequenza principale ottenuta, definendo le seguenti classi:

- $F_0 \leq 0,6$ Hz
- $0,6 \text{ Hz} < F_0 \leq 1$ Hz

Inoltre, sono state utilizzate simbologie diverse a seconda che la prova sia caratterizzata, in corrispondenza della frequenza principale, da un contrasto di impedenza elevato (ampiezza picco $HVSR \geq 3$) o moderato (ampiezza picco $2 \leq HVSR < 3$).

Dalla lettura della Carta delle frequenze naturali dei terreni si osserva come i valori delle frequenze fondamentali di vibrazione del terreno, ricavate dalle HVSR della MZS-2014, siano generalmente compresi tra $0,6 \div 1,0$ Hz, senza sensibili variazioni spaziali, indicativi di spessori di sedimenti di copertura variabili tra 80 e 200 m.

Di seguito si riportano gli estratti della cartografia.



A lato dei simboli sono riportate le frequenze del primo picco significativo

Figura 45 - Carta delle frequenze naturali dei terreni su base semplificata.

9.1.5 Carta delle MOPS

La Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS), rappresenta il documento fondamentale del **primo livello di approfondimento**.

La Carta delle MOPS è stata realizzata all'interno del "Limite aree indagate" utilizzato in questo studio secondo quanto già definito in precedenza e in accordo con Provincia di Modena e Servizio Geologico sismico e dei Suoli della RER.

Nella cartografia il territorio in esame viene distinto a seconda dell'appartenenza a una delle seguenti categorie:

1. Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali. Si tratta di aree in cui sono attese amplificazioni del moto sismico, causate dall'assetto litostratigrafico e/o morfologico locale;
2. Zone di attenzione per instabilità. Si tratta di zone nelle quali effetti sismici attesi e predominanti, oltre i fenomeni di amplificazione, sono riconducibili a deformazioni permanenti del territorio, quali liquefazioni e densificazione.

Di fatto, le MOPS ricalcano la zonizzazione già presentata nel capitolo 6 del modello del sottosuolo (a cui si rimanda per la descrizione dei modelli litostratigrafici relativi):

Zone stabili suscettibili di amplificazioni locali

- **2001 - Zona 1** - Aree in cui sono assenti orizzonti liquefacibili importanti nei primi 15-20 m. Da 20 m alla profondità stimata del bedrock sismico (circa 150 m), sono presenti alternanze, di spessore non definibile con precisione, di argille e sabbie (con argille prevalenti)”.

Zone di attenzione per instabilità

- **30502002 – ZA_{LQ} – Zona di attenzione per liquefazione - Zona 2** - “Aree con alternanze di terreni fini (F = argille e limi) e di terreni più grossolani (G = sabbie e miscele sabbiose) nei primi 20 m, con spessore cumulo $F > G$: i **livelli grossolani compaiono già nei primi 5 m**, a cui ne seguono altri fino a 20 m. Da 20 m alla profondità stimata del bedrock sismico (circa 150 m), sono presenti alternanze, di spessore non definibile con precisione, di argille e sabbie (con argille prevalenti)”.
- **30502003 – ZA_{LQ} – Zona di attenzione per liquefazione - Zona 3** - “Aree con alternanze di terreni fini (F = argille e limi) e di terreni più grossolani (G = sabbie e miscele sabbiose) nei primi 20 m, con spessore cumulo $F > G$: i **livelli grossolani compaiono nei primi 5 m o tra 5-10 m**, a cui ne seguono altri fino a 20 m. Da 20 m alla profondità stimata del bedrock sismico (circa 150 m), sono presenti alternanze, di spessore non definibile con precisione, di argille e sabbie (con argille prevalenti)”.
- **30502004 – ZA_{LQ} – Zona di attenzione per liquefazione - Zona 4** - “Aree con alternanze di terreni fini (F = argille e limi) e di terreni più grossolani (G = sabbie e miscele sabbiose) nei primi 20 m, con spessore cumulo $F > G$: i **livelli grossolani compaiono solo tra 10-20 m**. Da 20 m alla profondità stimata del bedrock sismico (circa 150 m), sono presenti alternanze, di spessore non definibile con precisione, di argille e sabbie (con argille prevalenti)”.

