



Geostudi Astier srl, Via E. Fagni 31, 57123 LIVORNO – Italy

info@geostudias tier.com, Tel 0586 864734, www.geostudias tier.it



Isamgeo Italia srl, Largo G. Camussi 5, 21013 GALLARATE (VA) – Italy

info@isamgeo.com, Tel 0331 879131, www.isamgeo.com

PROGETTO GEOTERMICO DI POLA sito nel comune di Jolanda di Savoia (FE)

Proposta per la rete di monitoraggio geodinamico

Committente:

GZEI ENERGIA - GEOTERMIA ZERO EMISSION ITALIA SRL

Sede legale: via Maurizio Gonzaga 2, Milano

Dicembre 2022

INDICE

EXECUTIVE SUMMARY	2
1. INTRODUZIONE	3
1.1 MONITORAGGIO SISMICO	4
1.2 MONITORAGGIO DELLE DEFORMAZIONI DEL SUOLO	4
2. SISMICITA' NATURALE E COPERTURA DELLA RETE NAZIONALE	5
3. CARATTERIZZAZIONE DEL RUMORE SISMICO AMBIENTALE	7
3.1 METODOLOGIA DI ANALISI DEL RUMORE AMBIENTALE	7
3.2 RISULTATI	8
4. RETE DI MONITORAGGIO GEODINAMICO	8
4.1 DOMINI DI RILEVAZIONE	8
4.2 RETE DI MONITORAGGIO	9
4.3 SENSIBILITA' DELLA RETE: METODOLOGIA DI CALCOLO	10
4.4 SENSIBILITA' DELLA RETE: RISULTATI	12
5. STAZIONI DI MONITORAGGIO GEODINAMICO: CARATTERISTICHE PREVISTE	14
6. CONCLUSIONI	16
7. BIBLIOGRAFIA	17

EXECUTIVE SUMMARY

L'obiettivo di questo documento è proporre una rete di monitoraggio geodinamico locale per un campo geotermico presso Jolanda di Savoia (FE). La rete ha l'obiettivo di monitorare la sismicità locale, eventualmente da mettere in relazione alle operazioni di produzione, e le deformazioni del suolo. La proposta per la rete qui descritta si basa sulle linee guida ministeriali per queste tipologie di attività, in particolare

- INDIRIZZI E LINEE GUIDA PER IL MONITORAGGIO DELLA SISMICITÀ, DELLE DEFORMAZIONI DEL SUOLO E DELLE PRESSIONI DI PORO NELL'AMBITO DELLE ATTIVITÀ ANTROPICHE, documento del 2014 e
- LINEE GUIDA PER L'UTILIZZAZIONE DELLA RISORSA GEOTERMICA A MEDIA E ALTA ENTALPIA, documento del 2016.

Entrambi i documenti sono disponibili sul sito del MISE, al link riportato in bibliografia.

Per quanto riguarda il monitoraggio della sismicità, l'analisi dei dati disponibili ha mostrato che nella zona di interesse il rischio sismico è medio (Zona di rischio 3), con sorgenti sismogenetiche note ad oltre 10km dalla zona interessata dal progetto e bassa copertura da parte della rete sismica nazionale.

Sono stati definiti i domini di rilevazione, con particolare attenzione al fatto che sono previsti sia pozzi di produzione che di iniezione. I domini sono stati dimensionati di conseguenza. E' stata quindi proposta una rete di monitoraggio sismico composta da 7 stazioni, tutte da installare in superficie. Per tale scenario è stata valutata la copertura azimutale della rete sismica, e la sensibilità della stessa per rilevare i terremoti per un livello di rumore sismico ambientale atteso nelle ore feriali diurne. Si è confermata una buona copertura angolare per la geometria di rete proposta, da cui è prevedibile un'accuratezza di localizzazione di eventi interni ai domini di rilevazione da buona ad ottima, e una sensibilità (magnitudo di completezza stimata) migliore di M_L 0. Non sono state fatte ad ora misure dirette in campo di rumore ambientale, ma è stato utilizzato un dataset precedentemente acquisito da Isamgeo a qualche decina di chilometri di distanza. A valle del procedimento autorizzativo sarà necessario effettuare misure dirette sulle varie piazzole identificate, per confermare i livelli di rumore attesi o cercare soluzioni alternative nella zona, eventualmente installando i sensori in pozzetto.

Le stesse stazioni di monitoraggio sismico possono essere utilizzate anche per il monitoraggio della subsidenza, realizzando all'interno in prossimità della stazione un caposaldo per le misure geodetiche (GPS), ed installando un riflettore InSAR. Queste sono le tecnologie previste per il monitoraggio delle deformazioni del suolo, anche in questo caso in accordo con le indicazioni delle linee guida.

Per quanto riguarda la strumentazione prevista, tutte le piazzole avranno un velocimetro a corto periodo con trasmissione dati in tempo reale, oltre al riflettore InSAR e al caposaldo. Una stazione della rete avrà una dotazione completa, composta, oltre a quanto sopra, da velocimetro a medio periodo, accelerometro per valutare i parametri di scuotimento in caso di forti sismi, e stazione GPS in continuo.

1. INTRODUZIONE

Questo studio è stato realizzato al fine di progettare una rete di monitoraggio geodinamico per il progetto geotermico di Pola presso Jolanda di Savoia (FE) con lo scopo di migliorare la sensibilità e la localizzazione di eventi sismici e la valutazione dei pattern di subsidenza. È stato valutato uno scenario per la rete di monitoraggio sismico composto da 7 stazioni modellando come stazioni superficiali.

La centrale prevede la perforazione di 5 o 6 pozzi fino ad una profondità di approssimativamente 6100 m dove la temperatura raggiunge valori di circa 140°C misurati durante la perforazione del Pozzo Cv1 per ENI nel 1991. In Figura 1 si mostra la posizione della centrale con le postazioni di perforazione dei pozzi di iniezione (Cv1, Cv1bis, Cv2, Cv3) e produzione (Cv4, Cv5, Cv6).

