



UNIVERSA
UNIVERSIS
PATAVINA
LIBERTAS

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI GEOSCIENZE
Via Gradenigo 6
35131 Padova

Committente: **STOGIT spa**

Oggetto: *Validazione della ottemperanza agli indirizzi e linee guida per i monitoraggi sito di stoccaggio di **SEGNANO (CR)***

ODL: Nr. 7800088792 del 27.10.2022
Contratto 5000004501 (CIG 8635734124)

Esecutore: **Università degli Studi di Padova** (fornitore 148988)

Periodo attività: **Ottobre 2022-Gennaio 2023**

Report Tecnico

Validazione della rete microsismica di superficie di **SEGNANO (CR)** e relativo workflow di analisi dati.



Referenti scientifici di Progetto:

- *Prof. Jacopo Boaga*
- *Prof. Lapo Boschi*

*Redatto in: Padova
il: 25-01-2023*

pagine: 24



UNIVERSA
UNIVERSIS
PATAVINA
LIBERTAS

Contenuto del Report

1. Introduzione e descrizione dei lavori	pg.3
2. Validazione strumentazione installata	pg.6
3. Validazione dei sistemi di analisi	pg.11
4. Validazione delle performance della rete	pg.13
5. Conclusioni	pg.19
6. Suggerimenti di implementazione	pg.21
7. Bibliografia	pg.23
8. Allegato 1	pg.24



UNIVERSA
UNIVERSIS
PATAVINA
LIBERTAS

1. Introduzione e descrizione dei lavori

Stogit S.p.A. (ora in avanti ‘*committenza*’) ha richiesto al gruppo di Geofisica del Dipartimento di Geoscienze dell’Università degli Studi di Padova una validazione della propria rete microsismica installata presso la Concessione di Stoccaggio di Sergnano (CR), nel rispetto degli Indirizzi e Linee Guida (di seguito ILG) emessi dal Ministero dello Sviluppo Economico (Mise - Novembre 2014 -<https://unmig.mise.gov.it/index.php/it/sicurezza/geomonitoraggi/linee-guida> -), ed in accordo con gli esiti della sperimentazione degli ILG stessi effettuata nella concessione “Minerbio Stoccaggio”, come riportato nelle relazioni pubbliche finali prodotte da INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia), che per tale progetto ha ricoperto il ruolo di Struttura Preposta al Monitoraggio (SPM).

Si sottolinea che le linee guida suddette si riferiscono principalmente ad attività antropiche di re-iniezione per campi di stoccaggio *onshore*, e che forniscono indicazioni anche al monitoraggio della deformazione del suolo e pressioni di poro, che non sono oggetto del presente studio.

Si premette che gli ILG, attualmente, non hanno valenza prescrittiva per i campi di stoccaggio e la loro applicazione non è quindi vincolante. Inoltre, gli ILG prevedono che siano condotte delle sperimentazioni su campi pilota (uno di stoccaggio, uno di produzione primaria e uno geotermico). Stogit in accordo con il Ministero dello Sviluppo Economico e la Regione Emilia-Romagna ha sperimentato gli ILG su un proprio campo di stoccaggio (Minerbio) per oltre due anni. I risultati della sperimentazione



UNIVERSA
UNIVERSIS
PATAVINA
LIBERTAS

saranno utilizzati come elemento integrativo rispetto agli ILG, per tale motivo i risultati sono stati considerati per redigere il presente rapporto.

Gli ILG forniscono precise indicazioni riguardo al monitoraggio sismico da eseguire in campi di stoccaggio, descrivendo i volumi interessati dalle attività (suddiviso in dominio interno e dominio esteso) al fine di rilevare, localizzare e determinare i principali parametri di sorgente della sismicità e microsismicità verificatasi nei domini di rilevazione. Le aree di indagine sono così definite:

Dominio Interno di rilevazione (DI) – Definisce il volume all'interno del quale si ritiene che possano verificarsi fenomeni di sismicità indotta o di deformazione del suolo associati all'attività svolta. Esso rappresenta il volume di riferimento per il quale saranno identificati, monitorati e analizzati con la massima sensibilità i fenomeni di sismicità e deformazione del suolo. Per le attività di stoccaggio, è il volume che comprende la zona mineralizzata (giacimento usato per lo stoccaggio), come ricostruita dallo studio geologico preliminare, e un'ulteriore fascia nell'intorno del giacimento fino ad una distanza di 2-3 km, in funzione dell'estensione del giacimento.

Dominio Esteso di rilevazione (DE) – È il volume circostante il Dominio Interno di rilevazione che comprende una porzione di sottosuolo, al fine di definire e contestualizzare al meglio i fenomeni monitorati. Per tutte le attività si suggerisce che esso si estenda oltre il Dominio Interno di rilevazione per una fascia di ampiezza compresa tra 5-10 km, tenendo conto delle dimensioni del giacimento e della tipologia di attività.

Si precisa che per il giacimento di Sergnano, di cui la committenza dispone di una elevata quantità di studi dettaglio prodotti anche precedentemente al periodo di attività, sono state considerate valide le distanze di 2 km per il Dominio interno e di 5 km per il Dominio esteso.