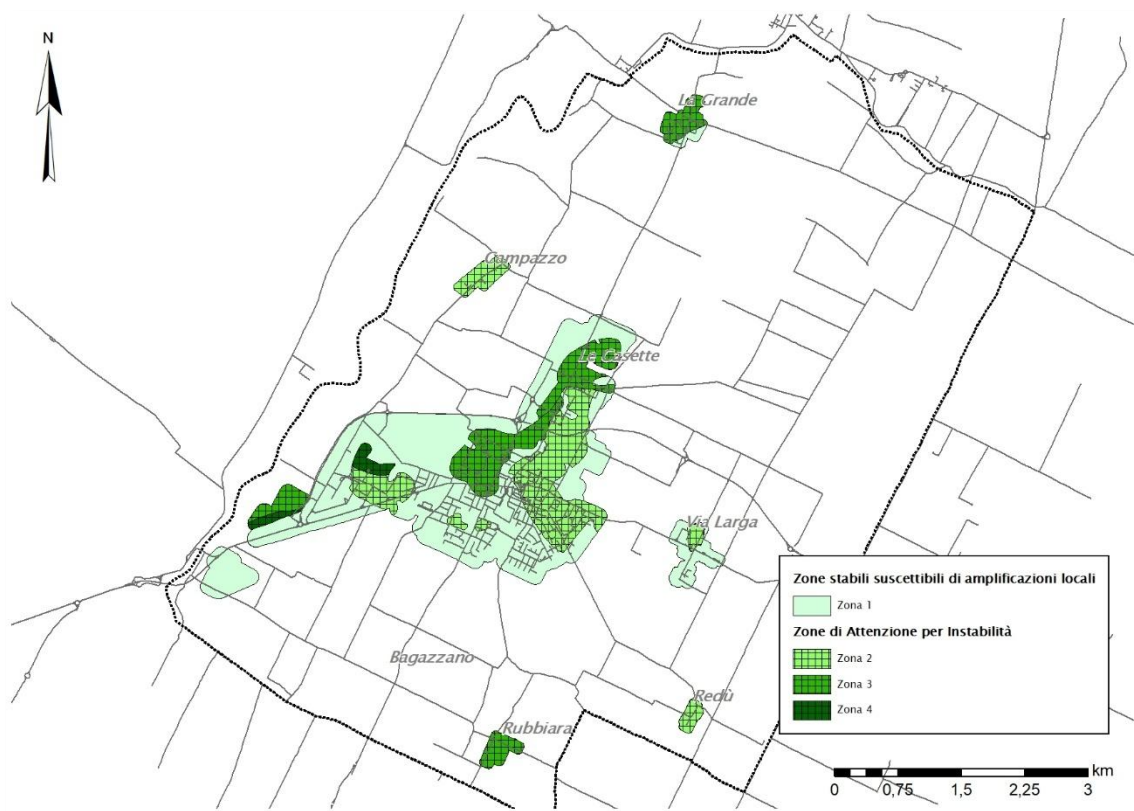


Figura 46 – Carta delle Zone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS) su base semplificata.

9.2 Elaborati cartografici di III LIVELLO

Le cartografie che compongono la microzonazione di III livello sono 12, in base a quanto richiesto dalla DGR 476/2021, integrata con la D.G.R. n. 564/2021, e vengono di seguito elencate; esse riguardano il territorio urbanizzato perimetrato ai sensi della L.R. 24/2017, e le parti del territorio extraurbano, contermini al territorio urbanizzato, che non presentano fattori preclusivi o fortemente limitanti alle trasformazioni urbane.