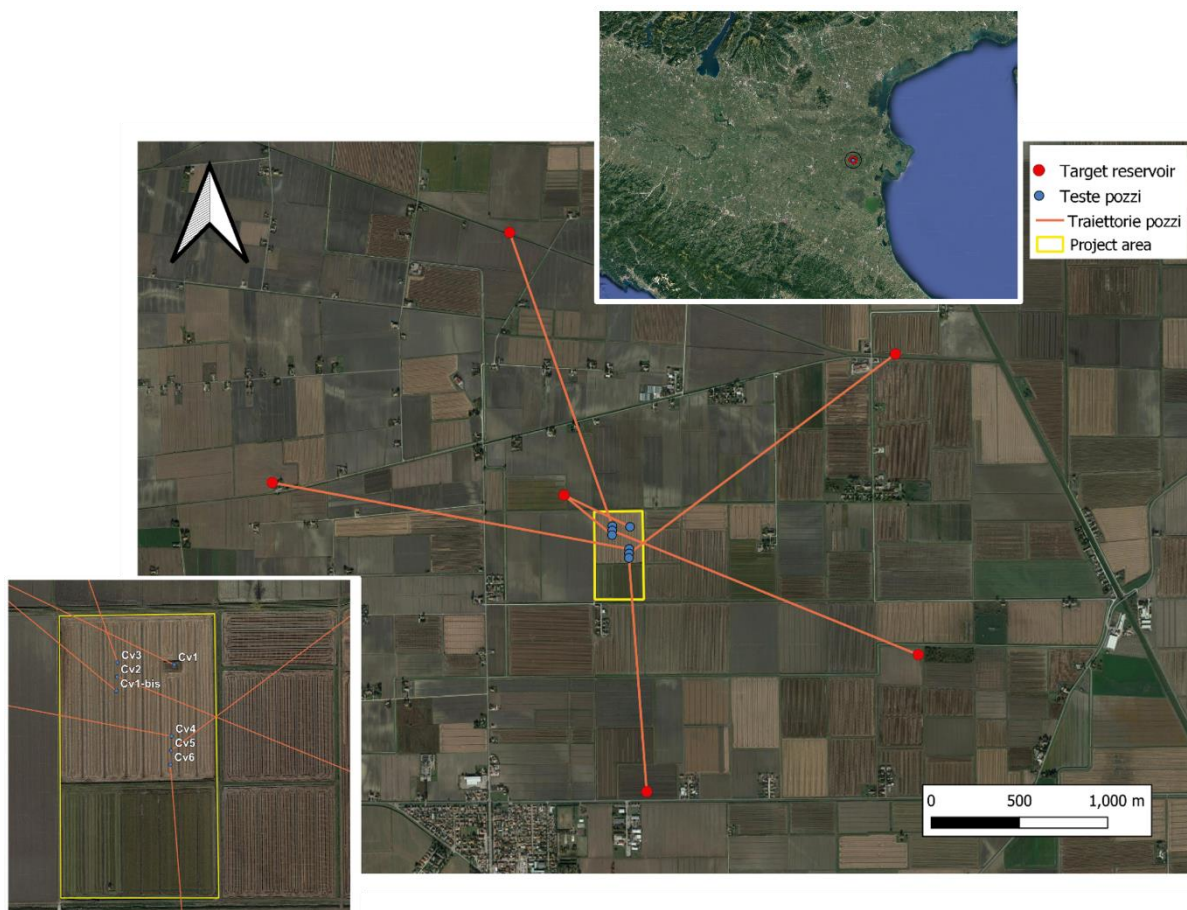


Figura 1 Panoramica dei pozzi deviati da perforare (Cv2-Cv6) e dal target dei reservoir a circa 6000 m di profondità (pallini rossi).

Per questo studio, è stata condotta un'analisi della sismicità naturale e storica regionale (in un raggio di 35 Km dal centro della concessione) valutando le sorgenti sismogenetiche note e i sismi rilevati dalla rete nazionale dell'INGV nel periodo 1990-2022, effettuata un'analisi del rumore ambientale sismico atteso utilizzando 7 giorni di registrazione continua da una stazione posta nelle vicinanze della concessione mediante il metodo *PPSD* (*Probability Power Spectral Density*), definita una configurazione preliminare della rete di monitoraggio locale sulla base della posizione attesa dei pozzi, della sismicità e della subsidenza, valutandone anche la copertura azimutale tramite il parametro geometrico del Gap Azimutale, ed infine effettuata una simulazione per determinare la sensibilità della rete nella sensibilità di eventi sismici,

mostrando delle mappe di magnitudo locale minima rilevabile per ipotetici ipocentri posti a diverse profondità.

Tale studio è stato svolto in conformità alle linee guida per i monitoraggi del Ministero dell'ambiente e della sicurezza energetica (UNMIG, 2014), le cui prescrizioni sono brevemente sintetizzate qui di seguito.

1.1 MONITORAGGIO SISMICO

Il monitoraggio sismico ha l'obiettivo di *"individuare e localizzare la sismicità in un volume circostante il luogo delle attività di coltivazione geotermica, anche con l'obiettivo di distinguere la sismicità naturale da quella eventualmente attribuibile alle attività antropiche. Il monitoraggio deve consentire di seguire l'evoluzione spazio-tempo-magnitudo della sismicità al fine, ove occorra, di rimodulare o eventualmente di sospendere le attività stesse"* (Terlizzese, 2016). Le linee guida per il monitoraggio della sismicità (UNMIG, 2014) prevedono, la definizione di

- Dominio Interno (DI) di rilevazione, inteso come *"volume all'interno del quale si ritiene che possano verificarsi fenomeni di sismicità indotta o di deformazione del suolo associati all'attività svolta"*. Per le attività che coinvolgano una re-iniezione di fluidi all'interno del giacimento, con riferimento alle attività di estrazione di gas ed olio ma applicabile anche alla geotermia, il DI deve avere dimensione pari a 5km oltre all'estensione del giacimento.
- Dominio Esteso (DE) di rilevazione, definito come *"volume circostante il dominio interno di rilevazione che comprende una porzione maggiore di crosta terrestre, al fine di definire e contestualizzare al meglio i fenomeni monitorati"*. L'indicazione di UNMIG, 2014 è la definizione pari ad almeno 5km oltre il DI.

D'altro canto, con riferimento esplicito alla geotermia, Terlizzese (2016) parla più genericamente di un Dominio di Rilevazione (DR). Questo, per giacimenti di cui non sia disponibile un modello geomeccanico del serbatoio, deve avere dimensioni pari ad almeno 7km (in tutte le direzioni) rispetto al fondo pozzo. In caso di più pozzi, deve essere costruito come involucro dei DR di tutti i pozzi del campo. Le dimensioni sono da applicare sia in pianta che in profondità.

La rete di monitoraggio sismico deve essere costruita in modo tale che (UNMIG, 2014, Terlizzese, 2016)

- Nel DI/DR, sia possibile rilevare terremoti con magnitudo di completezza (ML, magnitudo locale o Richter) compresa tra 0 ed 1, ed errori di localizzazione pari a poche centinaia di metri;
- Nel DE, migliorare di circa 1 unità di ML la capacità di detezione della rete nazionale, con errori di localizzazione non superiori ad 1km.

La rete deve essere in grado di misurare con accuratezza i parametri di scuotimento (velocità ed accelerazione) e di integrare le misure con quelle della rete nazionale, per migliorarne la capacità. I dati devono essere trasmessi in tempo "quasi-reale" durante il periodo di coltivazione del giacimento.

1.2 MONITORAGGIO DELLE DEFORMAZIONI DEL SUOLO

Il monitoraggio delle deformazioni del suolo (subsidenza) ha l'obiettivo invece di *identificare eventuali fenomeni di deformazione superficiale legati alle attività in esame, per misurarne e analizzarne le variazioni spazio-temporali rispetto alle condizioni di fondo* (Terlizzese, 2016).

Terlizzese, (2016), sulla base del fatto che questi fenomeni hanno *"tipicamente una dinamica temporale abbastanza lenta e si estendono spazialmente"* indica che per questa tipologia di monitoraggio è necessario

- L'utilizzo di tecnologie InSAR, basate sull'elaborazione di sequenze temporali di immagini satellitari SAR, sia nella fase ante-opera (per caratterizzare l'andamento "naturale" della subsidenza, sia durante la fase di coltivazione;
- Durante quest'ultima, le misure InSAR vanno integrate con quelle fornite da una rete di stazioni GPS in continuo, al fine di fornire una serie di punti di calibrazione/validazione.

L'area interessata dalle misure deve essere pari al Dominio di Rilevazione definito in precedenza.

Per rispondere ai requisiti delle linee guida di monitoraggio geodinamico di UNMIG (2014) e Terlizze (2016), nel seguito di questo documento vengono dunque

- 1) Valutata la sismicità naturale dell'area, la presenza di sorgenti sismogenetiche e la copertura della rete sismica nazionale (RSN), gestita da INGV
- 2) Definiti i domini rilevazione per il progetto geotermico di Pola
- 3) Proposta una configurazione della rete di monitoraggio sismico seguendo le indicazioni delle linee guida sopra riportate
- 4) Definite le posizioni e tipologia di strumentazione per le stazioni della rete di monitoraggio, sia con la finalità di monitorare la sismicità che i fenomeni di deformazione del suolo.

2. SISMICITA' NATURALE E COPERTURA DELLA RETE NAZIONALE

L'area nell'intorno della concessione presenta un livello medio/medio-basso di pericolosità sismica (Zona 3 della classificazione sismica, aggiornamento 03/2022) – si veda PROCIV (2022).

