

## **STIMA DELLA SUSCETTIBILITÀ A LIQUEFAZIONE SISMICA DI AGGREGATI URBANI CON METODI SEMPLIFICATI**

Rose Line Spacagna

*Università di Cassino e del Lazio Meridionale, DICeM  
rlspacagna@unicas.it*

Luca Paoella

*Università di Cassino e del Lazio Meridionale, DICeM  
paoella.luca1@gmail.com*

Francesca Bozzoni

*Eucentre  
francesca.bozzoni@eucentre.it*

Alessandro Rasulo

*Università di Cassino e del Lazio Meridionale, DICeM  
a.rasulo@unicas.it*

Giuseppe Modoni

*Università di Cassino e del Lazio Meridionale, DICeM  
modoni@unicas.it*

Carlo Giovanni Lai

*Università di Pavia  
carlo.lai@unipv.it*

### **Sommario**

Il presente lavoro mira a valutare l'efficacia dei più comuni metodi semplificati per la previsione della liquefazione sismica su aree di vasta estensione. A tale scopo si è implementata una procedura in grado di processare automaticamente un gran numero di prove CPT, di calcolare diversi indici di liquefazione e di rappresentarli sinteticamente su una mappa tematica. L'applicazione della procedura al caso di studio di San Carlo (Fe) soggetto al terremoto dell'Emilia Romagna, del 20 maggio 2012 (Mw = 6.15) ha permesso di confrontare i risultati delle diverse analisi con gli effetti al suolo.

### **1. Introduzione**

Numerosi eventi sismici avvenuti negli ultimi tempi (Haiti, 2010; Tohoku, Giappone, 2011; Christchurch, N.Z., 2010-2011 e 2016; Emilia, Italia, 2012; Kumamoto, Giappone, 2016) hanno mostrato che la liquefazione rappresenta uno dei maggiori responsabili della perdita economica totale associata al sisma. Nel nostro paese esso si è manifestato in maniera eclatante durante la sequenza sismica emiliana del maggio 2012. In realtà, come si evince dagli atlanti storici tra cui il Catalogo Galli relativo ai soli fenomeni di liquefazione (Galli et al. 1993), o successivi database come quello CEDIT Catalogo Effetti Deformativi del suolo Indotti da forti Terremoti (Fortunato et al. 2012), vi sono numerose evidenze di fenomeni di liquefazione su vaste aree del nostro Paese.

Sebbene esistano modelli teorici molto accurati per la simulazione e la previsione del fenomeno della liquefazione delle sabbie, nello studio delle grandi aree raramente si conoscono le caratteristiche dei terreni in maniera sufficientemente dettagliata per potere applicare tali metodi. Pertanto, la pratica più

comune prevede di stimare il potenziale di liquefazione attraverso metodi “semplificati” che garantiscono un buon compromesso tra qualità della previsione ed estensione dell’analisi. In particolare, tali metodi sono particolarmente efficaci quando si vogliono compiere studi di “microzonazione”, ovvero identificare aree soggette a maggiore pericolosità rispetto alle altre. Tra i metodi più ricorrenti vi sono quelli basati sui risultati delle prove penetrometriche statiche (CPT), sia per la rapidità esecutiva ed economicità delle prove, sia perché consentono di stimare il potenziale di liquefazione di un deposito integrando l’informazione su tutta la profondità indagata. Nell’ambito di tali metodi, il verificarsi o meno del fenomeno viene valutato, lungo una verticale, calcolando il Fattore di Sicurezza a Liquefazione (FSL), definito come rapporto tra il Cyclic Resistance Ratio “CRR” (la resistenza limite del terreno alla liquefazione) e il Cyclic Stress Ratio “CSR” (la domanda sismica relativa al terremoto di progetto) ed integrando tale risultato per tutta l’altezza indagata. Tuttavia, poiché la liquefazione sismica riguarda spesso strati sabbiosi di estensione variabile, studiarla il fenomeno lungo una sola verticale può risultare riduttivo ai fini delle analisi di rischio. Occorre quindi operare il passaggio da un livello puntuale ad una estensione territoriale maggiore, il che comporta la necessità di processare una quantità notevole di dati e di rappresentare i risultati su base spaziale più ampia.

In questo lavoro, viene presentata una procedura per automatizzare l’analisi dei dati delle prove CPT e per rappresentare i risultati su aree di notevole estensione. Il metodo proposto è applicato al caso di studio di San Carlo (Fe), considerando il terremoto Emiliano del maggio 2012 (Mw = 6.15).