1. Carta dei fattori di amplificazione della PGA
2. Carta dei fattori di amplificazione dello spettro di risposta in accelerazione nell'intervallo 0,1-0,5 sec.
3. Carta dei fattori di amplificazione dello spettro di risposta in accelerazione nell'intervallo 0,4-0,8 sec.
4. Carta dei fattori di amplificazione dello spettro di risposta in accelerazione nell'intervallo 0,7-1,1 sec.
5. Carta dei fattori di amplificazione dello spettro di risposta in accelerazione nell'intervallo 0,5-1,5 sec.
6. Carta dei fattori di amplificazione dello spettro di risposta in velocità (Intensità di Housner) nell'intervallo 0,1-0,5 sec.
7. Carta dei fattori di amplificazione dello spettro di risposta in velocità (Intensità di Housner) nell'intervallo 0,5-1,0 sec.
8. Carta dei fattori di amplificazione dello spettro di risposta in velocità (Intensità di Housner) nell'intervallo 0,5-1,5 sec.
9. Carta dello scuotimento in accelerazione atteso al sito, in frazione dell'accelerazione di gravità (g), nell'intervallo 0,1-0,5 sec.
10. Carta dello scuotimento in accelerazione atteso al sito, in frazione dell'accelerazione di gravità (g), nell'intervallo 0,4-0,8 sec.
11. Carta dello scuotimento in accelerazione atteso al sito, in frazione dell'accelerazione di gravità (g), nell'intervallo 0,7-1,1 sec.
12. Carta dello scuotimento in accelerazione atteso al sito, in frazione dell'accelerazione di gravità (g), nell'intervallo 0,5-1,5 sec.

Di seguito vengono descritti brevemente i contenuti delle seguenti cartografie:

1. Carta dei fattori di amplificazione della PGA,
2. Carta dell'Intensità di Housner nell'intervallo 0,1-0,5 sec. (SI_1),
3. Carta di amplificazione dell'accelerazione nell'intervallo 0,7 – 1,1 sec. (SA_3)
4. Carta dello scuotimento in accelerazione atteso al sito, in frazione dell'accelerazione di gravità (g), nell'intervallo 0,1-0,5 sec. (H_{SM}).

Carta dei fattori di amplificazione della PGA, riportata in Figura 47: la classe di amplificazione della PGA risulta la medesima per l'intero territorio (1.3 – 1.4), sia nelle zone stabili che instabili.

All'interno del perimetro del capoluogo (ma anche nelle frazioni) le zone instabili sono risultate arealmente piuttosto limitate, a seguito delle verifiche a liquefazione condotte sulle verticali di prove penetrometriche (vedasi capitolo 8.2). Le aree instabili vengono classificate (per tutte le carte di 3 livello) come "Zone di suscettibilità a liquefazione", con indici IPL compresi tra 2 e 5 (retino orizzontale nero), e tra 5 e 15 (retino diagonale nero). Solo in un areale molto limitato, identificato nel Capoluogo ad est del Parco di Villa Emma (via Gaetano Donizzetti, nella sua rientranza verso nord) e relativo ad un'unica verticale penetrometrica, l'IPL è risultato superiore a 15: molto probabilmente un'anomalia stratigrafica di cui non si conosce la causa.

