

ANALISI DI PERICOLOSITÀ DA LIQUEFAZIONE - PROGETTO PERL

Rose Line Spacagna (*rosette.spacagna@igag.cnr.it*),
Maria Chiara Caciolli, Stefania Fabozzi, Iolanda Gaudiosi, Marco Mancini, Massimiliano Moscatelli,
Maurizio Simionato, Francesco Stigliano, Daniel Tentori, Chiara Varone
CNR IGAG – Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria
Anna Baris (*anna.baris@unicas.it*), Giuseppe Modoni, Luca Paoletta
DICEM - Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale
Luca Martelli
Regione Emilia Romagna – Servizio Geologia, suoli e sismica

Sommario

Il progetto *Protocollo Emilia-Romagna Liquefazione* (PERL) ha per obiettivo la definizione di una strategia multilivello per valutare il rischio da liquefazione in siti con situazioni geologiche e topografiche complesse e fornire indicazioni aggiornate per la realizzazione degli studi di microzonazione sismica di livello 3. Nasce dalla collaborazione tra gruppi di ricerca del CNR – IGAG e dal DiCEM dell'Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale, con il sostegno del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna e del Comune di Terre del Reno, sito pilota del progetto. Nella presente nota sono illustrate le attività riguardanti la definizione di metodologie per la valutazione della pericolosità a liquefazione sismica in condizioni stratigrafiche complesse. A tal fine è stato costruito un geodatabase che raccoglie tutte le indagini eseguite sul territorio di Terre del Reno, utile per elaborazione automatica dei dati, combinando le conoscenze geologiche e geotecniche del sottosuolo.

1. Progetto PERL

Il progetto Protocollo Emilia-Romagna Liquefazione (PERL) nasce dalla collaborazione tra i gruppi di ricerca dell'Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR IGAG) e del Dipartimento di Ingegneria Civile e Meccanica dell'Università di Cassino e del Lazio Meridionale (UniCAS-DICeM), con il sostegno del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna e del Comune di Terre del Reno (FE).

Il progetto si pone come obiettivo la definizione di una strategia multilivello per valutare il rischio da liquefazione in siti con situazioni geologiche e topografiche complesse e fornire indicazioni aggiornate per la realizzazione degli studi di microzonazione sismica di livello 3. L'attività di ricerca è dedicata allo studio approfondito dei diversi elementi coinvolti nel fenomeno della liquefazione: evento sismico di innesco, morfologia del territorio, morfologia sepolta, assetto geologico (litostratigrafico e tettonico) e geotecnico (profondo e superficiale) e manufatti interrati e in superficie.

Il territorio del Comune di Terre del Reno, nato dall'unione delle ex-municipalità di Sant'Agostino e Mirabello e colpito dalla sequenza sismica del 2012 dell'Emilia Romagna (E.W.G., 2013), durante la quale si sono verificati rilevanti eventi di liquefazione (Fig. 1) è stato individuato come sito pilota del progetto.

In particolare, lo studio è focalizzato sulle aree di San Carlo e di Mirabello (Fig. 1), selezionate tenendo conto delle tipologie litostratigrafiche, geotecniche, topografiche e della distribuzione delle osservazioni puntuali a liquefazione degli eventi passati.