La medio-bassa sismicità dell'area si evince anche dal ristretto numero di eventi sismici rilevati negli ultimi 32 anni, a partire dal 1990 (catalogo INGV, <http://terremoti.ingv.it>). In un raggio di 35 km dal pozzo Cv1 sono stati rilevati circa 100 eventi dalla rete nazionale (Figura 2). Essi si dispongono prevalentemente lungo sorgenti sismogenetiche conosciute e indicate in mappa come sorgenti sismogenetiche composite (linee gialle), e sorgenti sismogenetiche di subduzione (linee rosse), come definite nel DISS, Database delle sorgenti sismogenetiche italiane (<https://diss.ingv.it/>). Nessuna delle sorgenti sismogenetiche note è ad una distanza inferiore ai 10km dalla posizione prevista per i pozzi e la centrale. La rete sismica nazionale (RSN) ha nell'area un limitato numero di stazioni, nessuna delle quali ad una distanza inferiore ai 30km. Solo 3 stazioni si trovano all'interno di un'area di raggio 50km (IV.FIU, IV.FERS ed IV.CMPO), tra l'altro tutte posizionate in direzione sud ed ovest.

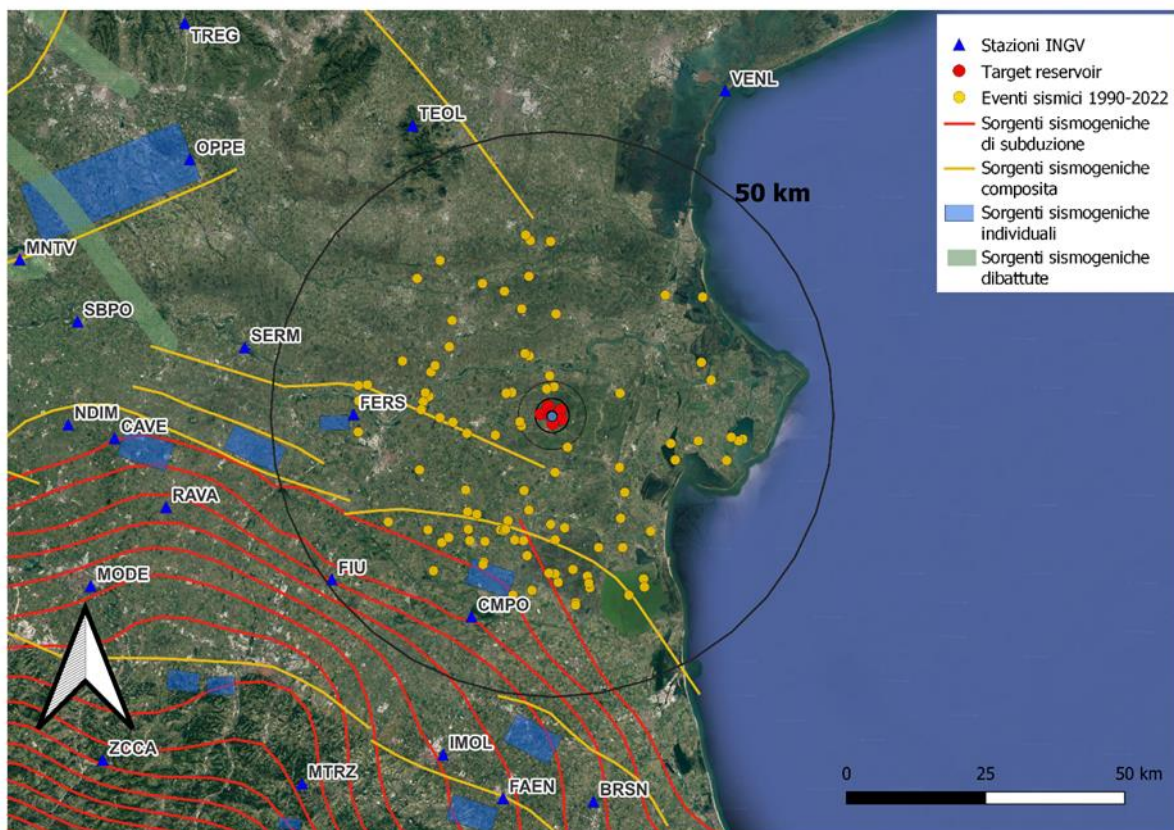


Figura 2 Mappa degli eventi sismici in un raggio di 35 km dal centro della concessione (pallino azzurro), sovrapposti alle sorgenti sismogeniche regionali (DISS,). I triangoli blu rappresentano le stazioni sismiche della rete INGV.

In Figura 3a viene riportato un diagramma di Gutenberg-Richter con la distribuzione delle magnitudo di tutti gli eventi sismici rilevati dalla RSN. L'apparente diminuzione del numero di eventi per basse magnitudo (<2) è causata dalla limitata abilità di identificare eventi deboli da parte rete sismica nazionale di rilevare piccoli terremoti, a causa probabilmente della scarsità di stazioni. Il valore di massimo nel diagramma di Gutenberg-Richter rappresenta una stima approssimativa della magnitudo di completezza M_c della rete, quindi ragionevolmente $M_c > 2$. Questo valore emerge anche da alcune pubblicazioni nella letteratura scientifica, dove la magnitudo di completezza della rete è stata stimata per l'intero territorio italiano (Schorlemmer, et al., 2010). Un estratto è riportato in Fig. 3b.

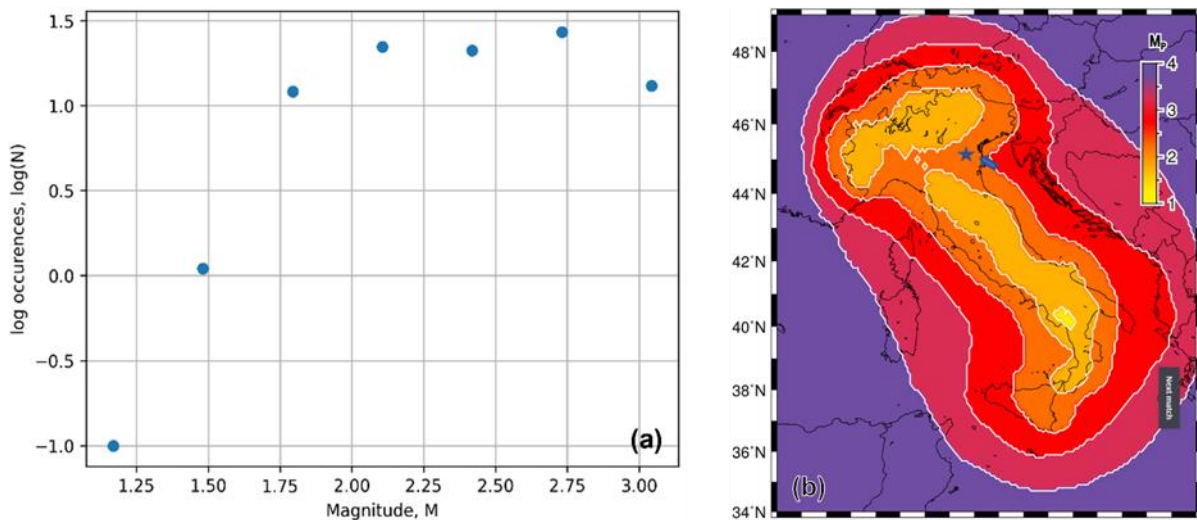


Figura 3 (a) Diagramma Gutenberg-Richter eventi sismici rilevati dalla rete sismica nazionale (INGV) nel periodo 1990-2022 in un raggio di 35km intorno alla posizione prevista per i pozzi geotermici. (b) Magnitudo di completezza della rete sismica nazionale per tutto il territorio italiano (Schorlemmer, et al., 2010). Il marker blu a forma di stella e la freccia indicano la posizione approssimativa dell'area interessata dal progetto nella mappa.

3. CARATTERIZZAZIONE DEL RUMORE SISMICO AMBIENTALE

La caratterizzazione del rumore sismico ambientale è fondamentale per identificare la variabilità spaziale e temporale del livello di rumore (ad esempio, variazione tra giorno e notte, tra weekend e giorni feriali, nonché la sua distribuzione spaziale nell'area di studio) necessaria per valutare la sensibilità di una rete sismica nella rilevazione dei terremoti.