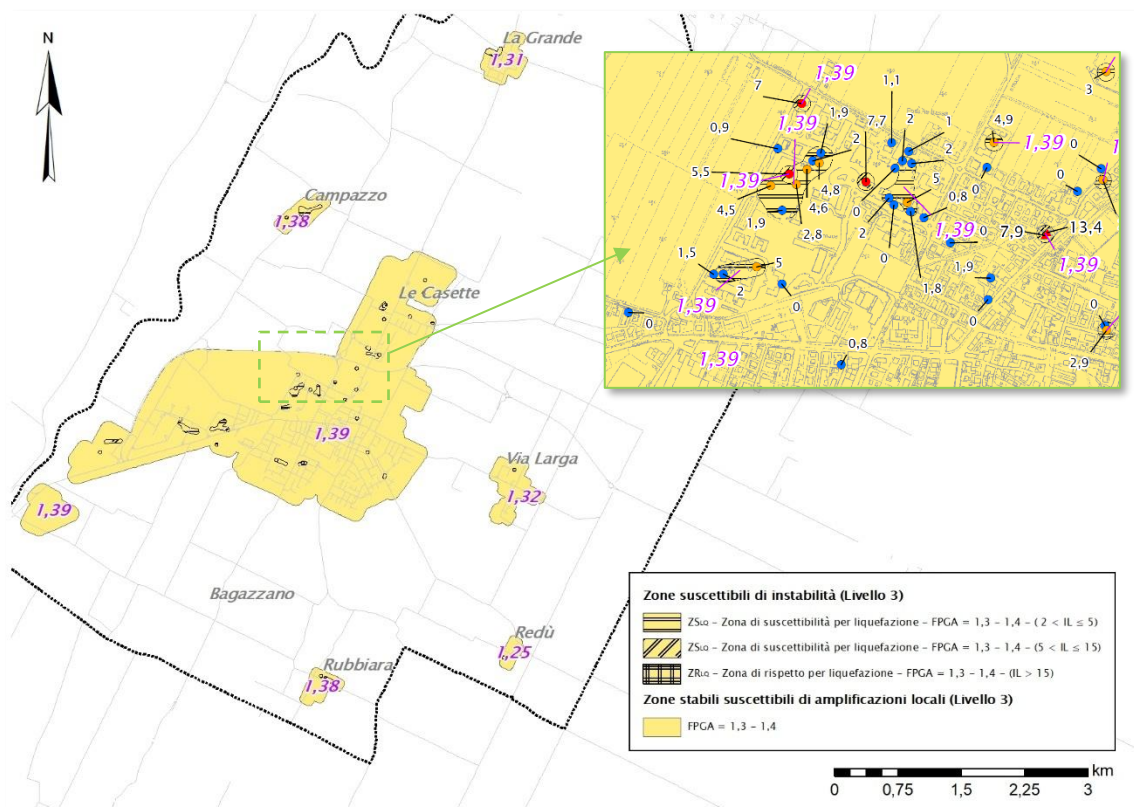


Figura 47 - Carta dei fattori di amplificazione della PGA su base semplificata. Nel riquadro, un particolare.

Nella **Carta dei fattori di amplificazione dell'intensità di Housner (periodi 1,0s – 0,5s)**, rappresentata in Figura 48, emergono alcune differenze nei valori di amplificazione tra i vari settori del territorio indagato: i valori maggiori si trovano nel Capoluogo e nelle frazioni di Campazzo e Rubbiara (colore arancio, valori di FH0105 tra 1,7 e 1,8), mentre i valori più bassi si trovano nelle frazioni di Redù, Via Larga e La Grande (colore ocra, valori di FH0105 tra 1,5 e 1,6).

