

## ANALISI DELLA PERICOLOSITÀ SISMICA PER LA VALUTAZIONE DELLA SUSCETTIBILITÀ ALLA LIQUEFAZIONE DEL TERRITORIO LIGURE

R. De Ferrari<sup>1</sup>, S. Barani<sup>1</sup>, G. Ferretti<sup>1</sup>, D. Bottero<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratorio di Sismologia, DISTAV, Università di Genova, Italia

<sup>2</sup> Dipartimento Ambiente, Regione Liguria, Genova, Italia

**Introduzione.** Tra i fenomeni sismo-indotti, quello della liquefazione dei terreni è riconosciuto dalla comunità scientifica ed ingegneristica come una tra le principali cause di danno e perdite a seguito di forti terremoti. Nei territori suscettibili a tale fenomeno, quindi, la liquefazione è una tra le più importanti pericolosità sismiche (es. Barani *et al.*, 2014). Per questo la liquefazione dei terreni è oggi più che mai argomento di dibattito non solo all'interno della comunità scientifica ma anche tra gli organi preposti alla tutela del territorio. Questi ultimi, guidati dai primi, hanno la necessità di discriminare quelle porzioni di territorio che, in funzione del livello di sismicità, possono essere soggette a fenomeni di liquefazione.

Il potenziale di liquefazione viene convenzionalmente valutato comparando gli effetti dell'azione sismica con la resistenza alla liquefazione propria di ciascun suolo. Pertanto, il calcolo del potenziale di liquefazione presso un sito richiede sia la valutazione della componente sismica sia la caratterizzazione geotecnica dei terreni. Convenzionalmente si considera un fattore di sicurezza ( $F_L$ ) rispetto al fenomeno della liquefazione sulla base del rapporto tra lo sforzo di taglio indotto dal terremoto (*Cyclic Stress Ratio* CSR) e la resistenza al taglio del terreno (*Cyclic Resistance Ratio* CRR). In particolare, il parametro CSR è quantificato a partire dalla pericolosità sismica del sito oggetto di studio (espressa in termini di accelerazione del suolo). Il parametro CRR dipende invece dalle caratteristiche del terreno ed, in particolare, dalla granulometria, dal contenuto d'acqua e dalla resistenza al taglio.

Sulla base di quanto appena osservato, il fenomeno della liquefazione può verificarsi se vengono soddisfatte alcune condizioni legate 1) alla magnitudo del terremoto (da cui dipende la durata dell'evento ed il numero di cicli di carico e scarico sismico a cui è sottoposto il terreno durante lo scuotimento), 2) all'accelerazione massima in superficie in condizioni di campo libero e 3) alla presenza di caratteristiche geologico-geotecniche del terreno predisponenti, la più importante delle quali è la presenza di terreni saturi (presenza di falda acquifera), a prevalente granulometria sabbiosa, poco addensati nei primi 15-20 m di profondità.

A livello esclusivamente sismologico, la possibilità che un terremoto sia in grado di indurre fenomeni di liquefazione dipende dall'intensità e dalla durata dello scuotimento. Come indicato nel Volume "Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica – ICMS" (Gruppo di Lavoro MS, 2008)], le due condizioni legate alle caratteristiche simiche necessarie affinché un'area sia potenzialmente soggetta al fenomeno della liquefazione sono:

- $a_g \geq 0.1$  g (accelerazione massima attesa superiore o uguale a 0.1 g)
- $M \geq 5$  (magnitudo del terremoto atteso maggiore o uguale a 5)