## **2. Indici di potenziale liquefazione**

Nell’ambito dei metodi semplificati, il potenziale di liquefazione di un deposito viene stimato calcolando per ciascuno degli strati investigati il fattore di sicurezza FSL, ottenuto come:

$$FSL = \frac{CRR}{CSR} \quad (1)$$

Tradizionalmente, l’azione sismica è definita dal CSR, ovvero dal rapporto tra lo sforzo tangenziale indotto dal sisma e lo stato tensionale in sito (Seed ed Idriss, 1971). Il CRR, invece, può essere valutato applicando numerosi metodi proposti in letteratura (Robertson e Wride, 1998; Idriss e Boulanger, 2008 e Robertson, 2009). Nell’ambito di questo lavoro, si è considerato uno dei metodi più aggiornati ovvero il metodo di Boulanger e Idriss (2014). L’individuazione degli strati liquefacibili consiste nel verificare la porzione di sottosuolo in cui il FSL risulta minore o uguale all’unità. A partire dal fattore di sicurezza FSL è possibile valutare quindi diversi indicatori degli effetti al suolo:

- “Liquefaction Potential Index” o “LPI” (Iwasaki et al., 1978),
- cedimenti post-liquefazione “w” (Zhang et al., 2002),
- “Liquefaction Severity Number” o “LSN” (van Ballegooy et al., 2014).

## **3. Valutazione territoriale del potenziale di liquefazione**

Data la natura del fenomeno della liquefazione è necessario analizzare i dati di input in maniera puntuale, salvo poi interpolare le informazioni ottenute per le diverse verticali indagate in modo da creare un quadro d’insieme. A questo punto si può valutare lo specifico rischio da liquefazione oppure quello sismico di base. A tale scopo, nel presente studio, sono stati individuati due passaggi fondamentali:

- l’automatizzazione del processo di verifica tradizionale, cioè la possibilità di esaminare più prove (CPT nello specifico) con un unico comando, applicando i principi teorici dei metodi precedentemente richiamati;
- la rappresentazione dei risultati su piattaforma GIS (Geographical Information System) mediante approccio geostatistico, studiando in particolare la variabilità spaziale dei parametri descrittivi del fenomeno.

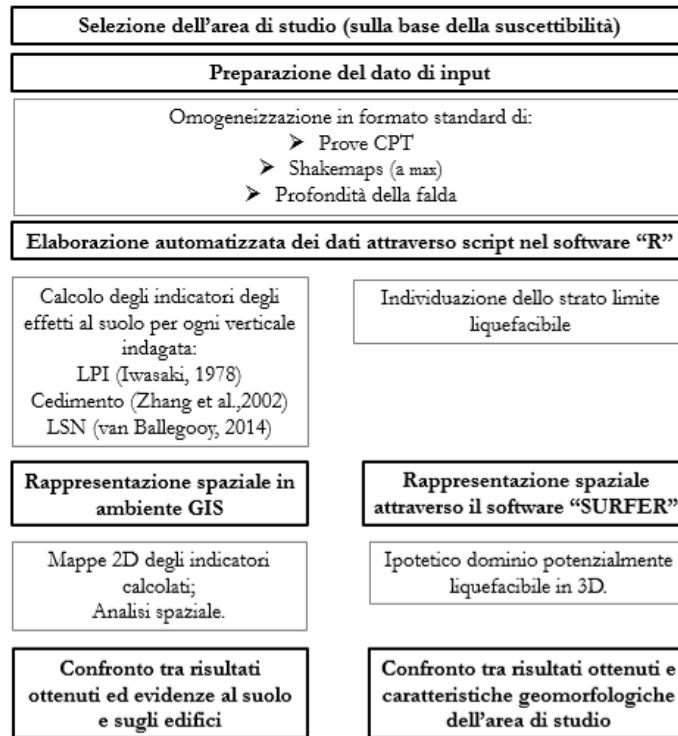


Fig 1. Schema della procedura per la valutazione territoriale del potenziale di liquefazione.

In figura 1 si schematizza la procedura seguita per la valutazione territoriale degli indicatori degli effetti di liquefazione al suolo. Sulla base della suscettibilità geologica si individua l'area di studio, per la quale è necessario reperire le indagini geotecniche disponibili, conoscere le caratteristiche del sisma (magnitudo momento e accelerazione massima) e profondità della falda. Per la corretta automatizzazione del processo, è essenziale l'omogeneizzazione dei dati di input in modo da disporre di un'informazione di base standardizzata. Quindi, con un programma messo a punto nel software R ([www.r-project.org](http://www.r-project.org)), si procede all'elaborazione dei dati, ovvero al calcolo degli indicatori del danno da liquefazione al suolo per ogni verticale indagata. Gli output ottenuti vengono poi mappati all'interno di una piattaforma GIS, ed interpolati sulla base di metodi di analisi geostatistica. Tale operazione consente di passare dalla scala puntuale a quella areale e di estrapolare le informazioni anche nelle zone non indagate direttamente.