In questo lavoro non sono state effettuate delle misure dirette di rumore ambientale. Al contrario è stata utilizzato un set di misure acquisito in passato da ISAMGEO su una postazione a circa 15km di distanza dall'area oggetto di studio. Si tratta di una caratterizzazione del rumore ambientale a lungo termine (7 giorni di registrazione continua a novembre 2019). I dati sono stati acquisiti utilizzando un velocimetro 1s, marca Lunitec, modello Triton 1s, frequenza di campionamento 200Hz, range dinamico dell'acquisitore pari a 24bit.

Sarà dunque necessario successivamente, per procedere alla progettazione definitiva della rete, svolgere una campagna di misure nell'area di interesse, per confermare i livelli di rumore sismico per le varie stazioni.

3.1 METODOLOGIA DI ANALISI DEL RUMORE AMBIENTALE

L'analisi del rumore sismico ambientale è stata effettuata stimando la *Probability Power Spectral Density* (PPSD) del segnale (in questo caso la velocità di oscillazione) comparandole alle curve di riferimento standard: NHNM e (*New High Noise Model*) and NLNM (*New Low Noise Model*), Peterson (1993).

Le PSD sono state calcolate mediante l'approccio classico presentato da McNamara and Buland (2004) e implementato nella libreria ObsPy in Python (Beyreuther et al., 2010, Krischer et al., 2015). Prima del calcolo

delle PSD, è stato effettuato un pre-processamento delle tracce sismiche corrispondenti alla componente verticale (componente Z) del velocimetro. Le tracce sismiche sono state dapprima filtrate con un filtro passa-alto e poi corrette per la risposta strumentale per convertire la misura in unità di velocità, quindi in m/s. Il *Power Spectral Density* (PSD) viene calcolato su finestre temporali mobili di lunghezza pari a 15 minuti tramite trasformata di Fourier. L'insieme di tutte le PSD calcolate nell'arco temporale della registrazione sismica, 7 giorni, viene utilizzato per stimare la corrispondente *Probability Density Function* (PDF), ovvero la distribuzione di probabilità dello spettro di potenza del rumore.

3.2 RISULTATI

L'informazione quantitativa data dalla PSD viene utilizzata per esaminare il livello di rumore ambientale atteso nell'area d'interesse e di conseguenza definire due scenari realistici di rumore. Essi vengono impiegati per simulare la prestazione della rete sismica proposta (Sezione 4) per uno scenario *rumoroso* che simula il rumore atteso nelle ore diurne, rappresentato dall'84° percentile della PSD.

In Figura 4a viene riportata la PSD della componente verticale della stazione denominata ST1 per l'intera durata della registrazione sismica, mentre in Figura 4b si evidenziano i livelli di rumore atteso per l'84° percentile, linea verde; la zona ombreggiata rappresenta l'area racchiusa tra il 5° e il 95° percentile.

Per tale scenario e per tutte le frequenze, la potenza spettrale del rumore sismico si attesta tra le due curve di riferimento NHNM e NLNM.

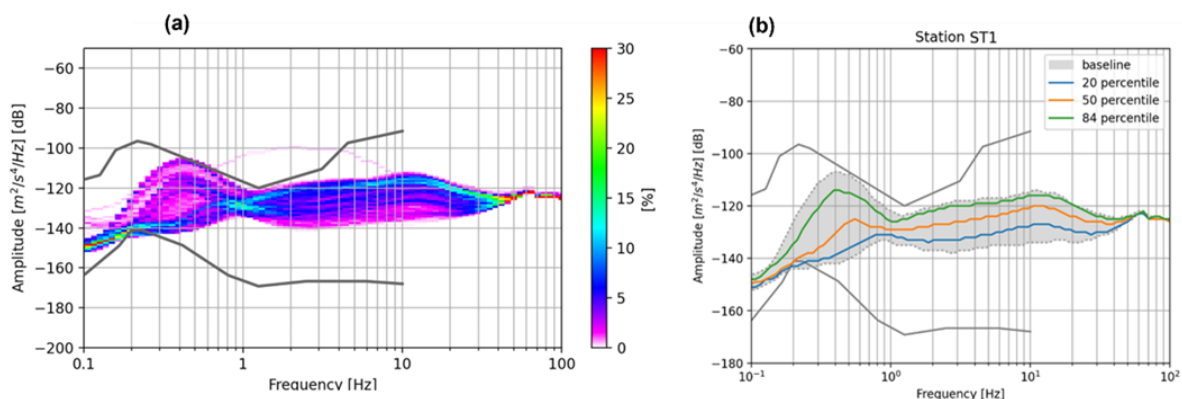


Figura 4 (a) PSD della componente verticale (Z) della stazione in prossimità della concessione per l'intera durata della registrazione. (b) Rumore sismico ambientale atteso per tre differenti scenari, dal meno rumoroso (20° percentile) linea blu, al più rumoroso (84° percentile) linea verde.

4. RETE DI MONITORAGGIO GEODINAMICO

4.1 DOMINI DI RILEVAZIONE

Come descritto in precedenza (Par. 1.1) le linee guida MISE, 2014 e Terlizze, 2016, richiedono di definire i domini di rilevazione DI/DR e DE, all'interno dei quali è richiesto che la rete abbia certe performances. Per la concessione di Pola, seguendo le linee guida sono stati definiti

- Il DI/DR, costruito come inviluppo delle aree di influenza di ciascun pozzo, definite da un raggio di almeno 5km (diversi per i pozzi di produzione e di iniezione) (linea rossa in Fig. 5).
- Il DE, definito da una fascia di 5km estesa oltre il DI (linea nera).

Per quanto l'estensione in profondità, il DI sarà esteso dalla superficie ad una profondità di 11km, il DE fino a 16km.

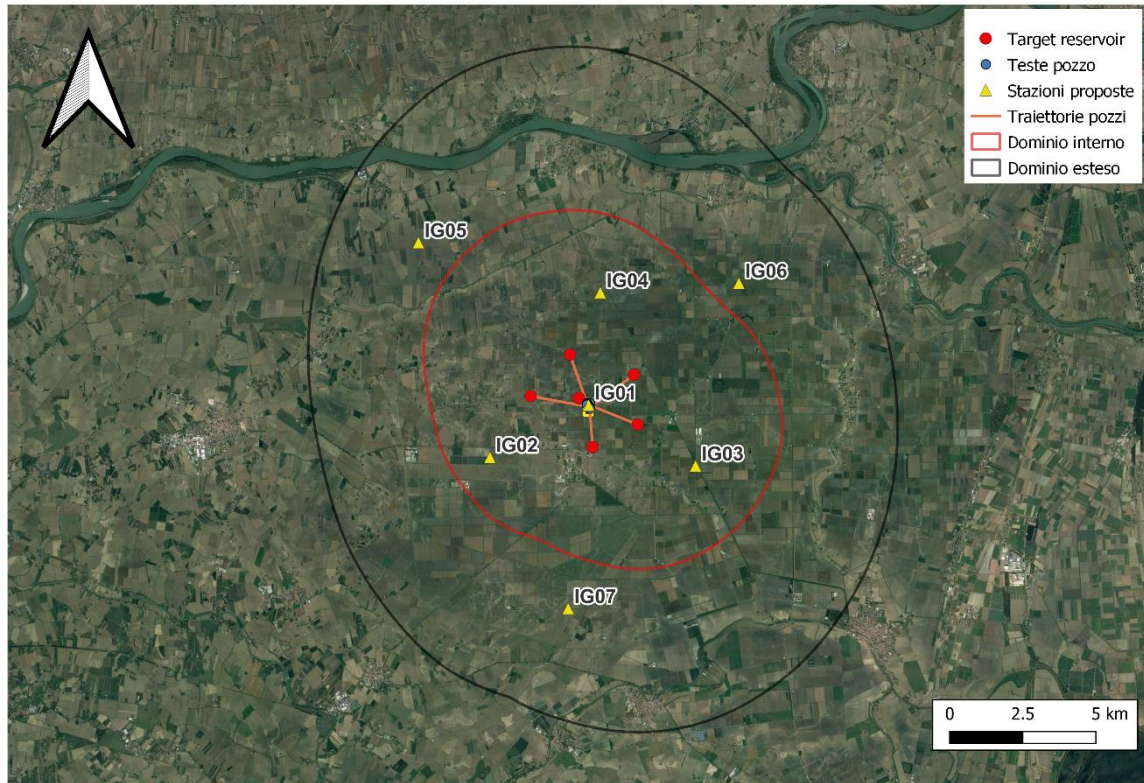


Figura 5 Definizione in pianta del Dominio Interno di rilevazione (linea rossa) e del corrispondente Dominio Esteso (linea nera) per la concessione di Pola in relazione alle posizioni dei pozzi. Sono inoltre riportate anche le posizioni delle stazioni di monitoraggio proposte (IG01-IG07).