UNIVERSA
UNIVERSIS
PATAVINA
LIBERTAS

L'estensione dei domini considerata da Stogit, in accordo con i limiti minimi indicati negli Indirizzi e Linee Guida, risulta correttamente valutata in quanto:

- l'area risulta ben conosciuta e dotata di:
 - modello geologico-strutturale del sottosuolo ad alta risoluzione. Tali dati definiscono in modo robusto l'assetto strutturale dell'intera area di interesse e sulla base dei quali è stato progettato il sistema di monitoraggio microsismico del campo;
 - modelli statici e dinamici del giacimento;
 - studi geomeccanici di dettaglio e a scala regionale;
- l'attività di stoccaggio di gas naturale non prevede l'iniezione di fluidi incompressibili (a tal proposito è stato espresso un chiarimento dalla commissione relatrice degli ILG).

Gli ILG richiedono che le reti di monitoraggio sismico siano in grado di i) nel dominio interno di rilevazione: rilevare e localizzare i terremoti a partire da magnitudo locale ML compresa tra 0 e 1 ($0 \leq ML \leq 1$, con incertezza nella localizzazione dell'ipocentro di alcune centinaia di metri); ii) nel dominio esteso di rilevazione: migliorare di circa 1 unità il livello di magnitudo di completezza delle rilevazioni effettuate dalle reti nazionali o regionali che svolgono servizio di monitoraggio sismico per finalità di protezione civile (con incertezza nella localizzazione dell'ipocentro contenuta entro circa 1 km); iii) determinare l'accelerazione e la velocità del moto del suolo provocata da eventuali terremoti (deboli e forti) presso i punti di misurazione; iv) integrarsi opportunamente con le reti di monitoraggio esistenti. Per tali scopi le linee guida suggeriscono l'impiego di



UNIVERSA
UNIVERSIS
PATAVINA
LIBERTAS

sensori triassiali di tipo accelerometrico e velocimetrico, con interdistanza di 3-5 km, sia a corto periodo che a banda estesa, con specifiche frequenze di campionamento a 200 e 100 Hz rispettivamente per sismometri ed accelerometri. È raccomandato dalle ILG di implementare un flusso *quasi real-time* dei dati di monitoraggio alla centrale operativa di gestione, con particolare accortezza all'analisi del rumore ambientale, alla limitazione massima di possibili interruzioni di registrazione, e di prevedere la verifica e periodica manutenzione della strumentazione installata. Le procedure di detezione e localizzazione devono infine utilizzare comprovati metodologie in uso alla comunità sismologica, basate su modelli di velocità rappresentativi del sottosuolo in esame.

Il lavoro di verifica è stato sviluppato in 3 distinte fasi atte a descrivere con completezza le performance della rete di monitoraggio: 1) sopralluogo e validazione della strumentazione utilizzata in sito; 2) validazione dei sistemi di analisi utilizzati; 3) validazione delle performance della rete installata.

2 - Validazione strumentazione installata

La committenza ha fornito agli scriventi tutta la documentazione inerente alla installazione, monumentazione e manutenzione della strumentazione utilizzata presso il campo di stoccaggio di Sergnano (CR), comprensiva della evoluzione storica della rete sino al periodo di attività di questo progetto. La documentazione fornita ha previsto le schede di installazione e le caratteristiche tecniche della strumentazione, così come certificate dai produttori. La verifica della strumentazione ha previsto anche un sopralluogo sul sito da parte di personale dell'Università degli Studi di Padova avvenuto il



UNIVERSA
UNIVERSIS
PATAVINA
LIBERTAS

10/11/2022, al fine di prendere visione degli strumenti di rilevazione installati sia in superficie che in pozzetti a 150 m di profondità (fig.1).



Fig. 1 Stazione Cr 01 installate presso sito di stoccaggio Sergnano esaminata durante sopralluogo effettuato in data 10/11/2022.

La rete di monitoraggio di Sergnano è composta da 5 stazioni dotate di sismometri installati in pozzetti a 150 m di profondità e da 1 stazione con sismometri installato in superficie (fig.2).