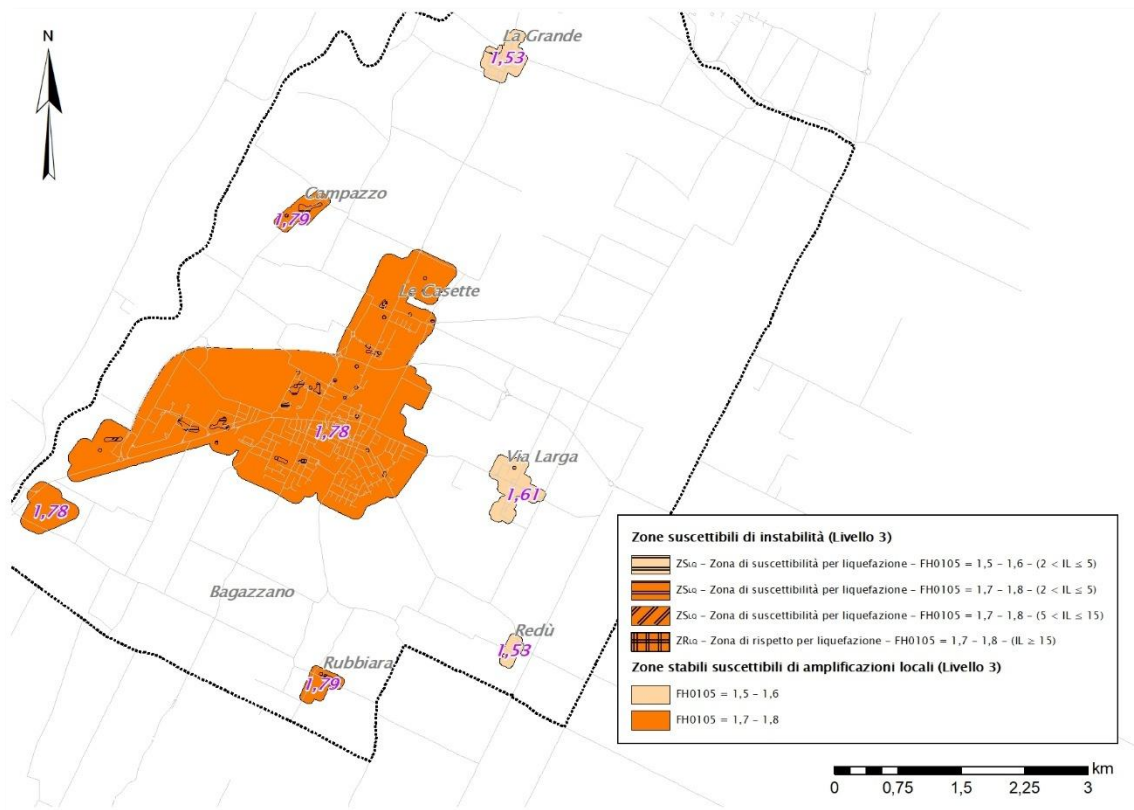


Figura 48 - Carta dei fattori di amplificazione dell'Intensità di Housner nei periodi 0,1-0,5 sec. su base semplificata.

Nella **Carta dei fattori di amplificazione delle accelerazioni nel periodo 0,7 – 1,1 sec**, rappresentata in Figura 50, gli alti valori di accelerazione ottenuti dalle RSL per gli alti periodi danno ragione degli alti valori di amplificazione che caratterizzano l'intero Capoluogo (FA0711 > 3,5). I valori di amplificazione relativamente più bassi sono caratteristici delle frazioni di Campazzo (FA0711 tra 1,9 e 2,0) e di Redù e La grande (FA0711 tra 2,1 e 2,2), mentre valori intermedi (FA0711 tra 2,3 e 2,4) si trovano in Via Larga e Rubbiara.