4.2 RETE DI MONITORAGGIO

La geometria della rete di monitoraggio è stata definita tenendo in conto sia i target di sensibilità/accuratezza richiesti dalle linee guida (si ricorda, magnitudo locale di completezza circa 0.5 nel DI e accuratezza di localizzazione di qualche centinaio di metri) sia l'assenza di stazioni della RSN nella zona. Questo implica che eventuali deboli sismi nei domini potranno essere localizzati solo tramite la rete locale.

Per il progetto di Pola si propone una rete di monitoraggio costituita da 7 stazioni, di cui una in prossimità della centrale (IG01), 3 stazioni disposte attorno la centrale con una inter-distanza media di circa 6 km e una distanza minima di circa 4 Km (IG02, IG03, IG04), e 3 all'esterno del dominio interno a circa 7.5 km dal centro della concessione (IG05, IG06, IG07). Le coordinate delle stazioni proposte sono elencate in Tabella 1. Il Dominio Interno (DI) è definito dalla curva rossa in Figura 5 ottenuto dall'inviluppo di cerchi centrati alla latitudine e longitudine del fondo dei pozzi di iniezione con raggio di 5 km. Il Dominio Esteso (DE) è ottenuto dall'estensione del dominio interno di circa 5 km ed è indicato dalla linea nera in Figura 5.

L'accuratezza nella localizzazione di ipocentri dipende da diversi fattori, tra cui l'accuratezza nel picking degli arrivi delle fasi sismiche (il quale dipende maggiormente dal rapporto segnale rumore - SNR) l'accuratezza

dei modelli di velocità della crosta, il livello di rumore sismico ambientale, e il numero e la distribuzione delle stazioni sismiche. Quest'ultimo parametro può essere valutato con le mappe di copertura azimutale mediante la quantità chiamata Gap Azimutale (AG). Tale parametro è una quantità geometrica che misura il massimo angolo tra due stazioni adiacenti e per valori di $AG > 180^\circ$ l'accuratezza della localizzazione diminuisce significativamente (Bondár, et al, (2002), Tiira et. Al, (2016)). La mappa di gap azimutale (Fig. 6) consente di prevedere che la geometria di rete proposta sarà adeguata rispetto alle richieste delle linee guida. Una valutazione più quantitativa potrà essere fatta a valle dell'acquisizione del rumore ambientale reale sulle varie stazioni.

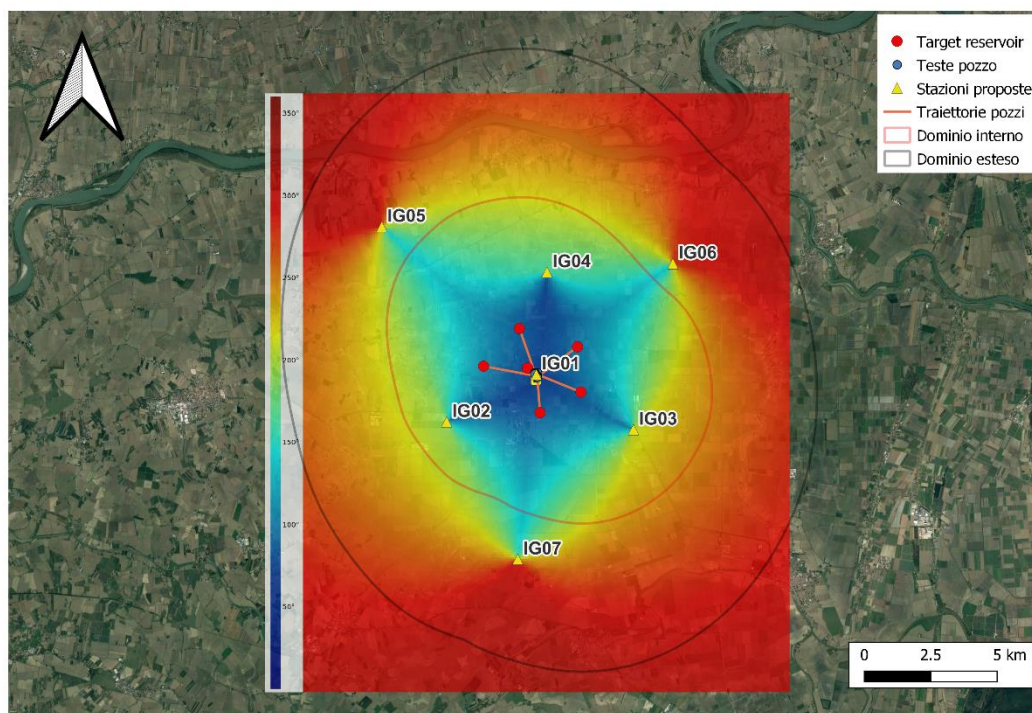


Figura 6 Mappa del Gap Azimutale relativa alla rete di monitoraggio proposta. In pianta, il gap è ottimale nella zona del DI (e dunque l'accuratezza di localizzazione sarà molto elevata, certamente dell'ordine di alcune centinaia di metri, mentre diminuisce nella zona del DE ma rimane a valori sufficientemente bassi per garantire una buona accuratezza anche nel DE (pari o inferiore al chilometro).

Tabella 1 Coordinate geografiche delle stazioni della rete di monitoraggio proposta.

Nome Stazioni	Coordinate geografiche (WGS84)	
	Longitudine	Latitudine
IG01	44.90106	11.98670
IG02	44.88509	11.94401
IG03	44.88248	12.03291
IG04	44.93554	11.99174
IG05	44.95084	11.91314
IG06	44.93839	12.05166
G07	44.83877	11.97786

4.3 SENSIBILITA' DELLA RETE: METODOLOGIA DI CALCOLO

Il metodo utilizzato per simulare la sensibilità della rete sismica segue il lavoro di D'Alessandro et al., (2011), Kraft et al., (2013), Stabile et al., (2013), Carannante et al., (2017) il quale è stato largamente applicato a diverse scale geografiche, da locale a nazionale. L'obiettivo della simulazione è quello di determinare la magnitudo minima di eventi sismici rilevabili dalla rete (micro)sismica dato il livello di rumore sismico ambientale e la disposizione spaziale delle stazioni. La simulazione viene effettuata per ipotetici eventi a diverse profondità focalizzando l'attenzione a quelle prossime al reservoir.

Per tale simulazione viene fatta l'assunzione di eventi sismici deboli con magnitudo locale M_L nell'intervallo $0 < M_L < 3$ al fine approssimarli a sorgenti puntiformi. Viene anche assunto che per tali eventi lo *stress drop* ($\Delta\sigma$) è approssimativamente 1 MPa (D'Alessandro et al 2010). E' possibile descrivere analiticamente lo spettro d'ampiezza delle onde sismiche generate dal terremoto a una distanza ipocentrale R, come

$$V(f) = \frac{CM_0}{R} \frac{2\pi f}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2} e^{\left(-\sum_i \frac{\pi R_i}{\beta_i Q_{0i}}\right)} e^{-\kappa\pi f} \quad (1)$$

Dove C è una costante che dipende dalla velocità delle onde S (β), dal pattern di radiazione delle onde $R_{\theta\omega}$, e dalla densità ρ come $C = \frac{R_{\theta\omega}}{4\pi\rho\beta^3}$.