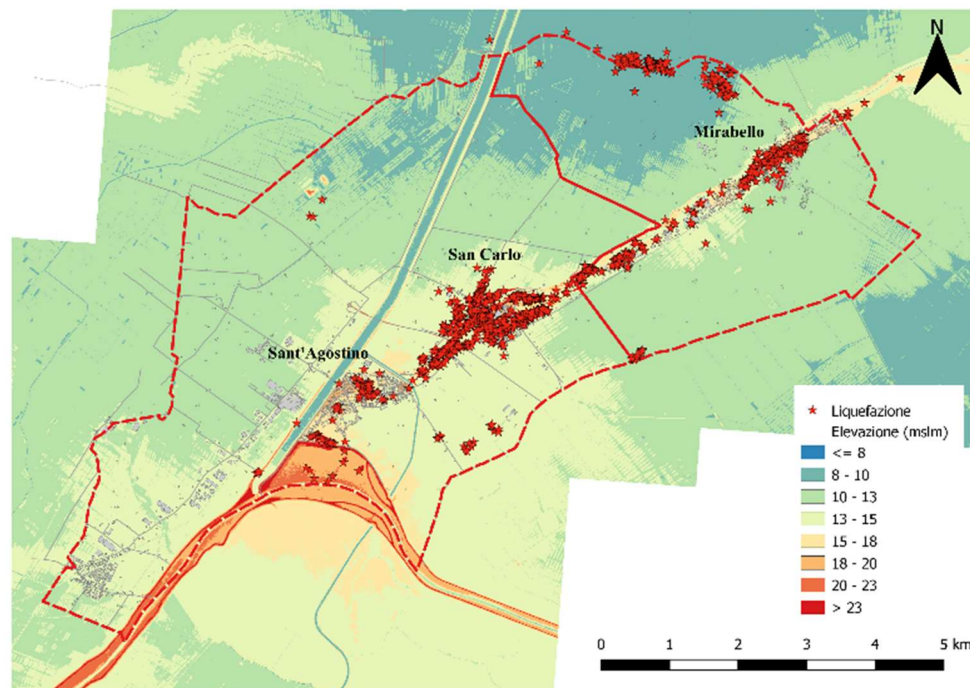


Fig.1: Terre del Reno (Emilia Romagna) - Osservazioni dei fenomeni di liquefazione a seguito della sequenza sismica del 2012

Il presente lavoro è dedicato alla definizione di una metodologia per valutare la pericolosità a liquefazione sismica nelle sabbie in condizioni stratigrafiche complesse attraverso un approccio multilivello. A tal fine, è stato costruito un geodatabase di circa 1700 indagini geognostiche consentendo di coniugare le conoscenze geologiche e geotecniche del sottosuolo in modo efficiente e automatico sulla base di dati sito-specifici, ottenendo risultati affidabili e indispensabili per la costruzione di un modello geotecnico robusto e coerente del sottosuolo.

2. Geodatabase PERL

La creazione del Geodatabase del progetto PERL è frutto dell'unione di tre banche dati della Regione Emilia Romagna e dall'integrazione di ulteriori indagini eseguite nell'ambito del progetto stesso. In particolare, dalla banca dati geognostica della regione Emilia Romagna (<https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/geologia/cartografia/webgis-banchedati/banca-dati-geognostica>) sono state estratte 909 indagini ricadenti all'interno del comune di Terreno del Reno. Inoltre, dalla piattaforma informatica utilizzata per l'attuazione delle ordinanze commissariali 29, 51 e 86/2012 relative alla ricostruzione, sono state individuate 225 cartelle Mude (Modello unico digitale dell'edilizia) contenenti le pratiche edilizie per la riparazione, ripristino o ricostruzione degli immobili (<https://www.regione.emilia-romagna.it/terremoto/mude-modello-unico-digitale-per-ledilizia>). Da queste cartelle, sono state individuate e estratte 378 indagini. Ulteriori 396 indagini sono state selezionate dagli studi di microzonazione sismica pregressi, allora realizzate per i comuni di Sant'Agostino e Mirabello. Infine, nell'ambito del Progetto PERL, sono state eseguite ulteriori 17 indagini per migliorare e integrare la conoscenza del sottosuolo in zone critiche, per realizzazione degli studi di microzonazione sismica di livello 3 del comune di Terre del Reno (ordinanza del Capo del Dipartimento della Protezione civile n.532). In fig. 2 sono ubicate le 1700 indagini del geodatabase del Progetto PERL, distinte per tipologie. Le prove sono state digitalizzate e standardizzate per poter consentire un'elaborazione automatica dei dati al fine di unire efficacemente le conoscenze geologiche e geotecniche del sottosuolo per la valutazione della pericolosità da liquefazione del territorio.