La probabilità che si verifichino fenomeni di liquefazione è bassa o nulla se si verifica almeno una delle due condizioni precedenti. Mentre per la verifica del primo requisito è sufficiente attenersi allo studio di pericolosità sismica a scala nazionale (Gruppo di Lavoro MPS, 2004), per quanto concerne la stima di  $M$  gli ICMS propongono 4 metodi di calcolo alternativi, ognuno dei quali con punti di forza e debolezze. Il primo metodo, che richiede esperienza riguardo al calcolo della pericolosità sismica, prevede l'impiego del codice di calcolo SASHA (D'Amico e Albarello, 2008), in grado di eseguire la disaggregazione della pericolosità così come calcolata dai risentimenti macrosismici ovvero dalle distribuzioni delle intensità al sito associate ai terremoti avvenuti in passato (Albarello, 2012). Il secondo metodo impiega la magnitudo massima ricavata dal Database Macrosismico Italiano – DBMI11 (Locati *et al.*, 2011). Il principale svantaggio di questo secondo metodo risiede nella natura deterministica della stima di  $M$  che, per definizione, potrebbe essere improbabile ovvero non verificarsi mai. Il terzo metodo proposto definisce  $M$  sulla base di relazioni empiriche calibrate a partire da osservazioni macrosismiche. Anche questo metodo comporta una scelta deterministica, sulla quale grava l'incertezza associata ai dati impiegati per la calibrazione delle leggi empiriche. Il quarto approccio considera la magnitudo così come derivata dalla disaggregazione 2D (magnitudo-distanza) della pericolosità sismica nazionale (Barani *et al.*, 2009). Il principale svantaggio è associato alla natura bidimensionale della procedura di disaggregazione, ovvero al fatto che ciascun valore di magnitudo è legato imprescindibilmente ad una data distanza di scenario. Di qui, la magnitudo che contribuisce maggiormente alla pericolosità sismica (magnitudo modale) potrebbe non corrispondere a quella ricavabile da disaggregazione 1D, più opportuna per valutazioni del potenziale di liquefazione.

Lo scopo del presente lavoro riguarda la definizione delle aree del territorio ligure dove, sulla base delle sole caratteristiche simiche, sia possibile escludere a priori il verificarsi di fenomeni di liquefazione o, più precisamente, dove la probabilità di occorrenza di detti fenomeni sia bassa o nulla. In questo modo è possibile definire porzioni del territorio regionale in cui le verifiche del potenziale di liquefazione non sono strettamente necessarie. Questo tipo di studio assume una rilevanza non trascurabile soprattutto in regioni che, come la Liguria, sono caratterizzate per buona parte del territorio da una bassa pericolosità sismica, tuttavia controllata da forti terremoti (es.  $M > 5.5$ ). Per lo scopo del lavoro sono presi a riferimento i criteri discriminanti proposti dagli ICMS. La suscettibilità alla liquefazione delle aree ove entrambi i criteri sopra elencati sono soddisfatti è verificata prendendo in esame osservazioni di episodi di liquefazione realmente avvenuti nella storia sismica del territorio in esame.

**Metodologia e risultati.** Come osservato poco sopra, a livello nazionale, il valore di  $a_g$  è definito puntualmente da studi di pericolosità sismica; il valore di  $M$ , invece, può essere ottenuto con l'applicazione di metodi differenti basati sulla disaggregazione (o deaggregazione) della pericolosità, su approcci di tipo macrosismico o su relazioni empiriche.

Allo scopo di definire le aree del territorio ligure (intese come aree comunali) suscettibili alla liquefazione, è stata adottata una procedura basata sull'analisi dei seguenti parametri:

- valore di  $a_g$  così come derivato dalla mappa di pericolosità sismica di riferimento per il territorio nazionale (Gruppo di Lavoro MPS, 2004); sono stati considerati i valori di  $a_g$  corrispondenti a tre periodi medi di ritorno ovvero 475 anni, 975 anni e 2475 anni;
- valore di magnitudo  $M$  ottenuta dalla disaggregazione 1D della pericolosità sismica per tutto il territorio ligure;

- osservazioni macrosismiche associate a fenomeni di liquefazione verificatisi sul territorio ligure così come censite nel “Italian Catalogue of Earthquake-Induced Ground Failures (CEDIT)” (Fortunato *et al.*, 2012).

Specificamente, a ciascuna area comunale è stata associata una coppia di valori  $a_g$ - $M$  in funzione dei quali è stato stabilito se il territorio comunale potesse essere potenzialmente soggetto al fenomeno della liquefazione.