M_0 è momento sismico scalare stimato da M_L attraverso la relazione:

$$M_0 = 10^{1.5M_L+9.1} \text{ (Madariaga, 1976, Hanks and Kanamori, 1979)}$$

f_c è la frequenza di taglio definite come $f_c = \beta \left(\frac{7}{16} \frac{\Delta\sigma}{M_0}\right)^{\frac{1}{3}}$,

Q_0 è il fattore di qualità che governa l'attenuazione dell'ampiezza delle onde sismiche ($Q_0 \approx 10^2$ nella litosfera, Sato et al 2002), e κ è il parametro del decadimento spettrale che descrive il comportamento dello spettro ad alte frequenze (Anderson et al 1984).

Il metodo implementato per la simulazione descritto brevemente nel paragrafo precedente può essere sintetizzato come segue:

1. Viene calcolato il tempo di propagazione dall'ipotetica sorgente fino alla stazione e il relativo percorso compiuto dall'fronte d'onda sismico per ipocentri posizionati su una griglia regolare a diverse profondità
2. Per ogni ipocentro viene calcolato lo spettro d'ampiezza del segnale mediante l'equazione (1), e infine
3. Viene comparato lo spettro d'ampiezza con il rumore sismico ambientale ottenuto tramite le PPSD

Un evento è considerato *identificabile* solo se il rapporto segnale rumore (SNR) del segnale sismico è maggiore rispetto a una determinata soglia. In letteratura è indicato che un SNR=2 è sufficiente identificare manualmente le fasi sismiche, sebbene la precisione e l'accuratezza sia spesso limitata (Steck et al. 2001, Stabile et al., 2013). Per una scelta conservativa, in questo lavoro, la soglia è definita essere SNR=4.

4.4 SENSIBILITA' DELLA RETE: RISULTATI

Per la rete sismica proposta, viene analizzato lo scenario di rumore ambientale atteso nelle ore diurne (quello più rumoroso) rappresentante lo scenario più conservativo dal punto di vista della capacità di detezione della rete (la sua sensibilità). A tal fine viene utilizzato l'84° percentile della PPSD mostrata in Figura 4.

Le Figure da 6 ad 8 mostrano le mappe di sensibilità della rete per tale scenario a 3 diverse profondità (4, 6, e 8 km). Questo intervallo di profondità ricomprende il volume di sottosuolo all'interno del quale è ragionevole attendere un disturbo del campo di pressione (e dunque di sforzi). La magnitudo locale (M_L) teorica minima rilevabile dalla rete di monitoraggio con sensori posti in superficie, per terremoti fino a 8km di profondità, è migliore di M_L 0 (Figura 6b) sia nel DI che nel DE. Alla luce dei risultati ottenuti da tale simulazione, la rete locale di monitoraggio proposta migliora sicuramente ben oltre le richieste delle linee guida la magnitudo di completezza della rete locale. Chiaramente, queste simulazioni si basano su di uno scenario ipotetico sia relativo al rumore ambientale, sia dei parametri geologici/geofisici delle formazioni. Questi risultati, del tutto realistici poiché basati su dati di input certamente validi (misure dirette in sito in aree limitrofe, e dati estratti dalla letteratura scientifica internazionale) indicano che la rete proposta è indubbiamente adeguata. La valutazione delle reali performance attese sarà eseguita a valle di una campagna di acquisizione del rumore ambientale, in una fase successiva.

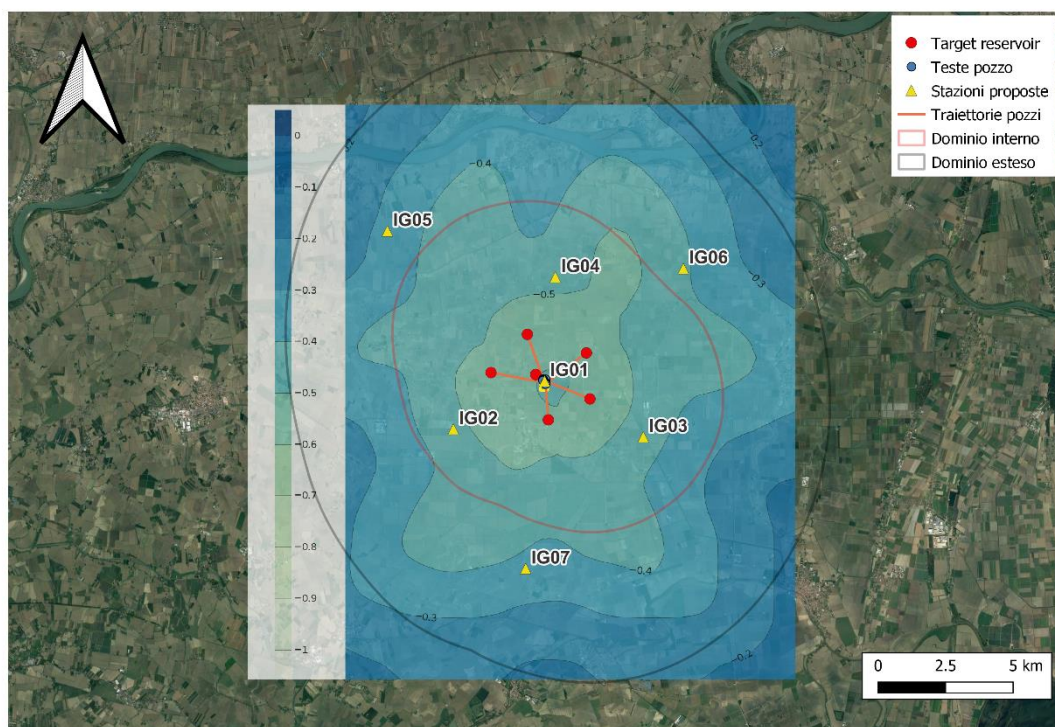


Figura 6 Mappa di sensibilità per la rete di monitoraggio per lo scenario di rumore diurno, giorni feriali (caso più conservativo) per terremoti alla profondità di 4km.

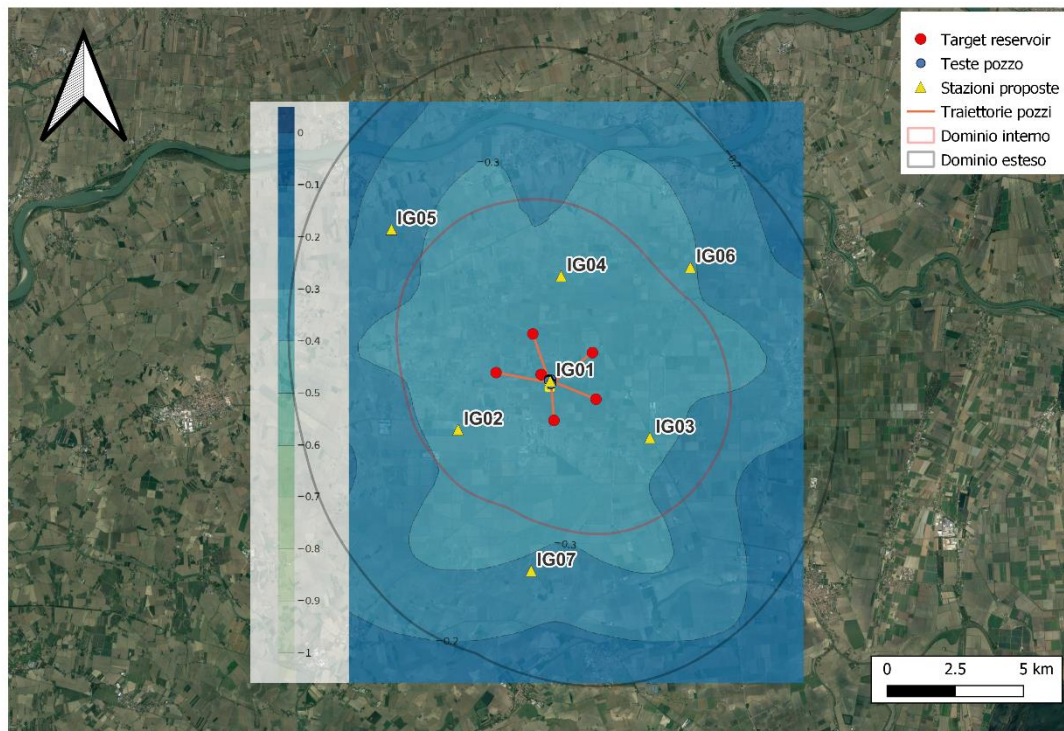


Figura 7 Mappa di sensitività per la rete di monitoraggio per lo scenario di rumore diurno, giorni feriali (caso più conservativo) per terremoti alla profondità di 6km.