Inoltre, l'analisi della prova CPT consente di individuare le profondità a cui il terreno è suscettibile alla liquefazione. Nel presente studio tale individuazione è stata eseguita impiegando un metodo di analisi statistica (Spacagna et al., 2015). Correlando spazialmente i dati si può ottenere una ricostruzione tridimensionale della porzione di sottosuolo potenzialmente liquefacibile.

#### 4. Il caso di studio di San Carlo (Fe)

Nei mesi di maggio e giugno del 2012, un ampio settore della Pianura Padana Emiliana è stato interessato da una significativa attività sismica comprendente oltre 2500 eventi, di cui 7 con magnitudo locale  $M_w$  maggiore di 5 (fig. 2).

La liquefazione ha interessato tutta l'antica pianura fluviale del ferrarese, dal Comune di Sant'Agostino a quello di Mirabello (FE), lungo l'allineamento Nord Est – Sud Ovest dell'antico alveo del Fiume Reno; un secondo allineamento di tali fenomeni è osservabile più a Nord, precisamente nel comune di Bondeno (FE).

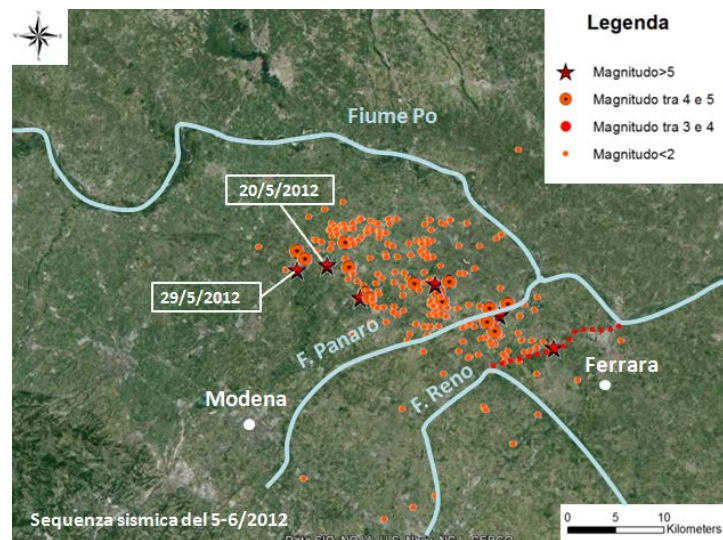


Fig 2. La sequenza sismica è stata caratterizzata da due forti scosse principali, la prima avvenuta il 20 maggio 2012 avente magnitudo  $M_w=5.9$  e profondità ipocentrale di 6.3 km; la seconda, del 29 maggio, con  $M_w=5.8$  e profondità ipocentrale di 10.2 km..

La zona più colpita risulta essere la frazione di San Carlo, (Comune di Sant'Agostino), che sorge su un'antica pianura in passato solcata dal Fiume Reno, prima che lo stesso fosse deviato verso Sud Est nel XVIII secolo per evitare le esondazioni ricorrenti nella pianura di Ferrara (fig. 3).