Operativamente, la procedura proposta si basa su tre fasi principali:

1. definizione di una mappa ove a ciascun Comune viene attribuito un valore di magnitudo ottenuto dalla disaggregazione 1D della pericolosità sismica ovvero dei tassi di eccedenza dei valori di  $a_g$  corrispondenti ad un periodo medio di ritorno (MRP) di 2475 anni. L'analisi di disaggregazione è stata condotta per 176 siti, corrispondenti ai nodi della griglia adottata per la redazione della mappa di pericolosità sismica nazionale (Gruppo di Lavoro MPS, 2004) interni al perimetro regionale. A titolo d'esempio, Fig. 1a mostra la distribuzione 1D dei contributi alla pericolosità sismica per un sito (Lat: 44.2253; Lon: 8.3963) nel Comune di Spotorno (SV). A scopo di confronto, in Fig. 1b è presentata la distribuzione (PMF – *Probability Mass Function*)  $M$ - $R$ . Si noti che cumulando, per ciascun intervallo di magnitudo, i contributi di tutti gli scenari  $M$ - $R$  lungo l'asse delle distanze è possibile ottenere un istogramma del tutto analogo a quello mostrato in Fig. 1a. Si noti inoltre che, sebbene in questo esempio non si riscontrino differenze nei valori modali di magnitudo  $M^*$  (si ricorda che la moda di una distribuzione corrisponde allo scenario che fornisce il maggior contributo alla pericolosità sismica), la magnitudo modale ricavata da disaggregazione 1D potrebbe non coincidere con quella determinata da disaggregazione 2D o 3D. Al contrario la magnitudo media  $\bar{M}$  è indipendente dallo schema di disaggregazione. I valori medi e modali di magnitudo ottenuti per ciascun sito sono stati quindi mappati ed interpolati così da ottenere distribuzioni continue di  $M$  per l'intero territorio ligure. In Fig. 2a è rappresentata la mappa relativa alla distribuzione dei valori medi di magnitudo; in Fig. 2b è mostrata quella relativa ai valori modali. Affinché all'interno di un territorio comunale sia possibile escludere il fenomeno della liquefazione, non devono essere presenti porzioni con  $M^*$  e  $\bar{M}$  maggiori o uguali a 5. In caso contrario viene considerato il valore massimo (tra  $M^*$  e  $\bar{M}$ ; d'ora in avanti, ove non specificato,  $M$  potrà indicare indifferentemente  $M^*$  o  $\bar{M}$  ovvero il valore massimo tra le due magnitudo) all'interno del territorio comunale. In generale, comunque, confrontando le due mappe, l'utilizzo del valore modale conduce a risultati più conservativi, con un maggior numero di comuni passibili di fenomeni di liquefazione;
2. sovrapposizione della mappa di pericolosità sismica, ovvero dei valori di  $a_g$  corrispondenti ad un dato MRP (in questa fase sono stati considerati i valori di  $a_g$  associati a 475, 975 e 2475 anni), alla mappa della magnitudo attesa. In questa fase vengono individuati tutti i comuni per i quali il valore di  $M$  e  $a_g$  superano i limiti fissati per non poter escludere il verificarsi della liquefazione. Le aree comunali ove  $M$  è maggiore o uguale a 5 e, contemporaneamente,  $a_g$  è maggiore o uguale a 0.1 g sono aree dove non è possibile escludere a priori il verificarsi di fenomeni di liquefazione. La mappa in Fig. 3 mostra i comuni passibili di fenomeni di liquefazione (aree rosse) rispetto a quelli dove, al contrario, la probabilità di occorrenza di detti fenomeni è bassa o nulla (aree bianche);
3. verifica delle mappe definite al punto precedente sulla di osservazioni di fenomeni di liquefazione durante terremoti storici. A tal proposito sono state considerate tutte le informazioni riportate nel CEDIT (Fortunato *et al.*, 2012). In aggiunta, sono state utilizzate le leggi empiriche proposte da Galli (2000) che mettono in relazione la magnitudo con la distanza entro cui è possibile il verificarsi della liquefazione dei terreni. I risultati della verifica sono sovrapposti alle mappe in Fig. 3: i simboli blu rappresentano i siti dove, storicamente, sono stati segnalati fenomeni di liquefazione. I cerchi tratteggiati neri, associati ai tre eventi sismici principali che hanno interessato (o sono stati risentiti)