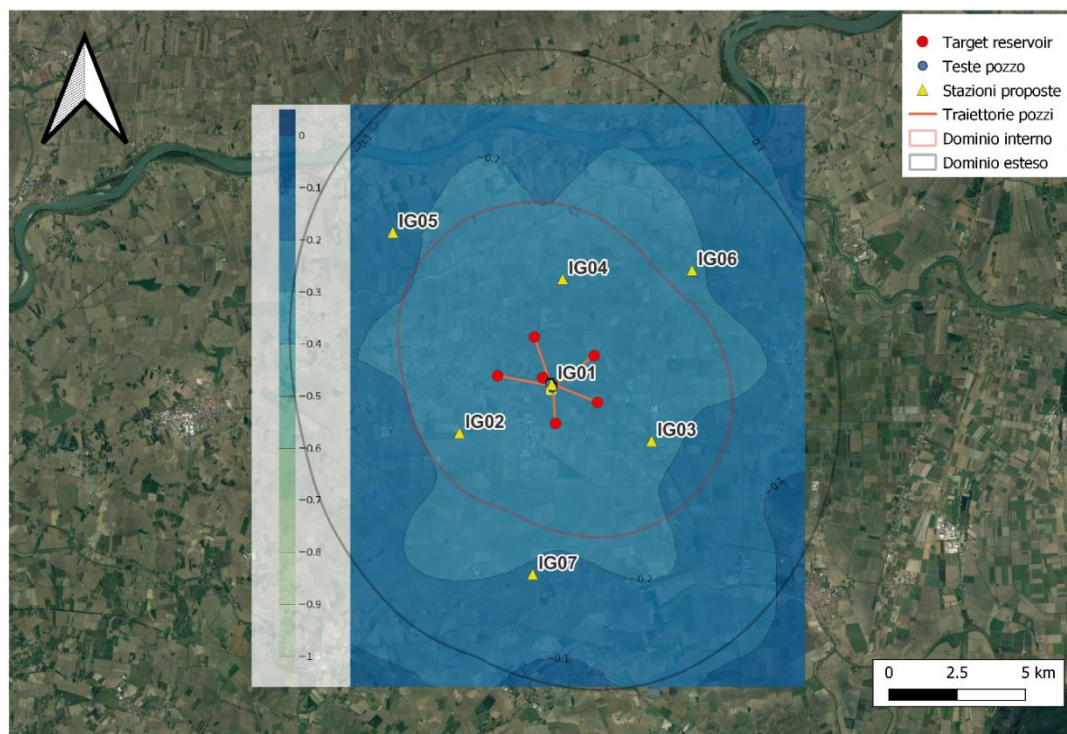


Figura 8 Mappa di sensitività per la rete di monitoraggio per lo scenario di rumore diurno, giorni feriali (caso più conservativo) per terremoti alla profondità di 8km.

5. STAZIONI DI MONITORAGGIO GEODINAMICO: CARATTERISTICHE PREVISTE

Ogni stazione della rete di monitoraggio geodinamico, conforme alle linee guida ministeriali sarà dotata di

- Un sensore velocimetrico triassiale corto periodo, frequenza propria 1s/1Hz ad elevata sensibilità
- Un riflettore InSAR, per garantire buona accuratezza e ripetibilità delle misure
- Un caposaldo di rilevazione geodetica, per effettuare con accuratezza misure GPS ripetute nel tempo.

Una tra le stazioni della rete sarà inoltre dotata di

- Sensore sismico ad elevata dinamica (accelerometro, fondo scala configurabile fino a 4g, range dinamico pari o superiore a 90dB)
- Sensore velocimetrico a medio periodo (periodo uguale o superiore a 30s)
- Postazione GPS in continuo (C-GPS) con trasmissione dati in tempo reale.



Digitalizer 24 bit,
3, 6, 9 channels,
Ethernet, WiFi,
GPRS/G3
Seedlink stream



Triaxial
accelerometer



Triaxial
velocimeter
short-period
(1 Hz-4.5 Hz)



Triaxial
velocimeter
broad-band
(up to 120 s)

Figura 8 Esempio di strumenti sismici per il monitoraggio

Tutta la strumentazione per il monitoraggio sismico avrà la capacità di trasmettere dati in tempo reale, al fine di garantire il processing dati da remoto (automatico in tempo reale, manuale secondo tempistiche da definire successivamente). I dati saranno salvati in formato miniseed, e saranno resi disponibili i metadati associati agli strumenti. La digitalizzazione sarà effettuata con sistema ad ampia dinamica (24bit), con campionamento a 200Hz (velocimetri) e 100Hz (accelerometri).

Alcuni esempi di strumentazione sono mostrati in Figura 8, mentre un esempio di installazione di una stazione sismica è mostrata in Figura 9. Una stazione può essere installata sia in superficie (Figura 9a) o in *pozzetto*, ovvero a profondità massime di 2-300 m (Figura 9b) nel caso di aree aventi rumore sismico ambientale molto elevato.

Per le condizioni considerate in questo studio, come viene anche mostrato dalle mappe di sensibilità, allo stato attuale non si ritiene necessario effettuare installazioni in pozzetto. Ove a valle dell'acquisizione dati di

rumore sismico si osservassero valori non compatibili con le indicazioni delle linee guida, l'installazione in pozzetto verrà presa in considerazione.

