

APPROCCIO MULTI-LIVELLO PER LE VERIFICHE A LIQUEFAZIONE: UN'APPLICAZIONE ALL'ISOLA DI ISCHIA

Francesco Gargiulo, Anna d'Onofrio & Francesco Silvestri

DICEA, Università degli Studi di Napoli Federico II

francesco.gargiulo6@unina.it, anna.donofrio@unina.it, francesco.silvestri@unina.it

Sommario

Il presente studio si propone di valutare la suscettibilità alla liquefazione nell'area di tre comuni (Casamicciola, Lacco Ameno e Forio) dell'isola d'Ischia nel Golfo di Napoli (Italia), colpiti dal recente terremoto del 2017. Le zone costiere di questi comuni sono caratterizzate dalla predominanza di depositi granulari piroclastici saturi. La valutazione è stata effettuata attraverso un approccio multilivello, caratterizzato da un grado di dettaglio crescente, in termini di: definizione dell'azione sismica, accuratezza dei rilievi geologici e della caratterizzazione geotecnica, complessità dell'analisi, e significato ingegneristico dei parametri rappresentativi degli effetti. In primo luogo, sono stati individuati i depositi granulari superficiali sotto falda, potenzialmente liquefacibili, combinando in un Sistema Informativo Geografico (GIS) i dati sulla profondità media stagionale della falda freatica e sulla classificazione litologica dei depositi superficiali. In alcuni dei siti classificati come potenzialmente liquefacibili, laddove erano disponibili i risultati di prove penetrometriche SPT, sono state effettuate analisi semplificate utilizzando metodi semi-empirici (Boulanger & Idriss, 2014). I risultati di tali analisi hanno consentito di individuare un unico sito in corrispondenza del quale si è resa necessaria una valutazione di maggior dettaglio. Questa è stata eseguita attraverso analisi dinamiche "accoppiate" non lineari nel dominio del tempo con il codice SCOSSA (Tropeano et al., 2019). I risultati delle analisi accoppiate in termini di rapporto di sovrappressione interstiziale (r_u) hanno infine permesso la valutazione dei possibili effetti indotti dalla liquefazione nel sito in esame. Questa è stata espressa attraverso la determinazione del '*Induced Damage Parameter*' (Chiaradonna et al. 2020), correlato al cedimento di consolidazione post-sismico in condizioni *free-field*. La procedura adottata può costituire una valida proposta metodologica per valutazioni tempestive della suscettibilità alla liquefazione e per una stima preliminare del danno indotto.

1. Introduzione

Il 21 agosto 2017, un terremoto con epicentro a Casamicciola Terme ha colpito l'isola d'Ischia, un'isola vulcanica nel golfo di Napoli. Questo evento ha causato due morti e decine di feriti. Nonostante la bassa magnitudo, il sisma ha prodotto danni significativi in un'area molto limitata prossima all'epicentro, mentre anche a poca distanza dalla zona più danneggiata il terremoto è stato appena avvertito dalla gente del posto e dai turisti. La concentrazione dei danni in un'area circoscritta corrispondente al settore N-W dell'isola è stata già rilevata in occasione di altri tra i numerosi eventi che nei secoli scorsi hanno colpito l'isola (p.es. nel 1881 e nel 1883). In questa zona, che comprende i comuni di Casamicciola, Lacco Ameno e Forio, si è scelto di valutare la suscettibilità a liquefazione, in particolare nelle zone costiere ricoperte da terreni limo-sabbiosi sotto falda.

2. Geologia dell'isola

L'isola di Ischia rappresenta la sommità di un edificio vulcanico attivo costituito da rocce vulcaniche, da depositi di frana e, subordinatamente, da rocce sedimentarie, che derivano dall'accumulo e dalla cementazione di frammenti di rocce preesistenti, smembrate dai processi erosivi. Le rocce vulcaniche presenti sull'isola sono il prodotto di eruzioni sia effusive, che hanno formato colate e duomi di lava, sia esplosive, che hanno generato formazioni tufacee ed estese coltri di cenere e lapilli. L'estrema complessità delle formazioni, già evidenziata nel corso degli studi di Microzonazione sismica dei comuni colpiti dal sisma del 2017 (Toscano et al. 2019), è stata opportunamente semplificata nella carta geologico-tecnica riportata in Figura 1a (Alleanza et al. 2021). A causa la modalità di messa in

posto dei depositi e le vicissitudini vulcano-tettoniche che hanno interessato l'isola, le modalità del flusso idrico sotterraneo sono notevolmente complicate. La Figura 1b riporta la carta della profondità media stagionale della falda dal piano campagna illustrata nel dettaglio da Piscopo et al. (2019).