UNIVERSA
UNIVERSIS
PATAVINA
LIBERTAS

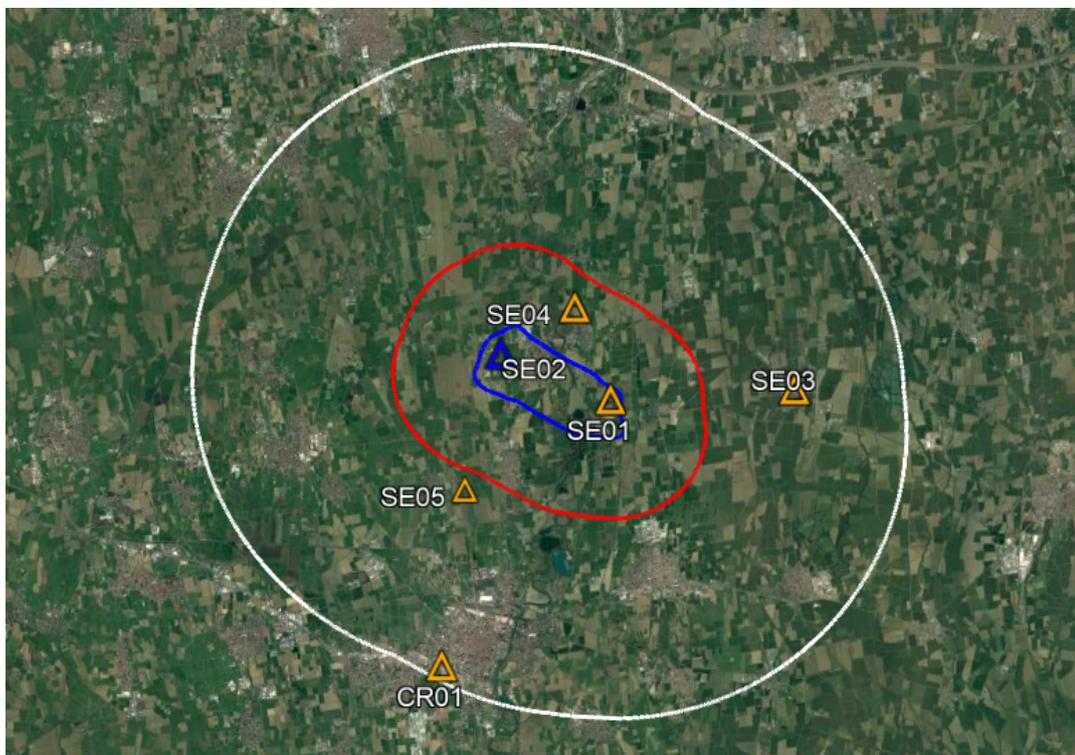


Fig. 2 Geometria della rete di Sergnano, in blu proiezione del gas water contact, in rosso Dominio Interno di Rilevazione, in bianco Dominio Esteso di Rilevazione. Triangoli blu: ubicazione delle stazioni di superficie; in arancione: ubicazione delle stazioni in pozzetto.

Attualmente la rete impiega sismometri a corto periodo a 3 canali Sara , Lennartz e acquisitori Solgeo Dymas24. Nello specifico la rete impiega sensori SARA SS10BH (SE03, SE04, SE05, CR01), Lennartz L3D/BH (stazione SE01), Lennartz MKIII (SE02) ed accelerometro SARA SA10 (stazione SE02). La modalità di trasmissione dati è stata nel tempo aggiornata secondo i più comuni standard sismologici *real-time*, secondo protocolli *Seed-link*. La frequenza di campionamento di ogni stazione è di 200 Hz (sia nel caso di installazione del sensore a piano campagna sia nel caso di installazione del sensore in pozzetti in



UNIVERSA
UNIVERSIS
PATAVINA
LIBERTAS

profondità), così come suggerito dagli ILG per le stazioni microsismiche di superficie. Non sono installate stazioni a banda estesa.

In relazione alla strumentazione installata in campo, rispetto a quanto suggerito dagli ILG, si precisa che gli esiti della sperimentazione effettuata sul campo di Minerbio da INGV hanno evidenziato che:

- la corretta ubicazione delle stazioni in aree a basso rumore ambientale garantisce una buona performance della rete di monitoraggio, prediligendo l'installazione di stazioni in pozzetto ove ve ne sia la necessità;
- l'installazione di accelerometri per ogni stazione comporta uno scarso valore aggiunto delle performance di rete. Di seguito si riporta estratto della relazione pubblica di INGV sopra citata: *“Pur comprendendo che un approccio cautelativo potrebbe suggerire di installare sensori accelerometrici in ogni postazione (per evitare fenomeni di saturazione per eventi anche di moderata magnitudo se a distanza chilometrica), considerando le relativamente basse distanze tra le varie stazioni, sembrerebbe sufficiente poter disporre di un unico accelerometro, specie se posizionato nel D1”*. Questo perché la finalità del monitoraggio microsismico è rivolta alle basse magnitudo, caratterizzate quindi da bassi valori di accelerazione calcolabili dai velocimetri stessi. A fronte dell'occorrenza di fenomeni sismici ad elevata magnitudo si ritiene sufficiente l'installazione di un solo accelerometro ad elevata dinamica per campo. Attualmente in Sergnano è presente una stazione dotata di accelerometro.



UNIVERSA
UNIVERSIS
PATAVINA
LIBERTAS

- in merito all'installazione di un sensore broadband, si ritiene questa più indicata alla rivelazione e distinzione di eventi sismici a grande distanza (telesismi) e non di microsismi locali che sono il principale oggetto della rete di monitoraggio. A supporto si riporta l'estratto della relazione pubblica di INGV sopra citata: *“In particolare, non sembra necessario attrezzare tutti i siti con sensori broadband e accelerometrici. Tra l'altro, in questi contesti, siamo generalmente interessati a rilevare eventi sismici di bassa magnitudo, caratterizzati da un contenuto in alta (e non in bassa) frequenza. Inoltre, la detezione automatica dei segnali viene ad esempio effettuata a partire da 1 o 2 Hz e, generalmente, se si è in possesso di una registrazione con contenuto spettrale in bassa frequenza, si opera un filtraggio passa alto prima di procedere alla lettura delle varie fasi nel picking dei segnali”.*

Le stazioni sono autonome per approvvigionamento energetico, alimentate da batterie 12V caricate da pannelli solari di sufficiente estensione o, dove possibile, direttamente connesse alla rete elettrica. Nello specifico le stazioni SE01, SE02 e CR01 sono collegate alla rete elettrica, mentre le restanti stazioni sono alimentate a pannelli solari. La manutenzione dei complessi di alimentazione-sensoristica e trasmissione del dato appare puntuale, come dimostrato dai numerosi report di manutenzione fornitori. Appare particolarmente efficace la scelta di affidamento della revisione e manutenzione delle stazioni ad un'unica ditta di comprovata esperienza nel settore. Sono presenti sistemi automatici di *alert* in caso di malfunzionamento. La trasmissione dati è real-time e consente una rapida