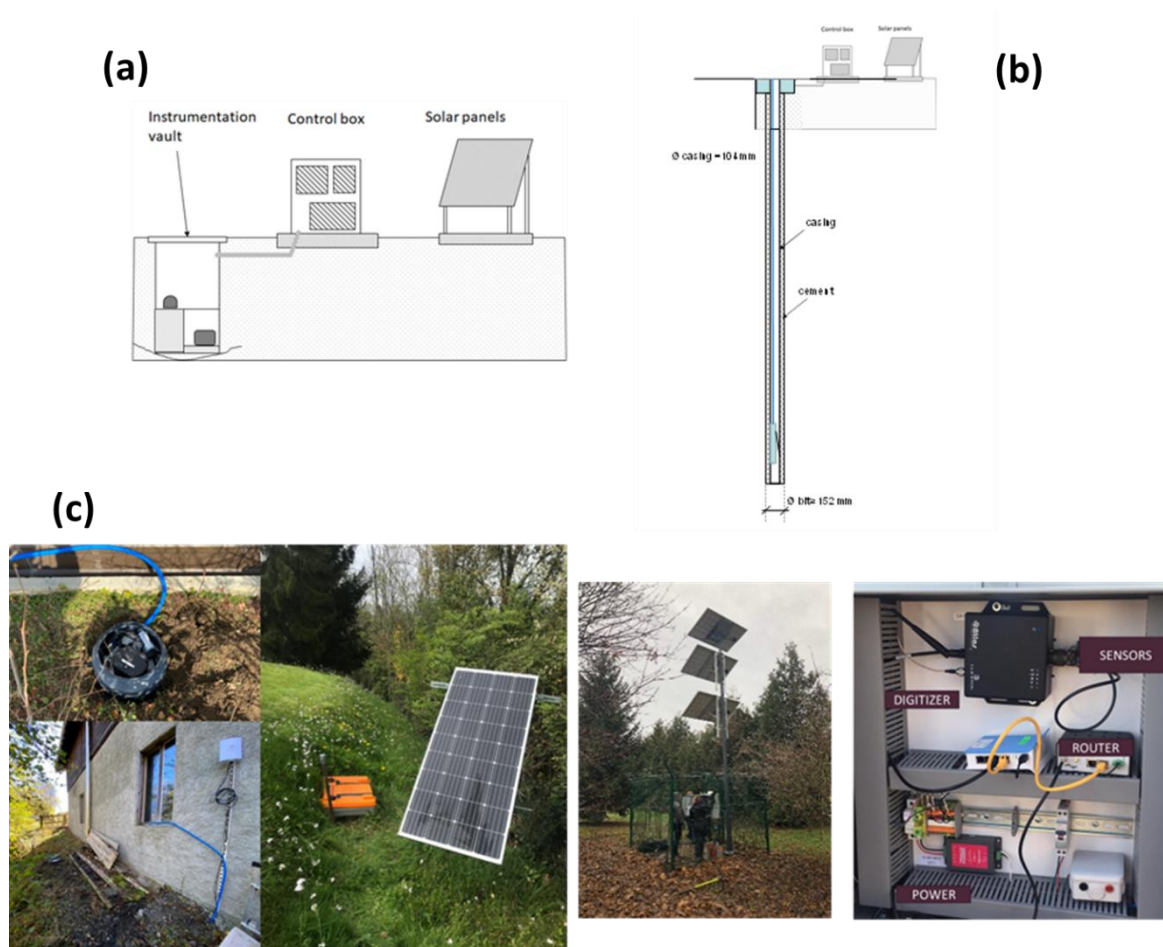


Figura 9 (a) e (b) mostrano una visione schematica di una stazione di monitoraggio posta, rispettivamente, in superficie e in pozzo. In (c) alcuni esempi di installazione delle stazioni utilizzando dei pannelli solari per l'alimentazione elettrica.

6. CONCLUSIONI

Questo rapporto mostra l'analisi condotta per la progettazione e la valutazione di scenari di una rete di monitoraggio geodinamico per una centrale geotermica presso la concessione di Pola a Jolanda di Savoia (FE).

Nella prima fase dello studio, è stata analizzata la sismicità dell'area negli ultimi 32 anni (dal 1990 al 2022). Utilizzando la distribuzione della magnitudo di circa 100 eventi sismici rilevati, è stata stimata la magnitudo di completezza della rete sismica nazionale (INGV). Questa quantità indica la magnitudo minima che può essere rilevabile da una rete sismica in maniera affidabile. Essa corrisponde a circa $M_c > 2$ stimata dalla distribuzione delle magnitudo e in accordo con i valori trovati in letteratura.

Successivamente, è stato caratterizzato il rumore sismico ambientale dell'area analizzando il dato sismico, registrato in continuo per 7 giorni, da una stazione nelle immediate vicinanze della concessione. L'analisi è stata condotta stimando la PSD del segnale sismico e comparato con le curve di riferimento standard. L'informazione quantitativa data dalla PSD è stata utilizzata per simulare diversi scenari di rumore della rete di monitoraggio proposta a 7 stazioni superficiali, sebbene in questo rapporto viene mostrato lo scenario meno conservativo (più rumoroso) utilizzando l'84° percentile della PSD.

Per questo scenario, in linea teorica, la rete di monitoraggio proposta è in grado di rilevare terremoti di magnitudo locale di -0.3/-0.2 nel dominio interno e migliorare di circa 2 ordini di grandezza il livello di magnitudo di completezza della rete sismica nazionale nel dominio esteso.

E' stata infine proposta una configurazione per le stazioni di monitoraggio, 6 delle quali saranno dotate di velocimetro corto periodo, caposaldo geodetico e riflettore InSAR, ed una avrà in aggiunta un dispositivo C-GPS, un velocimetro a medio periodo ed un sensore accelerometrico.

7. BIBLIOGRAFIA

- Anderson J.G., Hough S. (1984). A model for the shape of Fourier amplitude spectrum of acceleration at high frequencies, *Bull. seism. Soc. Am.*, 74, 1969-1994.
- Beyreuther, M., R. Barsch, L. Krischer, T. Megies, Y. Behr and J. Wassermann (2010) ObsPy: A Python Toolbox for Seismology *SRL*, 81(3), 530-533 DOI: 10.1785/gssrl.81.3.530
- Bondár, I., Stephen C. Myers, E. Robert Engdahl, Eric A. Bergman, (2004) Epicentre accuracy based on seismic network criteria, *Geophysical Journal International*, Volume 156, Issue 3, Pages 483–496, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02070.x>
- Brune, J. N. (1970): Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes., *J. Geophysical Res.*, 75, 4997-5009.
- Brune, J. N. (1971): Correction, *J. Geophysical Res.*, 76, 5002.
- D'Alessandro, A., Luzio, D., D'Anna, G., and Mangano, G (2011) Seismic Network Evaluation through Simulation: An Application to the Italian National Seismic Network, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 101, 1213–1232, doi:10.1785/0120100066
- Hanks T.C., Kanamori H. (1979). A moment magnitude scale, *J. Geophysical Res.*, 84, 2348-2350.
- Helm, J. A. (1996). The natural seismic hazard and induced seismicity of the European HDR (hot dry rock) geothermal energy project at Soultz-sous-Forets (Bas-Rhin, France); PhD thesis. Univ. Louis Pasteur, Strasbourg, France.
- Kraft, T., A. Mignan and D. Giardini (2013) Optimization of a large-scale microseismic monitoring network in northern Switzerland, *Geophysical Journal International*, Volume 195, Issue 1, 1 October 2013, Pages 474–490, <https://doi.org/10.1093/gji/ggt225>
- Lay, T. and T. C. Wallace (1995). *Modern global seismology*, International Geophysics Series, 58, Academic Press, San Diego (USA), 521 pp.
- Lomax, A., J. Virieux, P. Volant and C. Berge (2000). Probabilistic earthquake location in 3D and layered models: Introduction of a Metropolis-Gibbs method and comparison with linear locations, in *Advances in Seismic Event Location* Thurber, C.H., and N. Rabinowitz (eds.), Kluwer, Amsterdam, 101-134
- Peterson, J. (1993). Observation and modeling of seismic background noise, *U.S.G.S. Tech. Rept.*, 93-322, 1-95
- PROCIV (2022) Classificazione sismica al 31 marzo 2022, Presidenza del Consiglio dei Ministri, Dipartimento della protezione civile, disponibile al seguente link: <https://rischi.protezionecivile.gov.it/static/c7650fa8eac014a28ef074236bb234f7/mappa-classificazione-sismica-aggiornata-al-31-marzo-2022-provincia.pdf>
- Schorlemmer, D., F. Mele, and W. Marzocchi (2010) A completeness analysis of the National Seismic Network of Italy, *J. Geophys. Res.*, Vol. 115, B04308, doi:10.1029/2008JB006097
- Stabile T. A., G. Iannaccone, A. Zollo, A. Lomax, M. F. Ferulano, M. L. V. Vetri, L. P. Barzaghi, A comprehensive approach for evaluating network performance in surface and borehole seismic monitoring, *Geophysical Journal International*, Volume 192, Issue 2, 1 February 2013, Pages 793–806, <https://doi.org/10.1093/gji/ggs049>
- Terlizzese (2016) Linee guida per l'utilizzazione della risorsa geotermica a media e alta entalpia, <https://unmig.mise.gov.it/images/docs/linee-guida-geotermia.pdf>
- UNMIG (2014) Indirizzi e linee guida per il monitoraggio della sismicità, delle deformazioni del suolo e delle pressioni di poro nell'ambito delle attività antropiche, <https://unmig.mise.gov.it/index.php/it/sicurezza/geomonitoraggi/linee-guida>