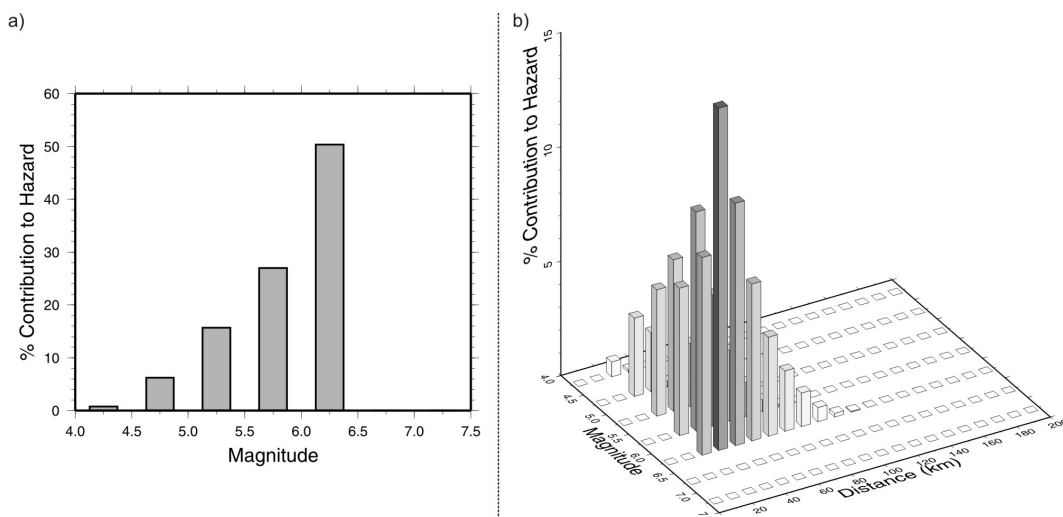


Fig. 1 – Disaggregazione 1D (a) e 2D (b) per un sito nel Comune di Spotorno (SV): contributi al tasso medio di superamento dei valori di PGA corrispondenti ad un MRP di 2475 anni.

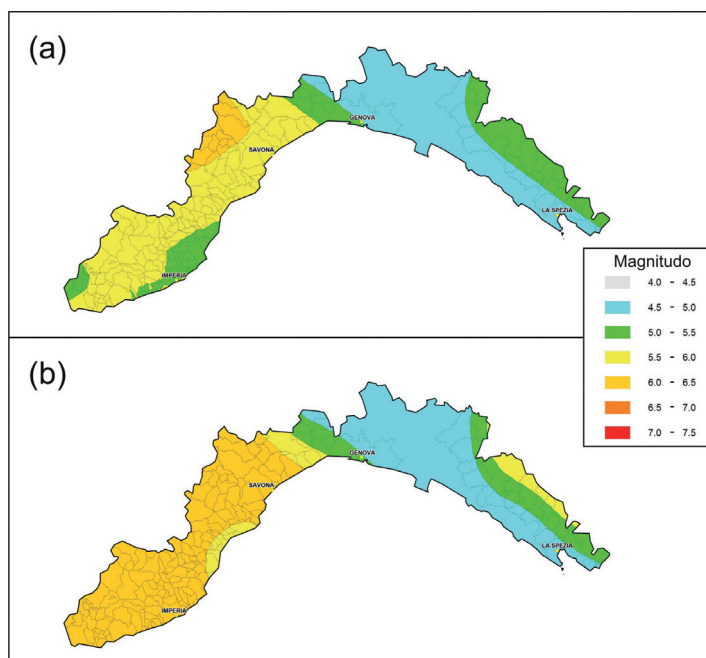


Fig. 2 – Mappa dei valori medi (a) e modali (b) di magnitudo così come dalla disaggregazione 1D della pericolosità sismica.

storicamente il territorio ligure (terremoti della Liguria occidentale del 29/12/1854 e del 23/2/1887 e della Garfagnana del 7/9/1920), rappresentano l'area entro cui è possibile osservare fenomeni di liquefazione sulla base delle relazioni empiriche di Galli (2000).