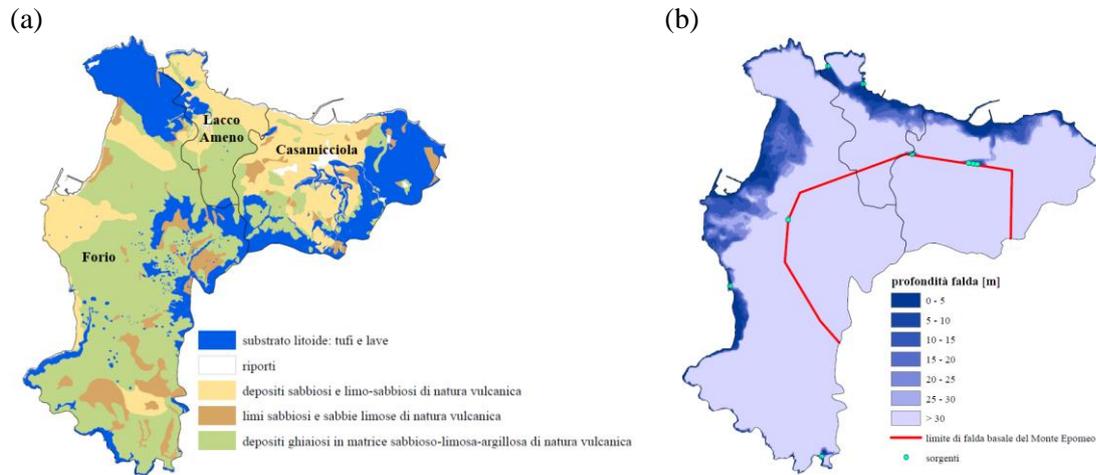


Fig 1. (a) Carta geologico-tecnica del settore NW dell'isola di Ischia (modificata da Toscano et al. 2019) e (b) carta della profondità della falda (in m) della stessa area (modificata da Piscopo et al. 2019)

3. Analisi semplificate

Incrociando le informazioni provenienti dalla carta geologico-tecnica e da quella rappresentativa delle profondità della falda dal piano campagna, è stato possibile perimetrare i siti potenzialmente liquefacibili, cioè quelli caratterizzati da coperture superficiali di terreni granulari e da profondità della falda minore di 15m (Figura 2). Le aree suscettibili corrispondono per lo più alle zone costiere dei tre comuni analizzati. In tali aree sono stati reperiti i risultati di 33 prove penetrometriche dinamiche standard (la cui ubicazione è riportata nella carta di Figura 2), in corrispondenza delle quali sono state condotte analisi semplificate utilizzando i metodi semi-empirici (Boulanger & Idriss, 2014).

Il fattore di sicurezza (*FS*) per le verifiche a liquefazione è definito come il rapporto tra capacità (stimata, nel caso in esame, a partire dai risultati di prove SPT) e domanda. Tipicamente, sia la capacità che la domanda sismica sono valutate in termini di rapporti di sollecitazione ciclica (*CRR* - *Cyclic Resistance Ratio* e *CSR* - *Cyclic Stress Ratio*).

$$FS = \frac{CRR}{CSR} = \frac{CRR_{M=7.5, \sigma'_v=1}}{CSR} \cdot MSF \cdot K_\sigma \cdot K_\alpha \quad (1)$$

dove *MSF* è un fattore di scala della magnitudo, introdotto per tenere conto dell'effetto della durata dell'evento sismico, *K_σ* e *K_α* sono fattori correttivi per tenere conto rispettivamente dello stato tensionale diverso da 100 kPa e della pendenza del piano campagna.

La domanda sismica, *CSR*, viene solitamente valutata adottando un approccio pseudostatico esprimendola come:

$$CSR = 0.65 \cdot \frac{\tau_{max}}{\sigma'_v} = 0.65 \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma'_v}{\sigma'_v} \cdot r_d \quad (2)$$

in cui il prodotto $\frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma'_v}{\sigma'_v}$ rappresenta lo sforzo tangenziale massimo alla generica profondità *z* nell'ipotesi di colonna di terreno rigido, ricondotto a una tensione tangenziale equivalente attraverso il coefficiente 0.65 che porta in conto la variabilità nel tempo della sollecitazione ciclica. La deformabilità del terreno è invece tenuta in considerazione attraverso il coefficiente *r_d* che è un fattore di riduzione dello sforzo di taglio. In questo studio l'accelerazione massima è stata valutata come prodotto tra l'accelerazione di riferimento su affioramento rigido orizzontale associata ad una

probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni e un fattore di amplificazione FA calcolato come segue:

$$FA = S_s \cdot S_T \quad (3)$$

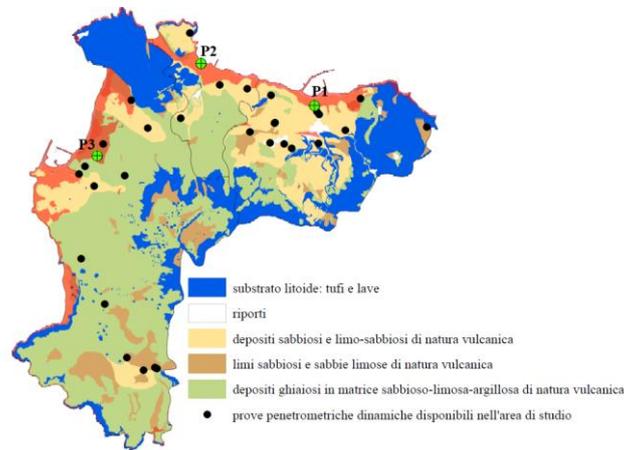


Fig 2. Zonazione di livello 1 della suscettibilità a liquefazione. In rosso le zone potenzialmente liquefacibili; i simboli verdi indicano l'ubicazione delle prove SPT all'interno delle zone liquefacibili

Nella (3) S_s è il coefficiente di amplificazione stratigrafico, determinato in funzione della categoria di sottosuolo (che nei depositi considerati dalla mappa di Forte et al., 2019 risulta sempre B o C); S_T è il coefficiente di amplificazione topografico, pari all'unità nei siti analizzati, caratterizzati da pendenze inferiori a 15° .

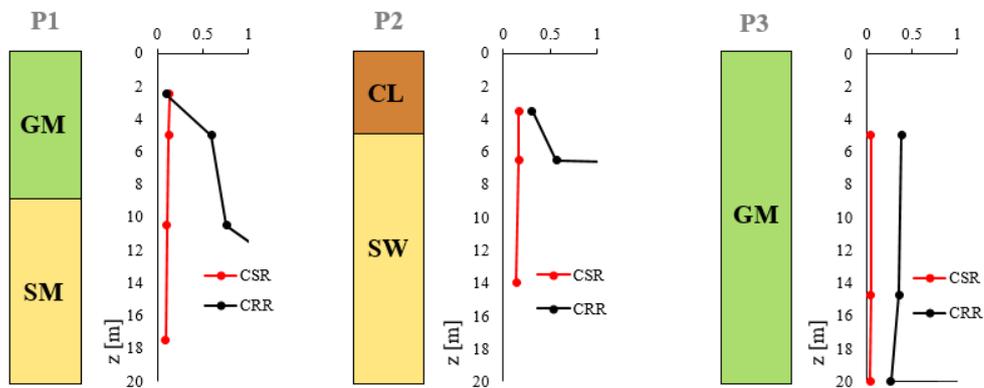


Fig 3. Risultati dell'analisi semplificata nel sito P1. Depositi eterometrici ed eterogenei di natura piroclastica (GM), depositi sabbiosi eterometrici di natura piroclastica (SM), sabbie pulite e ben assortite (SW), argille inorganiche di plasticità medio-bassa (CL).

In Figura 3 sono riportati i risultati delle verifiche semplificate condotte per le tre verticali caratterizzate da valori della resistenza penetrometrica normalizzata $(N_1)_{60}$ minore di 30, valore soglia oltre il quale, secondo l'esperienza internazionale e le prescrizioni di normativa nazionale (NTC 2018) i terreni sono ritenuti non liquefacibili. Come si può notare, le analisi semplificate prevedono liquefazione in corrispondenza dei livelli più superficiali della verticale P1, che ricade nella zona costiera del comune di Casamicciola, dove un materiale piuttosto assortito poco addensato (GM) poggia su un deposito costiero di sabbie limose (SM). In corrispondenza di questa stessa verticale si è quindi deciso di procedere con un'analisi avanzata di tipo accoppiato.