UNIVERSA
UNIVERSIS
PATAVINA
LIBERTAS

disamina di eventuali anomalie o interruzione dei flussi, che permettono una altrettanto rapida attivazione delle squadre operative di manutenzione. Tutte le stazioni sono dotate di ricevitori satellitari GPS e l'orientamento dei sismometri in pozzetti è garantito da un sistema brevettato dalla ditta installatrice. Tutti i siti-stazione sono correttamente recintati e protetti dagli agenti atmosferici. Si segnala che l'ambiente dei siti assicura una relativa condizione di quiete, anche nell'ottica di possibili effrazioni o atti vandalici ai danni delle stazioni.

3. Validazione dei sistemi di analisi

Per validare i sistemi di analisi dei dati della rete microsismica del sito di Sergnano la committenza ha condiviso le procedure attualmente in uso per il controllo, la gestione e la reportistica dei dati di monitoraggio. Le fasi di controllo hanno previsto la validazione dei sistemi di analisi usati, sia automatici che manuali. La committenza ha illustrato le procedure di controllo del flusso dei dati impiegate, illustrando l'applicativo in uso per la detezione degli eventi e quali sono le procedure di selezione e localizzazione che andranno ad arricchire il catalogo sismico del sito (Fig.3).



UNIVERSA
UNIVERSIS
PATAVINA
LIBERTAS

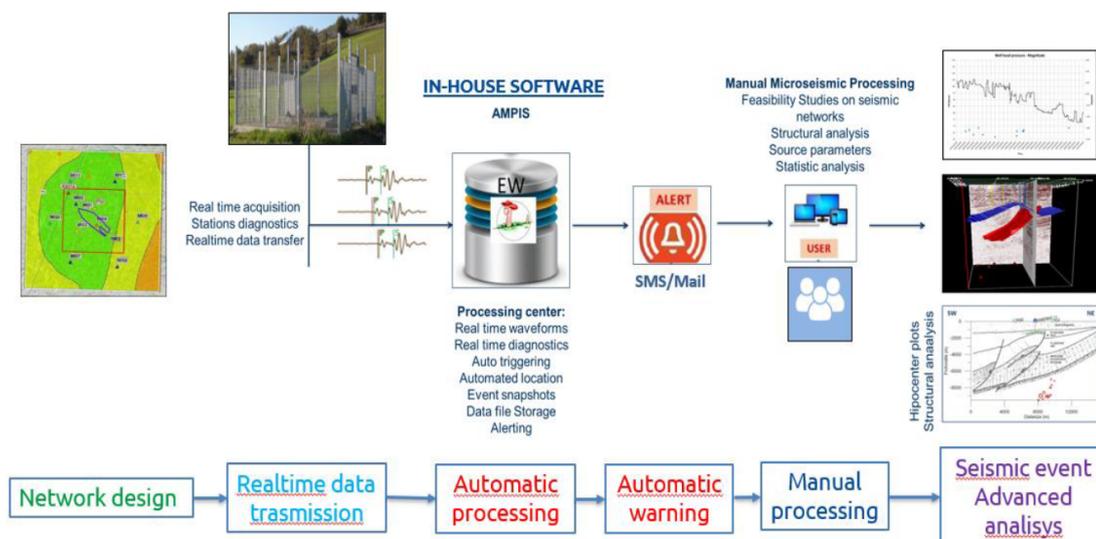


Fig. 3 Workflow e procedura analisi dati microsismici.

I dati di tutte le stazioni sono visualizzati in real-time in modo continuo dall'operatore, così da capacitarsi rapidamente in caso di malfunzionamento o interruzione del flusso dati. In caso di presunto evento sismico i sistemi di analisi utilizzati si basano su un applicativo sviluppato dalla committenza (*Ampis*), basato su noti standard sismologici internazionali della piattaforma *Earthworm* (www.earthwormcentral.org). Il sistema permette il *picking* automatico delle fasi e una preliminare quantificazione e localizzazione dell'evento registrato, basata su modelli di velocità di dettaglio dell'area in studio. Per ogni evento un controllo manuale dell'operatore verifica e corregge la determinazione dei tempi di arrivo, al fine di ottimizzarne la localizzazione. Il sistema di analisi *Ampis*, così come illustrato, appare semplice nell'utilizzo e razionale nello sviluppo dell'analisi ed è in accordo



UNIVERSA
UNIVERSIS
PATAVINA
LIBERTAS

con le procedure utilizzate da enti pubblici preposti ai monitoraggi di tale tipologia di dati.

Il modello di velocità di Sergnano è basato su dati della committenza che includono *logs* di pozzo, sezioni e mappe geologiche, e prospezioni sismiche. La committenza dispone di modelli di dettaglio di velocità del sito 3D, sia per onde compressionali V_p che per onde di taglio V_s , così come richiesto nella configurazione massima degli ILG.

Il metodo di analisi può essere testato con la modellazione di eventi sintetici in grado di simulare le performance di detezione della rete reale, al fine di verificarne l'efficacia nel discriminare gli eventi sia nel dominio interno che in quello esteso. Le potenzialità di *modelling* impiegate, seppur necessariamente semplificate nella scelta di sorgente e di parametrizzazione dei modelli, appaiono sufficienti a descrivere l'osservato, così come riportato nel paragrafo 4.