**Conclusioni.** Sulla base del confronto tra le aree suscettibili alla liquefazione mostrate nelle mappe in Fig. 3 e le osservazioni macrosismiche impiegate a scopo di verifica si osserva che gli elenchi dei comuni passibili di liquefazione ottenuti adottando stime di  $a_g$  per periodi medi di ritorno di 475 e 975 anni potrebbero risultare incompleti, indipendentemente che si faccia

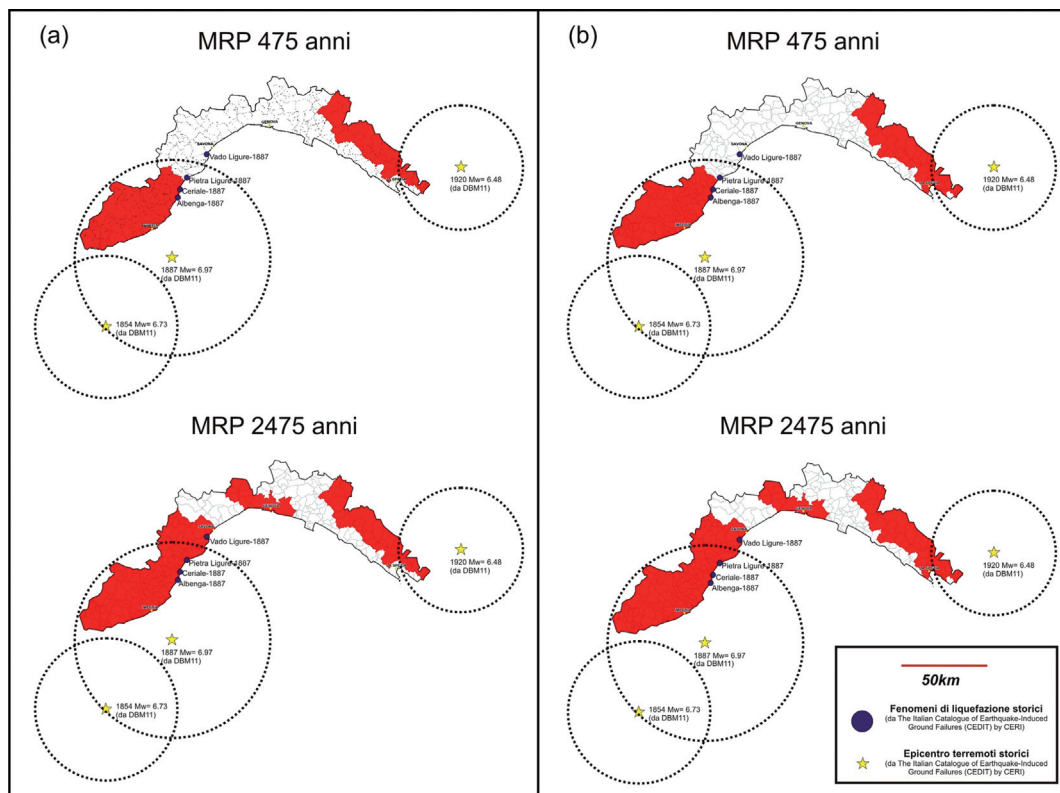


Fig. 3 – a) Distribuzione dei comuni con valori di  $\geq 5$  e valori di  $a_g$  (per un MRP di 475 anni e 2475 anni) uguali o superiori a 0.1 g (aree rosse). b) Come figura (a) ma considerando i valori modal di magnitudo. In ciascuna mappa sono riportati i risultati della fase di verifica descritta nel testo.