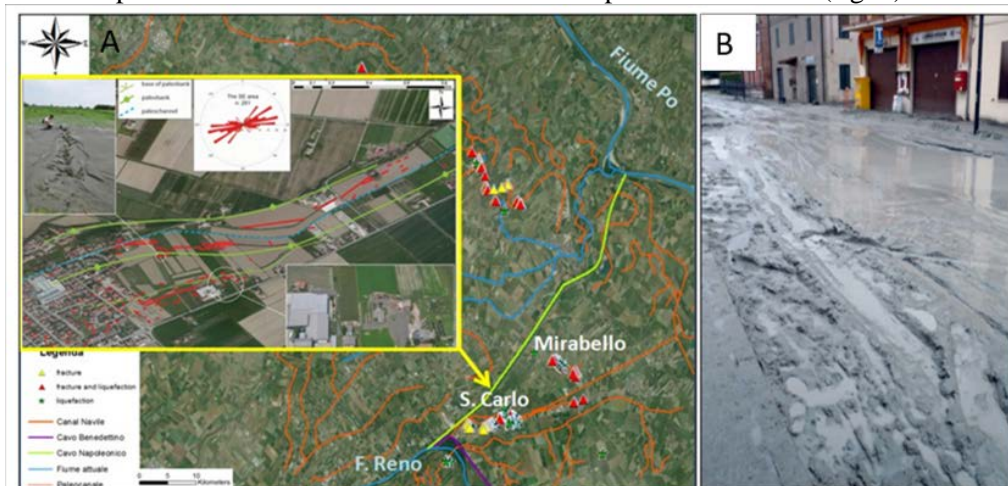


Fig 3. A) Localizzazione dell'antica Pianura fluviale del Reno, con zoom sulla frazione di S. Carlo; B) Fuoriuscita di acqua e fango in Via Risorgimento a S. Carlo.

Il Catalogo dei Dati Geografici del Servizio Geologo, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia Romagna mette a disposizione una Banca Dati Geognostica sull'intero territorio regionale di pianura. Dalla suddetta banca dati, tra le 330 prove CPT disponibili per il comune di Sant'Agostino, sono state estrapolate e processate le 75 prove localizzate nella frazione di San Carlo (fig. 4).

## 5. Analisi e Risultati

Per ognuna delle 75 prove CPT sono stati calcolati in maniera automatizzata i valori di LPI, w ed LSN in relazione al terremoto del 20 maggio 2012. Attraverso l'analisi geostatistica eseguita su GIS, è stato possibile elaborare delle mappe degli indicatori stessi. In particolare, in figura 5, si riporta la distribuzione spaziale dei cedimenti post-liquefazione, calcolati con il metodo di Idriss e Boulanger 2014, sovrapponendola agli effetti osservati al suolo ed ai rilievi tecnici sugli edifici.

Dal tale confronto si evince una buona correlazione tra l'indicatore degli effetti al suolo e le evidenze di liquefazione osservate sia al suolo che sugli edifici. In particolare, l'analisi spaziale del cedimento

post-liquefazione consente di evidenziare delle aree con valori significativi di cedimenti, per le quali non sono presenti indagini in sito, in corrispondenza delle quali sono stati rilevati fenomeni di liquefazione (per esempio l'area cerchiata in rosso in figura 5).

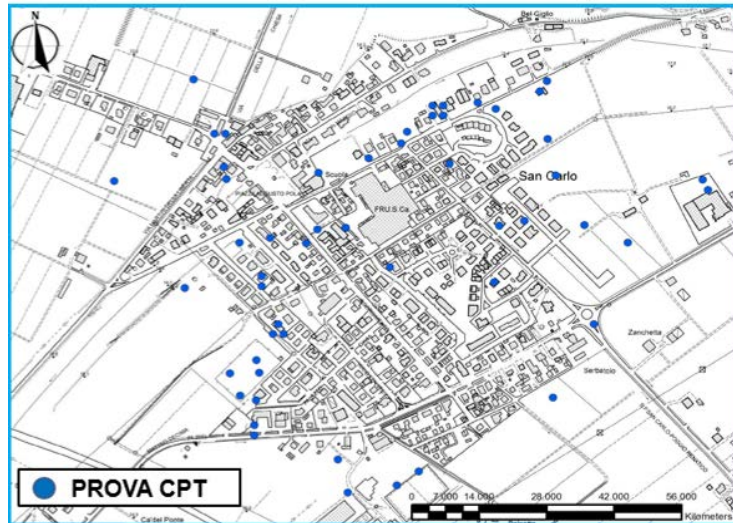


Fig 4. Individuazione delle CPT disponibili per l'area di studio dalla banca dati geostatica dell'Emilia Romagna.



Fig 5. Confronto tra valori dei cedimenti calcolati, effetti di liquefazione osservati al suolo dal gruppo Emergeo dell'INGV e rilievi dei tecnici sugli edifici.

Infine, è stato applicato il metodo statistico di sezionamento su ciascuna CPT ottenendo la profondità del tetto e lo spessore dei strati potenzialmente liquefacibili. L'analisi spaziale di queste informazioni, ha consentito di realizzare una ricostruzione tridimensionale della porzione di sottosuolo suscettibile alla liquefazione (fig. 6). Sovrapponendo i caratteri geomorfologici relativi dell'area di San Carlo (fig. 6), si osserva che le zone con spessore maggiore di porzione di terreno potenzialmente liquefacibile si localizzano in corrispondenza del vecchio paleo-alveo e paleo-argine del fiume Reno.