4. Validazione delle performance di rete

La validazione delle performance di rete si è basata su una metodologia diffusamente usata dagli enti di ricerca sismologici preposti al monitoraggio, ed in linea con quanto effettuato da INGV sul campo di Minerbio durante la sperimentazione degli ILG. Le fasi principali della metodologia hanno comportato l'esecuzione di analisi di rumore delle singole stazioni e il *modelling* delle soglie di localizzabilità di eventi sismici sintetici.



UNIVERSA
UNIVERSIS
PATAVINA
LIBERTAS

L'analisi di rumore è stata eseguita per ogni stazione per un periodo settimanale di Gennaio 2022, considerato rappresentativo delle normali attività di sito. L'analisi ha previsto il calcolo delle distribuzioni di probabilità dello spettro di potenza (*probabilistic power spectral densities*, PPSD) secondo l'approccio classico di *McNamara e Buland (2004)*, come implementato nella libreria *ObsPy (Beyreuther et al., 2010, Krischer et al., 2015)*. Le registrazioni vengono convertite in unità fisiche di accelerazione dopo la rimozione della risposta strumentale. Il periodo temporale è stato suddiviso in finestre temporali di durata predefinita (compresa tra 5 e 15 minuti in questo studio) e su ciascuna finestra temporale è calcolato lo spettro di potenza (PSD, *power spectral density*) tramite trasformata di Fourier. La popolazione di PSD così ottenuta è usata per stimare la corrispondente distribuzione di probabilità. Le unità di misura utilizzate per le PSD sono decibel (dB), con le unità normalizzate rispetto a $1\text{m}^2/\text{s}^2\text{Hz}$.

Le PSD sono state suddivise in periodi diurni (dalle 7:00 alle 19:00) e notturni (dalle 19:00 alle 7:00), così da determinare uno scenario più conservativo nei periodi più influenzati da rumore antropico (rumore diurno) ed uno scenario di quiete (rumore notturno).

I valori medi di rumore registrati sono dell'ordine di -130dB in periodo diurno con un miglioramento di circa 5 dB durante i periodi notturni, nel periodo di interesse compreso tra 0.01s e 10s. Come atteso, il *range* di periodi più interessato dal rumore ricade nei lunghi periodi, dove si possono superare i valori di -100dB.



UNIVERSA
UNIVERSIS
PATAVINA
LIBERTAS

Le performance di rete sono state validate secondo modellazioni sintetiche di scuotimento, simulando eventi di diverse magnitudo localizzati a diverse profondità, sia all'interno del dominio interno che del dominio esteso. Sono state considerate le reali performance di detezione strumentale ricavate dalla analisi di rumore. La metodologia utilizzata per le simulazioni è nota in letteratura (*D'Alessandro et al.*, 2011, *Kraft et al.*, 2013, *Stabile et al.*, 2013, *Carannante et al.*, 2017) e può essere sintetizzata come segue:

1. calcolo dei tempi di transito sorgente-ricevitore e della lunghezza del relativo percorso per una griglia regolare di ipocentri a diverse distanze e diverse profondità;
2. calcolo dell'ampiezza dello spettro di spostamento simulato ai ricevitori per ciascun ipocentro, utilizzando il modello sorgente di *Brune* (1970), nonché i modelli di *spreading* e attenuazione locali;
3. confronto dello spettro di spostamento simulato con i livelli di rumore misurati (ottenuti come PPSD dai dati reali di *noise*).

Il modello di sorgente adottato è di tipo puntiforme (*Brune* 1970) da cui viene calcolato lo spettro di Fourier in velocità β delle onde S registrate a distanza ipocentrale R dalla sorgente. La dimensione del raggio di faglia R è determinata dalla magnitudo che si vuole considerare e dallo *stress drop* statico $\Delta\sigma$ (*Madarriaga*, 1976, *Hanks and Kanamori*, 1979). In questo studio si assume un valore di $\Delta\sigma = 1$ Mpa, come valore rappresentativo della caduta di sforzo di eventi sismici di magnitudo inferiore a 3.0 (*D'Alessandro et al.*, 2010). L'attenuazione è



UNIVERSA
UNIVERSIS
PATAVINA
LIBERTAS

stata parametrizzata utilizzando un fattore di qualità Q dipendente dalla frequenza e il parametro k di decadimento spettrale (*Anderson e Hough, 1984*). Lo spettro in velocità dell'evento simulato viene confrontato con i livelli di rumore ambientale ottenuti dalle PPSD, opportunamente convertite. In questo studio un evento è stato considerato identificabile sul sismogramma solo se il rapporto segnale rumore è ≥ 4 per il picking delle fasi P e ≥ 3 per il picking delle fasi S. Un evento è considerato localizzabile quanto viene identificato da numero di stazioni ≥ 4 .