riserimento alla magnitudo media o modale: nel ponente ligure, infatti, né il Comune di Pietra Ligure (SV) né quello di Vado Ligure (SV), nei quali storicamente si sono osservati fenomeni di liquefazione associati al terremoto del 1887, sarebbero inclusi nella lista di comuni oggetto di potenziali fenomeni di liquefazione. Solo le mappe ottenute per valori di  $a_g$  corrispondenti ad un MRP di 2475 anni risultano effettivamente cautelative, incorporando tutti i comuni in cui in passato si sono verificati fenomeni di liquefazione. Similmente, impiegando le relazioni empiriche proposte da Galli (2000), solo con la scelta dei valori di  $a_g$  per un MRP di 2475 anni è possibile ottenere una lista di comuni comprensiva di tutte le aree suscettibili alla liquefazione.

I risultati conseguiti trovano una diretta collocazione nell'ambito degli studi di microzonazione sismica in Liguria. Per tutte le zone di attenzione alla liquefazione individuate dagli studi di MS di Livello 1, in tutti i comuni in cui non è possibile escludere la liquefazione dei suoli, appare ragionevole la verifica del potenziale di liquefazione secondo le indicazioni contenute nell'aggiornamento degli ICMS 2008 ["Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da liquefazione (LQ)"] recentemente proposto dal Dipartimento della Protezione Civile Nazionale.

In conclusione, si ricorda che i risultati ottenuti derivano da considerazioni esclusivamente sismologiche senza aver considerato in alcun modo le caratteristiche geotecniche locali. Al fine di completare l'analisi relativa alla suscettibilità di un sito alla liquefazione è necessario prendere in esame anche dati relativi alla litostratigrafia, alla granulometria, alla profondità della falda e alla resistenza dei terreni sotto carico ciclico. La valutazione delle caratteristiche

della successione litologica presso il sito investigato e la definizione della profondità media della falda acquifera sono ovviamente elementi che non possono essere trascurati all'interno di uno studio di MS al fine di individuare le zone di attenzione alla liquefazione.

### Bibliografia

- Albarello D.; 2012: *Design earthquake from site-oriented macroseismic hazard estimates*. Bollettino di Geofisica Teorica e Applicata, **53**, 7-17
- Barani S., Spallarossa D. and Bazzurro P.; 2009: *Disaggregation of Probabilistic Ground-Motion Hazard in Italy*. Bulletin of the Seismological Society of America, **99**, 2638-2661.
- Barani S., Spallarossa D., Bazzurro P. and Pelli F.; 2014: *The multiple facets of probabilistic seismic hazard analysis: a review of probabilistic approaches to the assessment of different hazards caused by earthquakes*. Bollettino di Geofisica Teorica e Applicata, **55**, 17-40.
- D'Amico V. and Albarello D.; 2008: *SASHA: a computer program to assess seismic hazard from intensity data*. Seismological Research Letters, **79**, 663-671
- Fortunato C., Martino S., Prestininzi A., Romeo R.W., Fantini A. and Sarandrea P.; 2012: *New release of the Italian catalogue of earthquake-induced ground failures (CEDIT)*. Italian Journal of Engineering Geology and Environment, **2**, 63-74.
- Galli; 2000: *New empirical relationships between magnitude and distance for liquefaction*. Tectonophysics, **324**, 169-187.
- Gruppo di lavoro MPS; 2004: *Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 del 20 marzo 2003*. Rapporto conclusivo per il dipartimento di Protezione Civile, INGV, Milano – Roma, aprile 2004, 65 pp. + 5 appendici, Internet web site: <http://zonesismiche.mi.ingv.it/elaborazioni/>.
- Gruppo di Lavoro MS; 2008: *Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica*. Conferenza delle Regioni e delle Provincie autonome, Dipartimento della Protezione Civile, Roma, 3 vol. and Cd-rom.
- Locati M., Camassi R. and Stucchi M.; 2011: *DBMI11, the 2011 version of the Italian Macroseismic Database*. Milano, Bologna, <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI11>, DOI: 10.6092/INGV.IT-DBMI11.