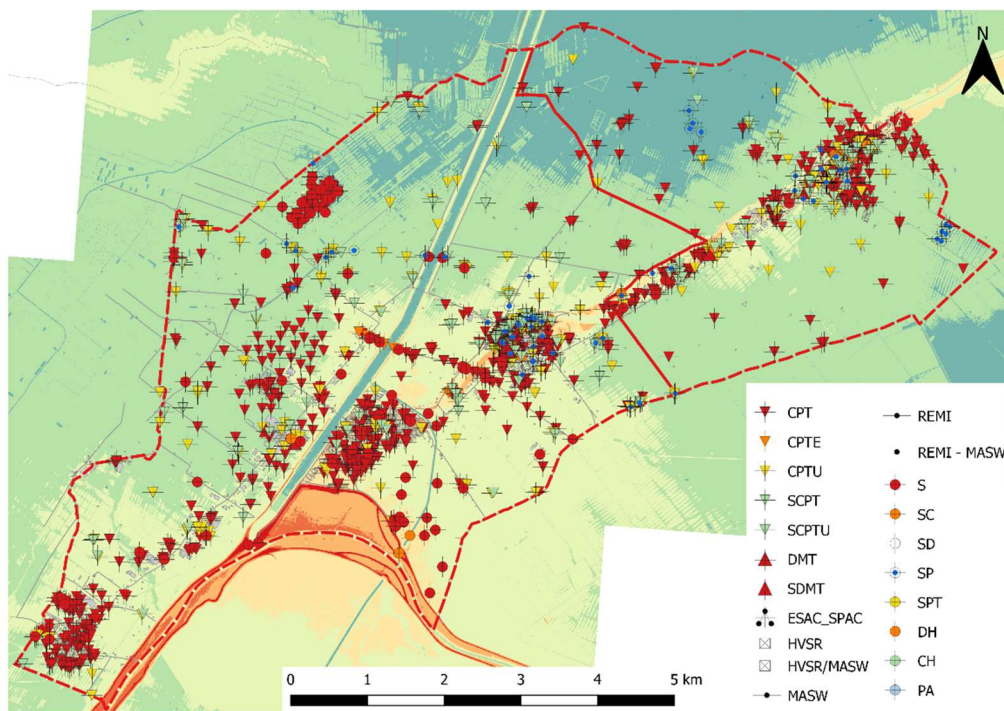


Fig. 2: Indagini geostitiche del geodatabase PERL:

3. Assetto stratigrafico-sedimentologico e topografico

Il comune di Terre del Reno si trova in provincia di Ferrara, nella pianura padana meridionale, si estende su una superficie di 51 kmq, lungo un ex ramo del fiume Reno ed è suddiviso in tre frazioni principali: Sant'Agostino, San Carlo e Mirabello (Fig. 3.a, ingrandimento della frazione urbanizzata di San Carlo). Il territorio è caratterizzato da un complesso contesto stratigrafico dovuto alla storia deposizionale del fiume Reno. La storia geologica relativamente recente, l'intensa sequenza deposizionale del fiume Reno e la falda freatica poco profonda hanno condizionato l'assetto stratigrafico-sedimentologico e topografico dell'area. In particolare, l'attività deposizionale del fiume ha lasciato strati superficiali di sabbia poco addensata con uno spessore di pochi metri, tipico del processo degli ambienti sedimentari delle pianure alluvionali (Fig. 3.b). Per regolare il regime fluviale e limitare le piene del fiume Reno sono stati costruiti argini artificiali mescolando sabbia e limo, oggi erosi e in corrispondenza dei quali si è sviluppata l'urbanizzazione, come evidenziato in Fig. 3.a, nella frazione di San Carlo. Gli strati più profondi sono costituiti da sedimenti depositati dai fiumi appenninici e alpini, inframmezzati da accrescimento marino (Romeo, 2012). Pertanto, l'attuale assetto del territorio è essenzialmente il risultato dei processi di sedimentazione ed erosione esercitati dai corsi d'acqua appenninici ed alpini, tra questi il Po e il Reno.