Per valutare l'incertezza di localizzazione, verticale ed orizzontale, la committenza utilizza il software *NonLinLoc* (*Lomax et al., 2009*), dove vengono calcolati i tempi di arrivo di un insieme di eventi sintetici con ipocentri posizionati su di una griglia regolare (modellistica *forward*). Questi eventi vengono quindi rilocalizzati utilizzando lo stesso software *NonLinLoc*, ma utilizzando solo le fasi identificabili per l'evento dall'operatore (quelle cioè con rapporto segnale rumore sopra la soglia prefissata) ed associando a ciascun tempo di arrivo un valore di incertezza. Questa incertezza è calcolata come in *Aki e Richards (2002)* secondo il teorema di Shannon-Hartley come in [1]:

$$\Delta t = [(1 + SNR) * 2f_{max}]^{-1} \quad [1]$$

dove Δt è l'incertezza temporale, SNR è il rapporto segnale rumore considerato, ed f_{max} è la larghezza massima di banda, approssimata tramite il massimo dello spettro di frequenza per il corrispondente modello sorgente di Brune (qui considerate nell'intervallo 15-30Hz). Sono stati quindi estratti, per ciascuna posizione



UNIVERSA
UNIVERSIS
PATAVINA
LIBERTAS

della griglia degli ipocentri, gli intervalli di confidenza (*Press et al.*, 1992) nelle 3 direzioni E-W, N-S e verticale.

La scelta dei parametri geofisici da inserire nel modello è ovviamente determinante. In questo studio i parametri della velocità delle onde di taglio, β , ed i parametri che controllano l'attenuazione delle onde, ovvero il fattore di qualità Q e di decadimento spettrale k , sono stati selezionati basandosi sui dettagliati modelli di velocità in possesso, sia con diversi *run* di simulazione. Il fattore di qualità Q più consono a descrivere la sismicità misurata è risultato 105, rappresentativo di sabbie consolidate e calcari (V_p comprese tra 3.6 km/s e 4.1 km/s, come in *Tao e King* 1990). Ciò è in linea con le formazioni di sabbie consolidate (assimilabili a talli profondità ad un calcare) presenti nella regione di Sergnano a profondità nell'intervallo 0-8.5 Km. Il parametro di decadimento spettrale k varia secondo la litologia ed il grado di cementazione (*Carannante et al.*, 2016) e dipende principalmente dalle condizioni di sito. Considerate le modeste distanze in gioco, in questa prima simulazione viene assunto il parametro cautelativo di $k=0.05$, indipendente dalla posizione della sorgente. L'area di installazione è descritta dalla committenza come sostanzialmente omogenea e caratterizzata da livelli di attenuazione intermedi, tipici dei sedimenti consolidati. I risultati delle simulazioni effettuate con i parametri descritti sono suddivisi in periodo notturno e diurno, riassunti in fig.4.