## 6. Conclusioni

Applicando la procedura di automatizzazione proposta per l'elaborazione di prove CPT, è stato possibile trattare i dati disponibili per la frazione di S. Carlo. Nello step successivo, l'analisi spaziale ha permesso di rappresentare la distribuzione degli indicatori di liquefazione sull'area di studio.



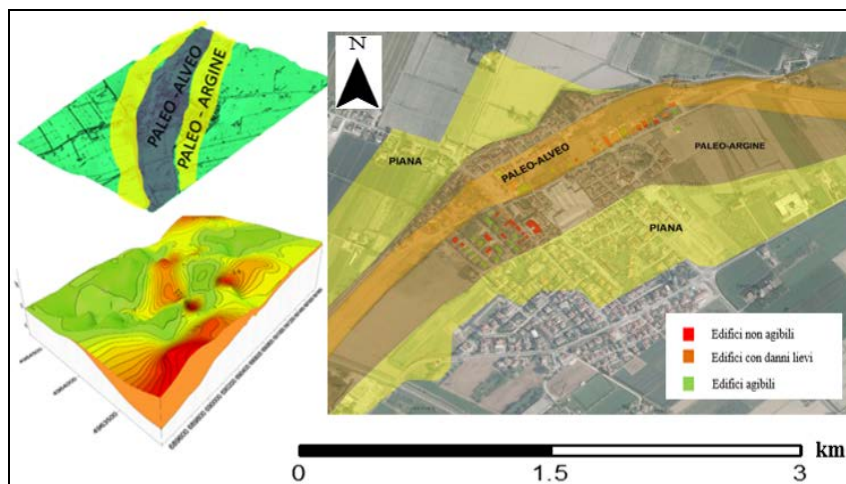


Fig 6. Individuazione dell'ipotetico dominio liquefacibile (sinistra) e sovrapposizione dei caratteri geomorfologici relativi all'area di studio (destra).

I risultati ottenuti dalla back-analysis del terremoto Emiliano rappresentano la prima fase di studio della correlazione tra i valori degli indicatori dell'effetto al suolo della liquefazione e danno osservato. Inoltre tale approccio, oltre ad essere un ottimo strumento di pianificazione territoriale alla scala della microzonazione sismica, consente di indirizzare la programmazione di nuove campagne di indagini per le zone più critiche (a maggior rischio) e per quelle a maggiore incertezza.

#### Ringraziamenti

Il presente lavoro rientra nell'ambito del progetto "Liquefact", finanziato dal programma europeo per la ricerca ed innovazione "Horizon 2020".

#### Bibliografia

- Boulanger R.W., Idriss I.M. (2014). CPT and SPT based liquefaction triggering procedures. Department of Civil and Environmental engineering, University of California at Davis.
- EMERGEO Working Group (2013). Liquefaction phenomena associated with the Emilia earthquake sequence of May–June 2012 (Northern Italy). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 935–947.
- Fortunato C., Martino S., Prestininzi A., Romeo R. W. (2012). New release of the Italian Catalogue of earthquake-induced ground failures (cedit). *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 2 (2012).
- Galli, P., Meloni, F. (1993). Liquefazione Storica. Un catalogo nazionale. *Quat. Ital. J. Quat. Sci.* 6.
- Idriss I.M., Boulanger R.W. (2008). Soil liquefaction during earthquakes. MNO–12, Earthquake Engineering Research Institute, 242p.
- Iwasaki T., Tatsuoka F., Tokida K., Yasuda S. (1978). A Practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan. 2nd International conference on Microzonation.
- Robertson P. and Wride C.E. (1998). Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, 35:442–459.
- Robertson P.K. (2009). CPT interpretation – a unified approach. *Canadian Geotechnical Journal*, 46, pagg. 1-19.
- Seed H.B., Idriss I.M. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 97(SM9): 1249–1273.
- Spacagna R.L., de Fouquet C., Russo G. (2015). Interpretation of CPTU Tests with Statistical and Geostatistical Methods. 5th International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (5th ISGSR, Rotterdam, 13-16 October 2015)
- van Ballegooy S., Malan P., Lacrosse V., Jacka M.E., Cubrinovski M., Bray J.D., O'Rourke T.D., Crawford S.A., Cowan H. (2014). Assessment of Liquefaction-Induced Land Damage for Residential Christchurch. *Earthquake Spectra*, Volume 30, No. 1, pages 31–55, February 2014.
- Zhang G., Robertson P.K., Brachman R.W.I. (2002). Estimating liquefaction-induced ground settlements from CPT for level ground. *Canadian Geotechnical Journal*, 39, 1168–80.