4. Analisi dinamiche

Sono state effettuate analisi dinamiche monodimensionali non lineari nel dominio del tempo con il codice SCOSSA (Tropeano et al. 2019), che consente di quantificare l'entità delle sovrappressioni interstiziali indotte dal sisma. Esso implementa un modello costitutivo basato su un numero relativamente ridotto di parametri, di chiaro significato fisico e ottenibili mediante interpretazione diretta di prove cicliche e dinamiche di laboratorio. La stratigrafia e il modello geotecnico del sito (Figura 4) sono stati ricostruiti a partire dalla definizione delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS) e dalle analisi di risposta locale condotte nell'ambito della microzonazione sismica di terzo livello del comune di Casamicciola (Toscano et al. 2019; Alleanza et al. 2021).

Al fine di eseguire le analisi dinamiche in tensioni efficaci, il codice SCOSSA richiede la descrizione del comportamento ciclico non drenato dei terreni liquefacibili attraverso la curva di resistenza ciclica e la relazione che descrive l'accumulo in funzione del numero di cicli del rapporto r_u tra la variazione di pressione interstiziale Δu e la tensione verticale efficace.

Non disponendo ancora di risultati sperimentali di prove di resistenza ciclica sui terreni sabbiosi in esame, il comportamento ciclico non drenato di questi ultimi (GM e SM), è stato caratterizzato adottando la curva di resistenza ciclica e la legge d'accumulo di r_u ottenute da prove triassiali cicliche su terreni piroclastici del napoletano con granulometria simile (Licata, 2015).

In conformità agli studi di microzonazione sismica pregressi, sette diversi accelerogrammi (cfr. Tabella I) sono stati selezionati come moti di riferimento al *bedrock* per le analisi dinamiche, scalandoli in ampiezza in modo che lo spettro di risposta medio risulti compatibile con quello di normativa (NTC 2018) relativo allo stato limite di salvaguardia della vita SLV (tempo di ritorno $T_R=475$ anni) nell'intervallo di periodi compreso fra 0.1s e 1.1s.

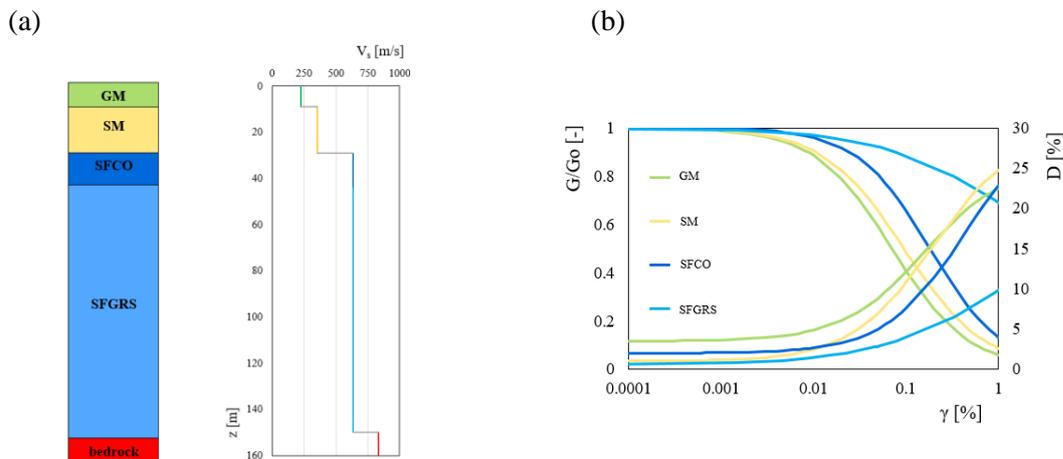


Fig 4. Modello geotecnico di sottosuolo con profilo di velocità delle onde di taglio (a) e curve di variazione di rigidezza e smorzamento con la deformazione a taglio risultante da prove cicliche di laboratorio (b).

Tabella I. Accelerogrammi di input per analisi dinamiche

I	nome evento	comune	data e ora	M_w	distanza epicentrale	profondità ipocentrale	classe di sottosuolo
					[km]	[km]	
1	NORTHERN_ITALY	Casola in Lunigiana (Toscana)	30/06/2013 14:40	4.5	3	6.1	A*
2	COSENZA	Mormanno (Calabria)	25/10/2012 23:05	5.2	2.4	9.7	A*
3	SICILY_ITALY	Viagrande (Sicilia)	26/12/2018 02:19	4.9	4.5	/	A
4	SICILY_ITALY	Linguaglossa (Sicilia)	08/01/2019 23:50	4.1	1.2	2.2	N/A
5	SICILY_ITALY	Linguaglossa (Sicilia)	08/01/2019 23:50	4.1	1.2	2.2	N/A
6	CENTRAL_ITALY	Fossa (Abruzzo)	07/04/2009 17:47	5.5	3.4	17.1	A*
7	CENTRAL_ITALY	Castel Sant'Angelo sul Nera (Marche)	26/10/2016 17:10	5.4	15.2	8.1	A*

La Figura 5 riporta i risultati in termini di r_u per ognuno degli accelerogrammi. I risultati mostrano sempre significativi valori di sovrappressione interstiziale attinti negli strati liquefacibili, anche se raramente si raggiungono le condizioni di liquefazione.