UNIVERSA
UNIVERSIS
PATAVINA
LIBERTAS

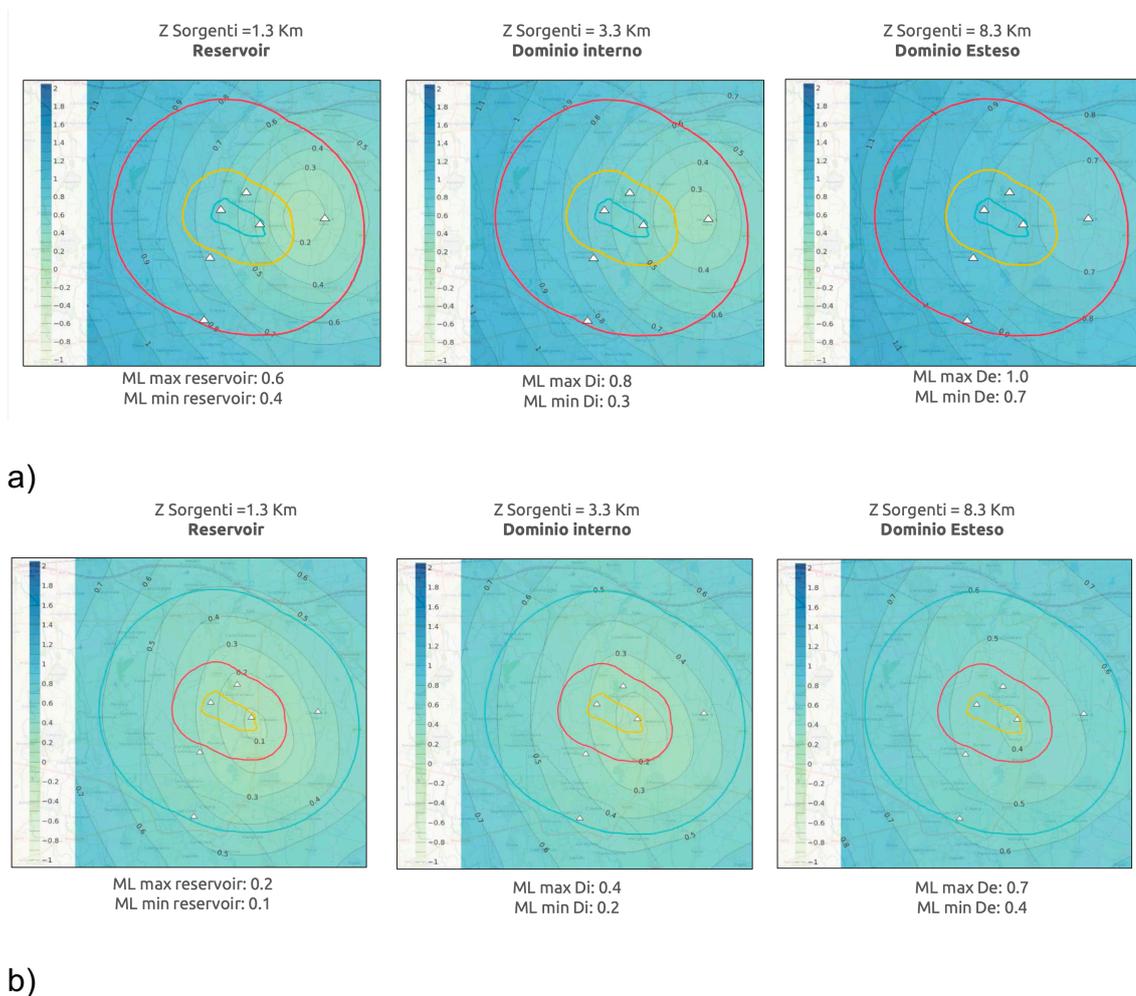


Fig.4. Risultati delle simulazioni di localizzazione nei domini di *reservoir*, interno ed esteso. I triangoli sono le stazioni riceventi della rete, in scala cromatica le isolinee delle magnitudo ML eventi. a) Periodo diurno (07:00-19:00); b) Periodo Notturno (19:00-07:00).

Dai risultati delle simulazioni effettuate si possono riassumere le seguenti performance di rete:

- Magnitudo minima localizzabile nell'area di *reservoir* di giorno: $ML \leq 0.4$
- Magnitudo minima localizzabile nell'area di *reservoir* di notte: $ML \leq 0.1$



UNIVERSA
UNIVERSIS
PATAVINA
LIBERTAS

- Magnitudo minima localizzabile nel dominio interno di giorno: $ML \leq 0.3$
- Magnitudo minima localizzabile nel dominio interno di notte: $ML \leq 0.2$
- Magnitudo minima localizzabile nel dominio esteso di giorno: $ML \leq 0.7$
- Magnitudo minima localizzabile nel dominio esteso di notte: $ML \leq 0.4$

5. Conclusioni

A seguito della richiesta della committenza, per la rete di monitoraggio del sito di Sergnano (CR), si è provveduto a: 1) validare la strumentazione utilizzata in sito; 2) validare i sistemi di analisi e le procedure utilizzati; 3) validare le performance della rete installata tramite i sistemi utilizzati dalla committenza.

La strumentazione installata nella rete di monitoraggio microsismico appare in accordo con gli Indirizzi e Linee Guida ministeriali e con gli esiti della sperimentazione degli ILG stessi, effettuata sul campo di stoccaggio di Minerbio, come riportato nelle relazioni finali prodotte da INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia), che per tale progetto ha ricoperto il ruolo di Struttura Preposta al Monitoraggio (SPM). Ciò premesso, non risulta necessario effettuare sostituzioni alla strumentazione attualmente installata in campo. La gestione e manutenzione degli strumenti appare efficacemente gestita, permettendo l'acquisizione di dati in real-time e la massima riduzione di periodi di interruzione di funzionamento, così come suggerito dalle Linee Guida ministeriali.

Le metodologie di analisi adottate dalla committenza seguono i comuni standard sismologici internazionali e sono basate su piattaforme software di comprovata



UNIVERSA
UNIVERSIS
PATAVINA
LIBERTAS

efficienza. In particolare, le modellazioni eseguite ai fini di verificare le performance di rete, seppur basate su approssimazioni semplificate, appaiono in grado di descrivere correttamente l'osservato.

La validazione delle performance di rete tramite *modelling* sintetico ha consentito di verificare l'ottemperanza della stessa nei confronti delle performance suggerite dalle Linee Guida ministeriali e degli esiti del protocollo di sperimentazione effettuato dalla committenza sul campo di stoccaggio di Minerbio. La rete di monitoraggio di Sergnano, a seguito di modellazione includente i dati reali di rumore strumentale registrati e considerando parametri realistici di distribuzione dell'energia, risulta in grado di ottemperare alla rilevazione e localizzazione di eventi con ML compresa tra 0 e 1 ($0 \leq ML \leq 1$) nel dominio interno, e, nel dominio esteso di rilevazione, di migliorare di più di 1 unità il livello di magnitudo di completezza delle rilevazioni effettuate dalle reti nazionali o regionali. La rete di Sergnano appare inoltre in grado di determinare correttamente i principali parametri del moto del suolo e di integrarsi opportunamente con le reti di monitoraggio pubbliche esistenti.



UNIVERSA
UNIVERSIS
PATAVINA
LIBERTAS

6. Suggerimenti di implementazione

Per le ragioni indicate sopra, la committenza non ha installato un sensore tri-componente di tipo *broadband*. È opinione degli scriventi che tale implementazione non modificherebbe sostanzialmente la performance di rete. In virtù del suo costo contenuto, e consapevoli delle elevate difficoltà nella monumentazione di tale tipo di strumentazione in contesti caratterizzati da elevato rumore antropico, si suggerisce comunque di prenderla in considerazione per il futuro, onde escludere eventuali rimostranze sulla non completa osservanza delle specifiche richieste.

Premesso che è stato verificato che la rete rispetta le performance di magnitudo definite da ILG, per quanto riguarda il dominio esteso consigliamo di procedere alla richiesta alle istituzioni competenti di una definizione accurata della Magnitudo di completezza della area di studio, essendo quest'ultima una stima fortemente dipendente dal numero delle stazioni nazionali installate in prossimità dei siti, soprattutto considerando la scarsissima attività tettonica dell'area in studio.

