

## Abstract

In sismologia i metodi tradizionali per lo studio della struttura della Terra si basano su informazioni che possono essere estratte dalle onde emesse da sorgenti sismiche quali terremoti o esplosioni. Informazioni utili sull'interno della Terra possono essere contenute anche in sorgenti di rumore sismico ambientale. Negli ultimi 15 anni l'interesse in questi metodi alternativi si è ampliato in quanto risultano essere particolarmente vantaggiosi sia per motivi economici sia perché permettono di superare i limiti delle tecniche tradizionali. Tali metodi, infatti, offrono l'opportunità di studiare aree in assenza di sorgenti naturali o artificiali e possono essere usati per valutare la risposta asismica del sottosuolo. Le correlazioni delle tracce di rumore sismico ambientale permettono di ricostruire la risposta della Terra agli impulsi (Funzione di Green) tra due ricevitori immaginando che ad uno di essi agisca una sorgente. Da queste informazioni è possibile ricostruire le proprietà elastiche del mezzo di propagazione in termini di variazioni di velocità spaziali e temporali delle onde sismiche che lo attraversano, realizzando una tomografia da analisi di rumore sismico. Le variazioni di velocità nel mezzo di propagazione sono strettamente legate ai meccanismi fisici di innesco dei processi sismici naturali o indotti.

Lo scopo di questa tesi è quello di applicare i metodi basati sull'analisi di rumore sismico ambientale alle aree in cui si svolgono le operazioni industriali per l'esplorazione e lo sfruttamento delle georisorse. Le tecnologie energetiche possono originare diversi rischi ambientali tra cui il rischio sismico, quindi l'applicazione di metodi efficienti può migliorare la capacità di monitorare e ridurre i rischi sismici in aree specifiche.

Il lavoro di tesi è stato svolto nell'ambito del progetto triennale S4CE (Science For Clean Energy), iniziato nel 2017 e finanziato dal programma di ricerca e innovazione Horizon 2020 dell'Unione Europea (<https://science4cleanenergy.eu/>). Questo consorzio multidisciplinare è stato istituito per migliorare le conoscenze in vari campi sui meccanismi riguardanti le attività svolte per lo sfruttamento delle risorse energetiche del sottosuolo allo scopo di poter meglio monitorare, quantificare e ridurre i rischi ambientali che ne possono derivare. L'Università degli Studi di Salerno è stato uno dei partner principali occupandosi della gestione dei dati sulla microsismicità e dello studio della sismicità indotta. Questo lavoro di tesi, inoltre, fa parte del progetto triennale MATISSE (Methodologies for the Assessment of anthropogenic environmental hazard: Induced Seismicity by Sub-surface geo-resources Exploitation) finanziato dal Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca (PRIN 2017) e coordinato dall'Università degli Studi di Salerno. Il progetto iniziato nel 2019 è stato sviluppato allo scopo di rilevare e quantificare i potenziali rischi ambientali legati allo sfruttamento delle geo-energie sub-superficiali.

Sono state analizzate le registrazioni in continua di rumore di due siti in cui sono state implementate diverse tecnologie energetiche per lo sfruttamento delle loro georisorse. Questo ha permesso di testare la metodologia per tipi di aree e operazioni industriali diverse, valutandone le differenze e i limiti. Una delle aree di studio è il sito di shale gas di Wysin, appartenente alla concessione Stara Kiszewa della Polish Oil and Gas Company (PGNiG) nella regione della Pomerania della Polonia settentrionale. In questa regione, le operazioni di esplorazione e sfruttamento dell'idrocarburo sono state condotte nel 2016 utilizzando la tecnica dell'idrofratturazione. L'analisi di cross-correlazione su due mesi di registrazione in continua di rumore eseguita per indagare il mezzo di propagazione del sito di Wysin mostra onde di Rayleigh coerenti con un'energia significativa nella banda di frequenza 1.5-2.0 Hz. Il segnale energetico si propaga con una velocità stimata di circa 400 m/s e può essere considerato ragionevolmente stabile nel tempo. Le informazioni ottenute dall'analisi di cross-correlazione sono state utilizzate per eseguire inversioni tomografiche con due approcci diversi e ricostruire il modello di velocità 2-D delle onde di superficie del mezzo. Con il metodo che utilizza i tempi di arrivo delle onde di superficie letti sulle funzioni di cross-correlazione stacked (FMST, Rowlinson and Sambridge, 2005), è stata ottenuta una tomografia a frequenza fissa nell'intervallo 1.5-2.0 Hz permettendo un'indagine del mezzo fino ad una profondità massima di circa 70 m. Utilizzando per l'inversione dei dati un approccio multiscala non lineare (MANgOSTA, Cabrera-Pérez et al. 2020), le curve di dispersione che si ricavano dalle cross-correlazioni sono state

ottenute dall'analisi frequenza-tempo (FTAN). Le immagini tomografiche sono state recuperate per nove periodi nell'intervallo 0.3-1.20 s, permettendo di raggiungere una profondità di indagine di circa 150 m.

Il secondo sito studiato è uno dei test fields del progetto europeo S4CE, situato a San Gallo nella Svizzera settentrionale. Quest'area è stata coinvolta in un progetto di energia geotermica profonda per la produzione di energia utilizzando l'acqua nelle falde acquifere ad una profondità di oltre 4 km. Il progetto è stato realizzato nel 2013 dalla società di servizi pubblici di San Gallo (Sankt Galler Stadtwerke) in prossimità di una zona di faglia esistente che offre una maggiore permeabilità a favore delle attività industriali. Per questo sito, l'analisi di cross-correlazione di tre mesi di registrazioni in continua del rumore mostra una fase coerente ben identificata nella banda di frequenza 0.5-0.9 Hz. Il segnale predominante risulta stabile nel tempo e si propaga con una velocità stimata di circa 1750 m/s. L'inversione tomografica dei tempi di viaggio delle onde di superficie derivate dalle funzioni di cross-correlazione impilate nella gamma 0.5-1.1 Hz esplora il mezzo fino a circa 1.2 km.

Quando si studiano aree in cui l'attività antropica legata allo sfruttamento delle risorse del sottosuolo può generare sismicità indotta, è essenziale aumentare il rilevamento di eventi deboli per migliorare la conoscenza della sismicità della zona e le conseguenze correlate. In sismologia, quando si ha a che fare con registrazioni a basso rapporto segnale-rumore, i metodi tradizionali di rilevamento degli eventi sono spesso incapaci di riconoscere tutti gli eventi deboli nascosti nel rumore sismico. Le tecniche di machine learning possono essere uno strumento utile per migliorare il rilevamento automatico degli eventi riconoscendo la somiglianza tra gli eventi. In questo studio, viene effettuata l'implementazione di un sistema di rilevamento automatico basato sull'analisi della forma d'onda per le registrazioni del sito geotermico profondo di San Gallo. È stata eseguita l'applicazione di un rilevamento automatico degli eventi utilizzando un algoritmo di rete neurale non supervisionato testando le registrazioni di una stazione a basso segnale-rumore. I risultati sono promettenti nel discriminare gli eventi dal rumore e nel raggruppare gli eventi in base ad alcune delle loro caratteristiche principali come la grandezza e la posizione.