Nell'ambito del progetto PERL è stato ricostruito un modello sedimentologico dettagliato del sottosuolo del territorio di Terre del Reno, al fine di studiare l'influenza stratigrafica sui fenomeni di liquefazione indotti dai terremoti. In fig. 3.c. è riportata una sezione realizzata in corrispondenza della frazione di San Carlo (fig. 3.a). Dalla caratterizzazione geologica e sedimentologica sono state individuate quattro unità stratigrafiche principali nei 30 m superiori del sottosuolo:

- Argine: limo sabbioso, sabbia limosa;
- Canale: sabbia fine e media pulita;
- Piana: limo, argilla limosa, limo argilloso;
- Torba: argilla, argilla organica, materiale organico.

In particolare, lo spessore relativo del riempimento del canale, rispetto ai depositi di argine, sembra

controllare la gravità dell'espulsione della sabbia in superficie. Inoltre, le discontinuità verticali e laterali all'interno degli strati sembrano impedire il verificarsi di caratteristiche di liquefazione diffuse.

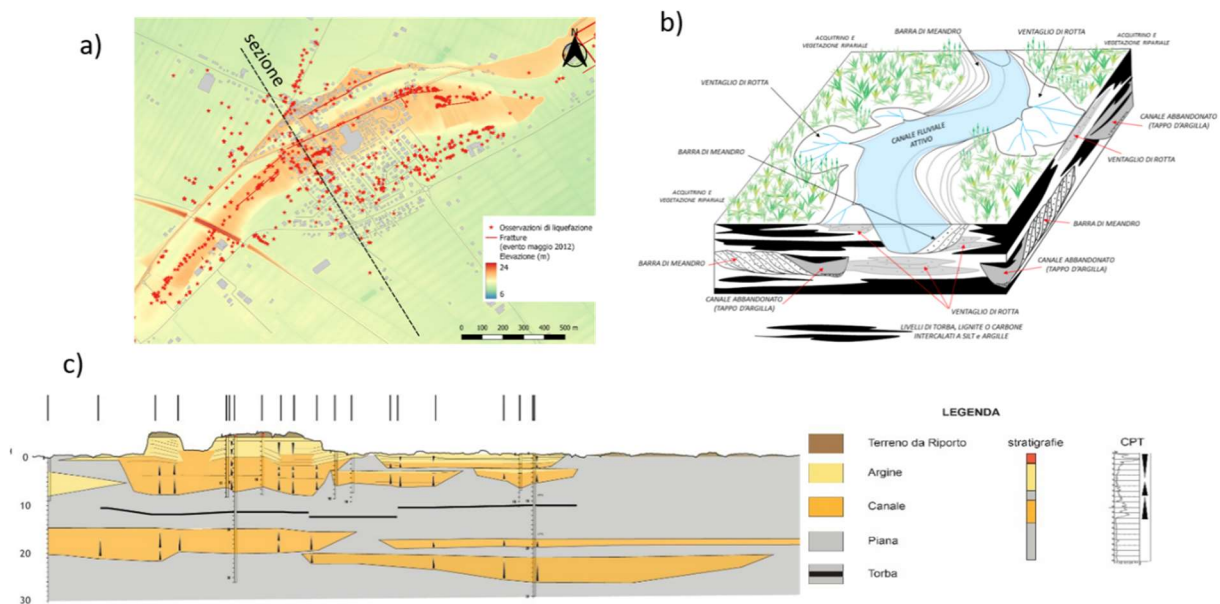


Fig 3. Assetto stratigrafico-sedimentologico e topografico. a) frazione di San Carlo edificata in corrispondenza del paleo-argine. b) Ambiente sedimentario delle pianure alluvionali c) Ricostruzione stratigrafica superficiale (primi 30 m) dell'area di San Carlo.

4. Analisi di pericolosità da liquefazione

Le linee guide della microzonazione sismica definiscono, per livelli di approfondimento, le zone di potenziale interesse da liquefazione distinguendo le zone di attenzione (Z_{ALQ}) nel livello 1, le zone di suscettibilità (Z_{SLQ}) e le zone di rispetto (Z_{RLQ}) nel livello 3. Le modalità di approfondimento delle analisi sono funzione delle tipologie di zone previste (CTMS, 2018).