Al fine di ottenere una più omogenea distribuzione delle potenzialità di localizzazione rispetto al posizionamento del reservoir, è caldamente suggerito di integrare la rete con una ulteriore stazione nell'area Nord-occidentale del dominio di studio.



UNIVERSA
UNIVERSIS
PATAVINA
LIBERTAS

I responsabili scientifici del progetto:

Prof. Jacopo Boaga

Prof. Lapo Boschi

Prof. Lapo Boschi
Dipartimento di Geoscienze
Università degli Studi di Padova
Via Gradenigo 6 – 35131 – Padova
Tel: 0039 049 827 9811
Mail: lapo.boschi@unipd.it

Prof. Jacopo Boaga
Dipartimento di Geoscienze
Università degli studi di Padova
Via Gradenigo 6 – 35131 – Padova
Tel: 0039 049 827 9194
Mail: jacopo.boaga@unipd.it



UNIVERSA
UNIVERSIS
PATAVINA
LIBERTAS

BIBLIOGRAFIA

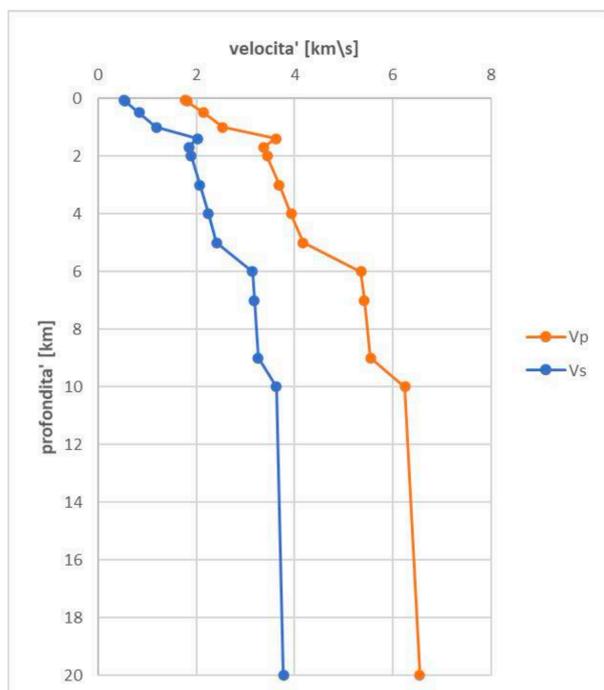
- Aki, K., & Richards, P. G. (2002). *Quantitative seismology*. University Science Books
- Anderson, J. G., & Hough, S. E. (1984). A model for the shape of the Fourier amplitude spectrum of acceleration at high frequencies. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 74(5), 1969-1993.
- Beyreuther et al. (2010). ObsPy, a Python toolbox for seismology, *Seism. Res. Lett.*, 81, 530-533.
- Brune, J. N. (1970). Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Journal of geophysical research*, 75(26), 4997-5009.
- Carannante et al. (2017). Feasibility study for the microseismic monitoring of the natural gas reservoir of "SANT'ALBERTO" (Po Plain, Italy). *Annals of Geophysics*.
- D'Alessandro et al. (2011). Hellenic Unified Seismological Network: an evaluation of its performance through SNES method, *Geophys. J. Int.*, 185, 1417-1430.
- Hanks, T. C., & Kanamori, H. (1979). A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 84, 2348-2350.
- Kraft et al. (2013). Optimization of a large-scale microseismic monitoring network in northern Switzerland, *Geophys. J. Int.*, 195, 474-490.
- Krischer et al. (2015). ObsPy, a bridge for seismology into the scientific Python ecosystem, *Comput. Sci. Disc.* 8, 014003.
- Lomax et al. (2009). Earthquake location, direct, global-search methods. *Encyclopedia of complexity and systems science*, 5, 2449-2473.
- Madariaga, R. (1976). Dynamics of an expanding circular fault. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 66(3), 639-666.
- McNamara and Buland, Ambient noise levels in the continental United States (2004). *Bull. Seism. Soc. Am.*, 94, 1517-1527.
- Peterson, J. (1993). Observations and modeling of seismic background noise. *U.S. Geol. Survey Open-File Report 93-322*, 95 pp.
- Press et al. (1992). *Numerical recipes in Fortran 77*, Cambridge university press.
- Stabile et al. (2013). A comprehensive approach for evaluating network performance in surface and borehole seismic monitoring, *Geophys. J. Int.*, 192, 793-806.
- Tao, G., & King, M. S. (1990). Shear-wave velocity and Q anisotropy in rocks: A laboratory study, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 27, 353-361.



UNIVERSA
UNIVERSIS
PATAVINA
LIBERTAS

Allegato 1: Coordinate strumentazione installata e modello di velocità utilizzato

STAZIONE	LATITUDINE	LONGITUDINE	QUOTA (m s.l.m.)
CR01	45.357262°N	9.675553°E	-73
SE01	45.418108°N	9.725630°E	-12
SE02	45.427336°N	9.690333°E	90
SE03	45.4219°N	9.7835°E	-62
SE04	45.438409°N	9.713125°E	-57
SE05	45.396784°N	9.680632°E	-68



Profili di velocità 1D considerati per la zona intorno al campo di stoccaggio di Sergnano

7