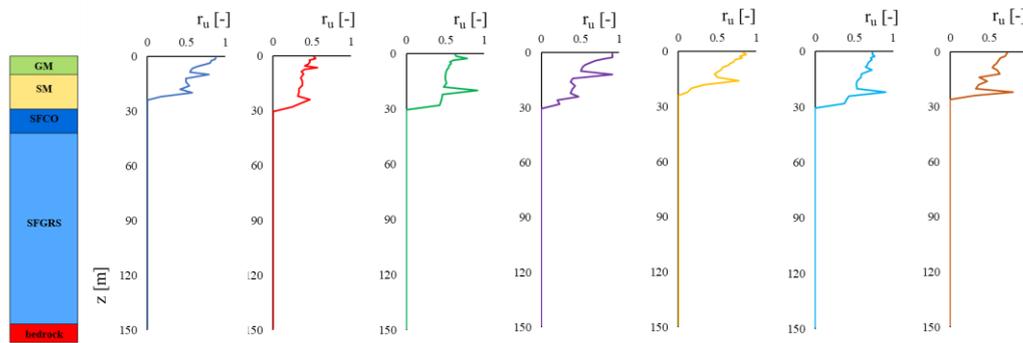


Fig 5. Risultati dell'analisi di risposta sismica locale in tensioni efficaci in termini di r_u

Per una preliminare quantificazione degli effetti indotti dall'insorgere delle pressioni neutre è stato infine calcolato l'indicatore I_{AM} , detto parametro di danno indotto, proposto da Chiaradonna et al. (2020). Questo indicatore è direttamente correlato al cedimento da consolidazione primaria che si verifica alla fine dello scuotimento sismico per effetto della dissipazione delle sovrappressioni. Esso può essere espresso in funzione di r_u , attraverso la seguente espressione:

$$I_{AM} = \frac{0.003}{(1 + z_{min})^{0.3}} \cdot \int_{z_{min}}^{z_{max}} \frac{r_u(z)}{1 - r_u(z)} dz \quad (4)$$

dove z_{min} e z_{max} sono, rispettivamente, la minima e la massima profondità dello strato di terreno saturo liquefacibile. Si riportano in Figura 6 i risultati in termini di indice di danno indotto, I_{AM} , calcolato per effetto di ciascuno degli accelerogrammi.

I valori dell'indice di danno, confrontati con i valori di soglia definiti da Chiaradonna et al. (2020) per la classificazione del danno indotto, evidenziano che un terremoto con una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni può indurre nel sito in esame un danno moderato ($0.1 \leq I_{AM} \leq 0.3$) associato al fenomeno della liquefazione.

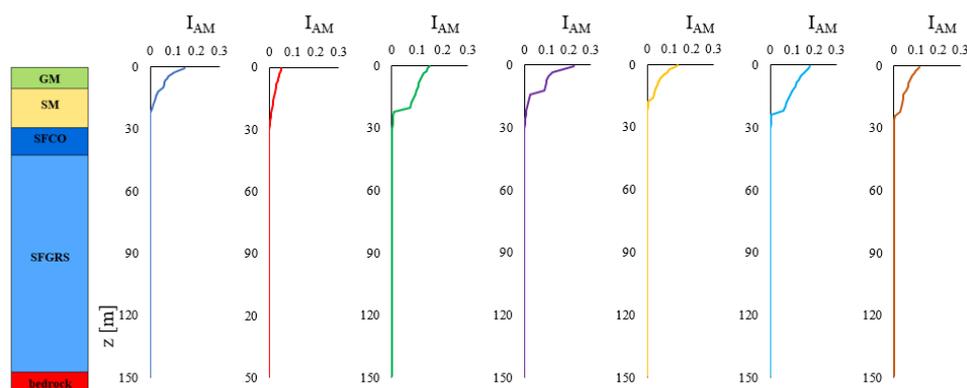


Fig 6. Profili del parametro di danno (I_{AM})