Nel livello 1, l'individuazione di Zone di Attenzione per la liquefazione (Z_{ALQ}) sono effettuate sulla base di 3 fattori predisponenti:

1. presenza di orizzonti di terreni non coesivi saturi (limi sabbiosi, sabbie, sabbie limose, sabbie ghiaiose, sabbie argillose e ghiaie sabbiose) ad una profondità inferiore a 20 m dal p.c.;
2. presenza la falda acquifera una profondità media stagionale inferiore a 15 m dal p.c.;
3. eventi sismici attesi al sito caratterizzati da valori magnitudo $M_w \geq 5$ e da un'accelerazione in superficie di riferimento $a_{max} \geq 0,1$ g.

Dal punto di vista dell'input sismico, l'intera area del territorio di Terre del Reno presenta un'accelerazione in superficie di riferimento $a_{max} \geq 0,1$ g ed eventi sismici caratterizzati da valori magnitudo $M_w \geq 5$. Pertanto, la terza condizione predisponente non rappresenta un fattore discriminante sul territorio indagato. Sulla base delle indagini digitalizzate e omogeneizzate del geodatabase PERL, è stato possibile implementare degli strumenti di analisi statistica e geostatistica (Chilès e Delfinet, 2012) per la valutazione della presenza di orizzonti non coesivi saturi e per lo studio del livello della falda.

In particolare, una procedura automatizzata di individuazione di strati di terreno omogenei è stata applicata su 955 prove penetrometriche per fornire un'interpretazione accurata delle indagini considerando la correlazione spaziale dei valori misurati lungo il profilo verticale (Spacagna et al., 2022). In corrispondenza di ciascuna prova, combinando l'esito del processo di sezionamento con la ricostruzione stratigrafica precedentemente illustrata, è stato possibile distinguere la presenza, la posizione e lo spessore degli strati potenzialmente liquefacibili. In fig. 4.a sono riportate le verticali processate in corrispondenza della frazione di San Carlo.

Il livello di falda è stato analizzato tramite interpolazione delle quote misurate in corrispondenza di 900

prove in situ (sondaggi, piezometri e CPT) distribuite in tutta l'area del comune di Terre del Reno. I dati misurati sono stati suddivisi in due semestri in base alla data di esecuzione della prova. Il primo semestre copre il periodo da gennaio a luglio e il secondo da agosto a dicembre. Un metodo di ottimizzazione è stato applicato per gestire un database caratterizzato da diverse tipologie di indagini e da una distribuzione spaziale eterogenea dei punti misurati. La procedura individua in fasi successive gli “outliers” statistici e spaziali, ottimizzando il livello di qualità della stima della falda sull'intero territorio. La mappa del livello delle acque sotterranee del sistema acquifero più superficiale (fig. 4.b) è caratterizzata da una maggiore profondità in corrispondenza degli argini (circa 5 m) e più superficiale in pianura (circa 1 m).

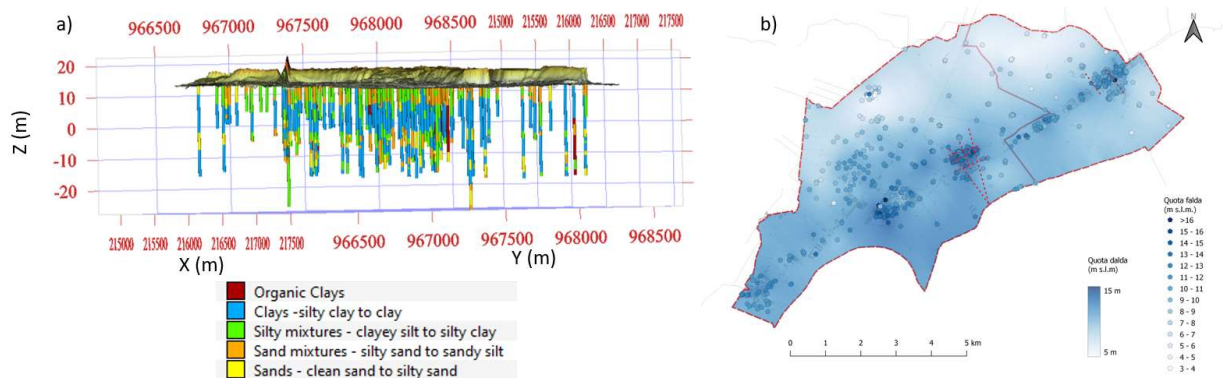


Fig. 4: a) Prove penetrometriche processate in corrispondenza della frazione di San Carlo, b) Interpolazione geostatistica del livello della falda sul comune di Terre del Reno.