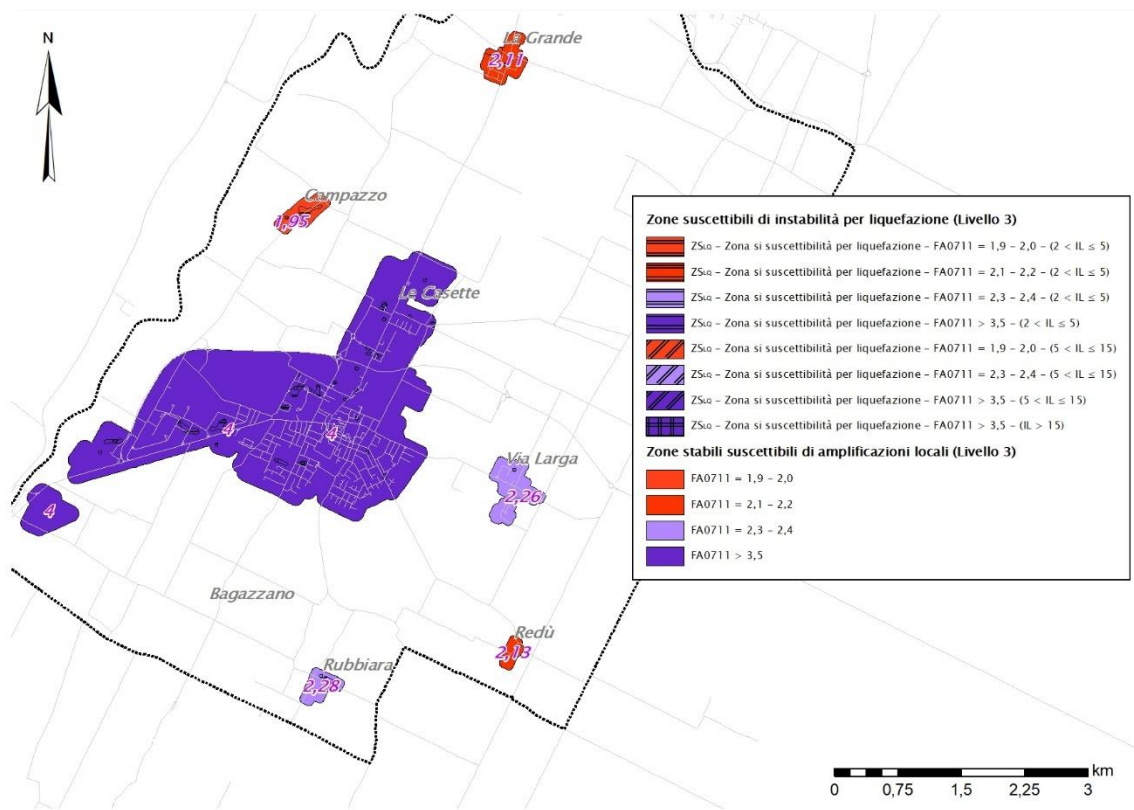


Figura 49 - Carta dei fattori di amplificazione delle accelerazioni (periodo 0.7 – 1.1 s) su base semplificata.

La **Carta dello scuotimento in accelerazione atteso al sito, in valore assoluto (frazione di g), nell'intervallo 0,1-0,5 sec. (H_{SM})** mostra come i valori siano sostanzialmente compresi all'interno di due sole classi: la prima, in verde, tra 0,39 e 0,54 g, e la seconda, in giallo, tra 0,55 e 0,70 g. I valori più alti si trovano nel Capoluogo e nelle frazioni di La Grande, Via Larga e Redù. I valori più bassi sono invece nelle frazioni di Campazzo e Rubbiara.

In generale, lo scuotimento atteso è indicativo di un livello di pericolosità sismica "moderata" per l'intero territorio comunale.