5. Conclusioni

È stata adottata una metodologia multilivello per la valutazione della suscettibilità alla liquefazione dei comuni ischitani colpiti dal sisma del 2017. Dall'applicazione di tale metodologia si è evinto che le zone suscettibili sono limitate alle aree costiere, dove sono disponibili pochi dati sperimentali per poter procedere all'applicazione di approcci di maggior dettaglio. Sulla base degli esigui dati reperiti è Francesco Gargiulo, Anna d'Onofrio & Francesco Silvestri

stato possibile condurre alcune analisi con metodi semi-empirici che hanno consentito di riclassificare alcuni dei siti inizialmente identificati come liquefacibili. Su un'unica verticale ben caratterizzata è stato possibile adottare un approccio avanzato che ha consentito anche di quantificare l'entità dei possibili effetti indotti dalla liquefazione.

La procedura seguita può essere una proposta valida e relativamente speditiva per la valutazione della suscettibilità alla liquefazione ma anche per una preliminare valutazione del danno indotto. Nel caso specifico, la procedura proposta è stata finora applicata in un numero limitato di siti a causa della esigua disponibilità di dati sperimentali. Per esprimersi in maniera più affidabile sull'eventualità di fenomeni di liquefazione sismica nell'isola d'Ischia, sono state previste ulteriori indagini proprio nell'area circostante il sito qui esaminato, per poter perimetrare con una maggiore accuratezza le aree individuate come potenzialmente suscettibili a liquefazione.

Ringraziamenti

Questo studio è stato realizzato nell'ambito del Progetto *'MASLIDE - Multi-level Approach for the Study of Landslides Induced by Earthquakes'* supportato dai fondi di Finanziamento della Ricerca di Ateneo e sostenuto del Commissario straordinario di Governo per gli interventi nei territori dell'Isola di Ischia interessati dagli eventi sismici del 21 agosto 2017.

Bibliografia

- Alleanza G. A., d'Onofrio A., Gargiulo F., Silvestri F., Mancini M., Gaudiosi I., Cacioli M., Cavuoto G., Di Fiore V., Milana G., Vassallo M. (2021). Valutazione della risposta sismica locale di alcune aree dell'Isola di Ischia per la pianificazione di interventi di mitigazione del Rischio Sismico. *XXVII Convegno Nazionale di Geotecnica "La geotecnica per lo sviluppo sostenibile del territorio e per la tutela dell'ambiente"*, Reggio Calabria 9-11/02/2022.
- Boulangier R. W., Idriss I. M. (2014). CPT and SPT based liquefaction triggering procedures. *Center for geotechnical modeling*, Davis (California), 1-134
- Cavinato G.P., Mancini M., Scarascia Mugnozza G., Working Group (2018). Primi interventi urgenti di protezione civile conseguenti all'evento sismico che ha interessato il territorio dei comuni di Casamicciola Terme, di Forio e di Lacco Ameno dell'Isola di Ischia il giorno 21 agosto 2017, *OCDP n. 476 del 29 agosto 2017* CNR IGAG, Roma, relazione finale (con appendici e tavole allegate).
- Chiaradonna A., Lirer S., Flora A. (2020). A liquefaction potential integral index based on pore pressure build-up. *Engineering Geology*, 272, 1-13.
- Forte G., Chioccarelli E., Falco M., Cito P., Santo A., Iervolino I. (2019). Seismic soil classification of Italy based on surface geology and shear-wave velocity measurements. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 122, 79-93.
- Licata V. (2015). A laboratory and field study on cyclic liquefaction of a pyroclastic soil. *Tesi per il conseguimento del titolo di dottore di ricerca in Ingegneria Geotecnica* - Università degli studi di Napoli Federico II
- Piscopo V., Lotti V., Formica F., Lana F., Pianese L. (2019). Groundwater flow in the Ischia volcanic island (Italy) and its implications for thermal water abstraction. *Hydrogeology Journal*, 28, 1-23.
- Toscano A., Cuccurullo F., D'Anna A. (2019). Microzonazione sismica di III livello del Comune di Casamicciola Terme. *Relazione Illustrativa*. Piano degli studi di microzonazione sismica di III livello dei Comuni di Casamicciola Terme, Lacco Ameno e Forio, ai sensi del D.L. 28 settembre, 109 art 18, comma 1, lettera h (con tavole allegate).
- Tropeano G., Chiaradonna A., d'Onofrio A., Silvestri F. (2019). A numerical model for non-linear coupled analysis of the seismic response of liquefiable soils. *Computers and Geotechnics*, 105, 21