Nel livello 3, le zone di suscettibilità alla liquefazione (ZS_{LQ}) sono identificate mediante l'applicazione di metodi di analisi semplificati per produrre una stima quantitativa della pericolosità del territorio. Sulla base dell'interpretazione delle prove in sito e dei risultati delle prove di caratterizzazione fisica e meccanica in laboratorio, l'amplificazione litostratigrafica in superficie (a_{max} in superficie in condizioni di free field) è stata stimata attraverso modellazioni numeriche 1D e 2D, secondo indicazione di normativa (NTC, 2018 e CTMS, 2018). L'esito di tali modellazioni ha consentito di fornire i fattori di applicazione da tenere in considerazione nel calcolo degli effetti della liquefazione al suolo, tramite l'indice di potenziale di Liquefazione (I_L).

La verifica delle condizioni d'innescò della liquefazione è condotta con il metodo semi-empirico proposto da Seed & Idriss (1982), in cui si verifica la relazione tra il rapporto tensionale ciclico CSR prodotto dal sisma e la resistenza ciclica CRR, ovvero il fattore di sicurezza (FSL) del profilo studiato. L'indice di potenziale di liquefazione è calcolato secondo la relazione di Sonmez (2003):

$$I_L = \int_0^{20} F(z) (10 - 0.5z) dz$$

dove $F(z)=0$ per $FSL \geq 1.2$, $F(z)=2 \times 10^6 \cdot e^{-18.427 FSL}$ per $0.95 < FSL < 1.2$ e $F(z)=1-FSL$ per $FSL \leq 0.95$.

In fig. 5 sono riportati i valori dell'indice di potenziale di Liquefazione sull'area di San Carlo. Tali valori possono essere commentati confrontando il risultato con le osservazioni puntuali e fratture rilevate a seguito dell'evento sismico del 2012. L'indice I_L presenta valori maggiori in corrispondenza degli argini, dove le osservazioni di liquefazione mostrano una maggiore severità dovuta alla formazione di fratture riconducibili al fenomeno di espansione laterale.

5. Sviluppi futuri

Il progetto PERL, oltre ad analizzare zone con contesti stratigrafici complessi, si pone come obiettivo l'individuazione di criteri o condizioni che consentano di introdurre nella valutazione e la quantificazione della pericolosità da liquefazione, anche le caratteristiche topografiche del territorio. L'obiettivo è di poter integrare gli effetti bidimensionali dell'espansione laterale nei metodi di analisi

semplificata e di individuare un'ulteriore condizione predisponente il fenomeno da suggerire nelle linee guida della microzonazione sismica: a tal proposito, Paoletta et al. (2022) introducono gli effetti topografici nell'indice di severità di liquefazione generalizzato.

L'approccio per livello di apprendimento ha per scopo l'individuazione delle zone di attenzione (ZA_{LQ}) nel livello 1 e le zone di suscettibilità (ZS_{LQ}) nel livello 3 e la loro perimetrazione nelle carte di microzonazione sismica. Sulla base dei dati contenuti nel geodatabase di PERL, l'obiettivo è di suggerire una metodologia di perimetrazione che si basi sull'analisi spaziale dei dati, al fine di tenere in considerazione in maniera oggettiva, automatizzata e rigorosa l'insieme delle informazioni disponibili, quantificando l'incertezza dalla stima.