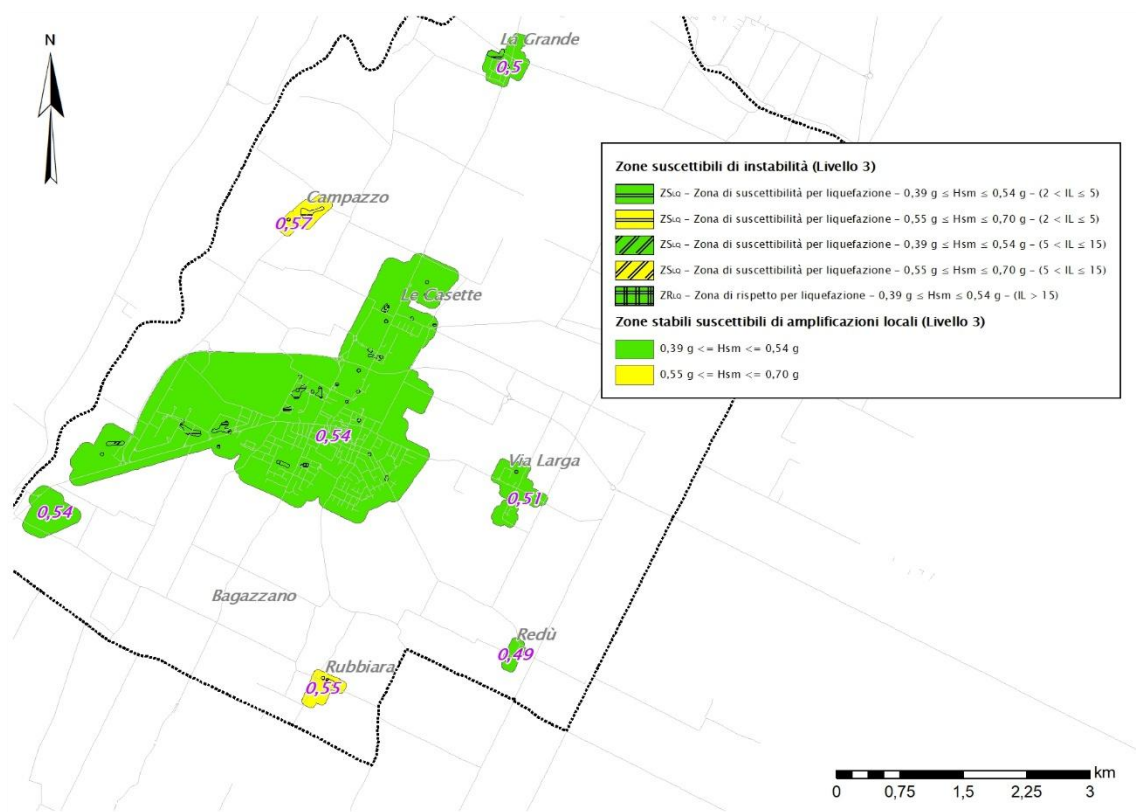


Figura 50 - Carta dello scuotimento in accelerazione atteso al sito, in valore assoluto (frazione di g), nell'intervallo 0,1-0,5 sec. (H_{SM}), su base semplificata.

10 CONFRONTO CON LA DISTRIBUZIONE DEGLI EVENTI PASSATI

A seguito degli eventi sismici che nel maggio-giugno 2012 hanno interessato un ampio settore della pianura emiliana, anche il Comune di Nonantola ha subito danni al patrimonio edilizio, censiti nelle schede AEDES da cui risultano:

- Nr. 46 edifici inagibili,
- Nr. 8 edifici parzialmente inagibili
- Nr 41 edifici temporaneamente inagibili

Questi sono i numeri che derivano dall'esame di tutte le schede AEDES fornite dal Comune di Nonantola, da cui sono state scorporate quelle schede relative ad edifici privi di identificativo di aggregato strutturale (solitamente edifici di pertinenza).

La sovrapposizione tra gli edifici (inagibili, parzialmente inagibili e temporaneamente inagibili) e le verifiche dell'Indice di Potenziale Liquefazione (IL) (Figura 51) non evidenzia particolari relazioni spaziali. Gli edifici con maggiori danni si concentrano nel nucleo storico del Capoluogo, laddove però non vi sono sufficienti indagini penetrometriche.

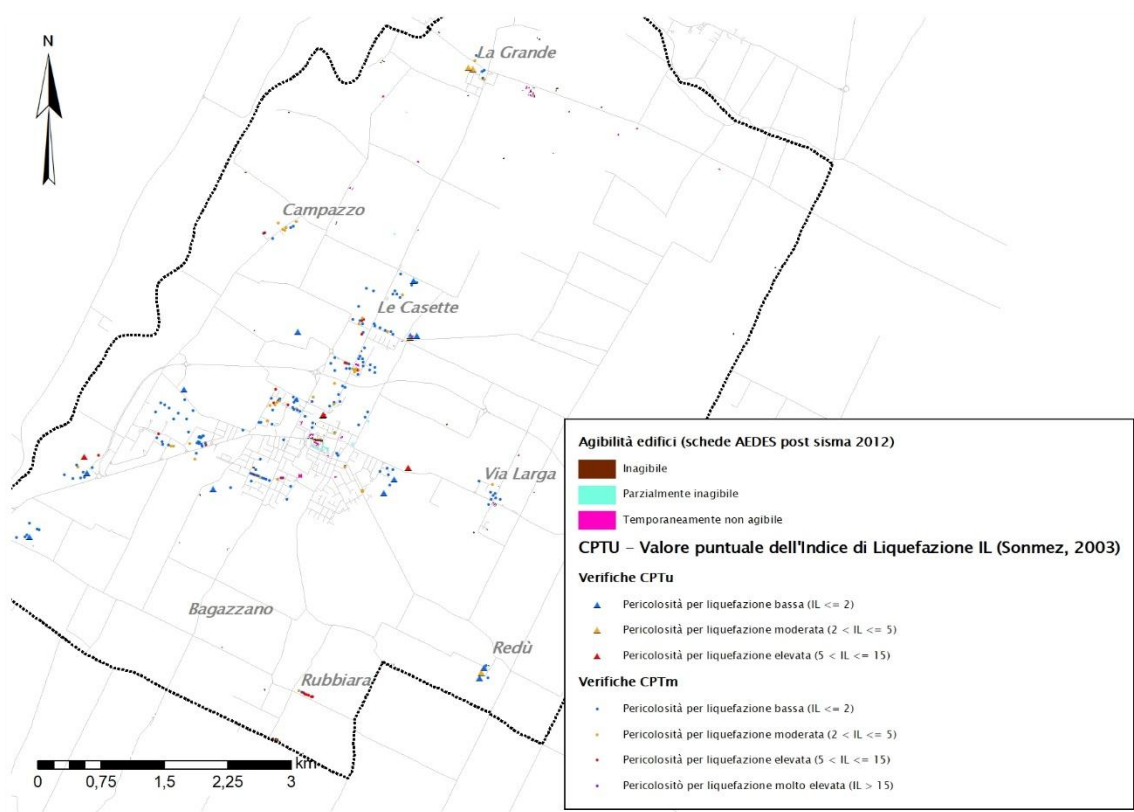


Figura 51 – Confronto tra gli edifici inagibili, parzialmente inagibili e temporaneamente inagibili ricavati dall'esame delle schede AEDES post-sisma 2012 e le verifiche dell'Indice di Potenziale Liquefazione eseguite per questo studio.

Vi sono solo 2 punti in cui verticali CPTU, che hanno dato pericolosità elevata e moderata, sono prossime ad edifici con inagibilità da completa a parziale (Figura 52).



Figura 52 – Due particolari di Figura 51.

11 BIBLIOGRAFIA

- Albarelo, 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.
- 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.
- Boccaletti M, Bonini M, Corti G, Gasperini P, Martelli L, Piccardi L, Severi P, Vannucci G (2004) Seismotectonic map of the Emilia-Romagna Region. Emilia-Romagna Region-SGSS and CNRIGG, Selca, Florence.
- Ciancimino, A., Cosentini, R.M., Foti, S., Lanzo, G., Pagliaroli, A., Pallara, O., 2023. The PoliTO–UniRoma1 database of cyclic and dynamic laboratory tests: assessment of empirical predictive models. *Bull Earthquake Eng* 21, 2569–2601. <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01573-y>
- Colombi, A., Curli, S., Ercolessi, G., Loffredo, G., Martelli, L., Minghini, F., Romagnoli, M., Stevanin, E., Veronese, T., Zanetti, D., 2014. Analisi del rischio di liquefazione dell'area produttiva "Piccola e media industria" di Ferrara. Presented at the 33° Convegno nazionale GNGTS, Regione Emilia-Romagna, Bologna, pp. 165–173.
- DISS Working Group (2021). Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.3.0: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/diss3.3.0>
- Facciorusso, J., Madiati, 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.
- 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: <https://www.protezionecivile.gov.it/it/pubblicazione/indirizzi-e-criteri-la-microzonazione-sismica>
- 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.
- Locati M., Camassi R., Rovida A., Ercolani E., Bernardini F., Castelli V., Caracciolo C.H., Tertulliani A., Rossi A., Azzaro R., D'Amico S., Antonucci A. (2022). Database Macrosismico Italiano (DBMI15), versione 4.0 [Data set]. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/dbmi/dbmi15.4>
- Martelli, L., Ercolessi, G., Sani, F., Bonini, M., Corti, G., Santulin, M., Tamaro, A., Rebez, A., Slejko, D., 2017a. 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., Bonini, M., Calabrese, L., Corti, G., Ercolessi, G., Molinari, F.C., Piccardi, L., Pondrelli, S., Sani, F., Severi, P., 2017b. Note illustrative della carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna ed aree limitrofe. D.R.E.AM. Italia, Bologna.
- 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>

Pieri, M., Groppi, G., 1981. Subsurface geological structure of the Po Plain, Italy, Progetto Finalizzato Geodinamica, Sottoprogetto "Modello Strutturale." C.N.R., Roma.

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. & Cabal K.L. (2010) – Estimating soil unit weight from CPT. 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, Huntington Beach, CA, USA, May 2010

Tento, A., Martelli, L., Marcellini, A., 2015. Abachi per la valutazione dei fattori di amplificazione per le indagini di microzonazione sismica di secondo livello in Emilia-Romagna. CNR - Istituto per la Dinamica dei Processi Ambientali, Milano.