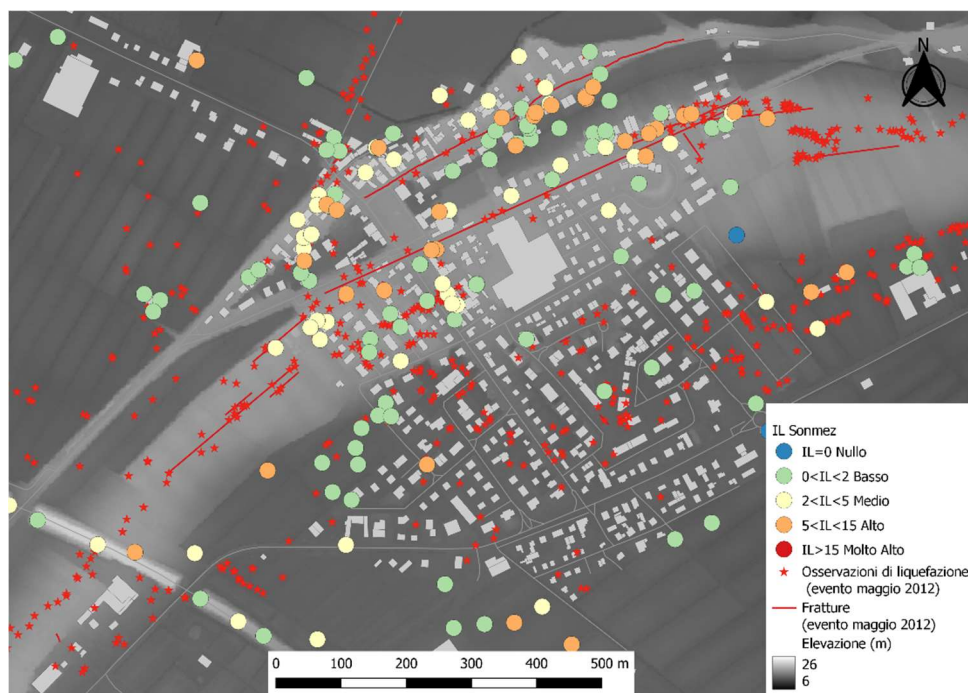


Fig. 5: Valori dell'indice di potenziale di liquefazione (IL, Sonmez, 2003) in corrispondenza della frazione di San Carlo.

Bibliografia

- Chilès, J. P., Delfiner, P. (2012). *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*, 2nd Edition – Wiley - ISBN: 978-0-470-18315-1, p. 726.
- Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica – CTMS (2018). “Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da liquefazioni (LQ)” versione 1.0, Roma.
- Emergeo Working Group. 2013. Liquefaction phenomena associated with the Emilia earthquake sequence of May-June 2012. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 935-947.
- Paoletta L., Modoni G., Spacagna R.L., Baris A. (2022). “A generalised severity number to predict liquefaction damage with lateral spreading”. *Géotechnique*, 1-22
- Seed, H. B., Idriss, I. M. (1982). “Ground Motions and Soil Liquefaction During Earthquakes”. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, Monograph Series, p. 13.
- Sonmez, H. (2003). “Modification of the liquefaction potential index and liquefaction susceptibility mapping for a liquefaction-prone area (Inegol, Turkey)”. *Env. Geo.* 44, 862–871. <https://doi.org/10.1007/s00254-003-0831-0>
- Spacagna R.L., Baris A., Paoletta L., Modoni G. (2022). “Data-driven soil profile characterization using statistical methods and artificial intelligence algorithms”. *Cone Penetration Testing 2022 – Gottardi & Tonni (eds) © 2022* Copyright the Author(s), ISBN 978-1-032-31259-0 Open Access: www.taylorfrancis.com, CC BY-NC-ND 4.0 license DOI: 10.1201/9781003308829-104, 708-714.
- Tentori D., Mancini M., Varone C., Spacagna R.L., Baris A., Milli S., Gaudiosi I., Simionato M., Stigliano F., Modoni G., Martelli L., Moscatelli M. (2022) “The influence of alluvial stratigraphic architecture on liquefaction phenomena: a case study from the Terre del Reno subsoil (southern Po plain, Italy)”. *Sedimentary Geology- In review*