Accordo Quadro 2024

MASE, RER, Comune di Budrio, INGV,

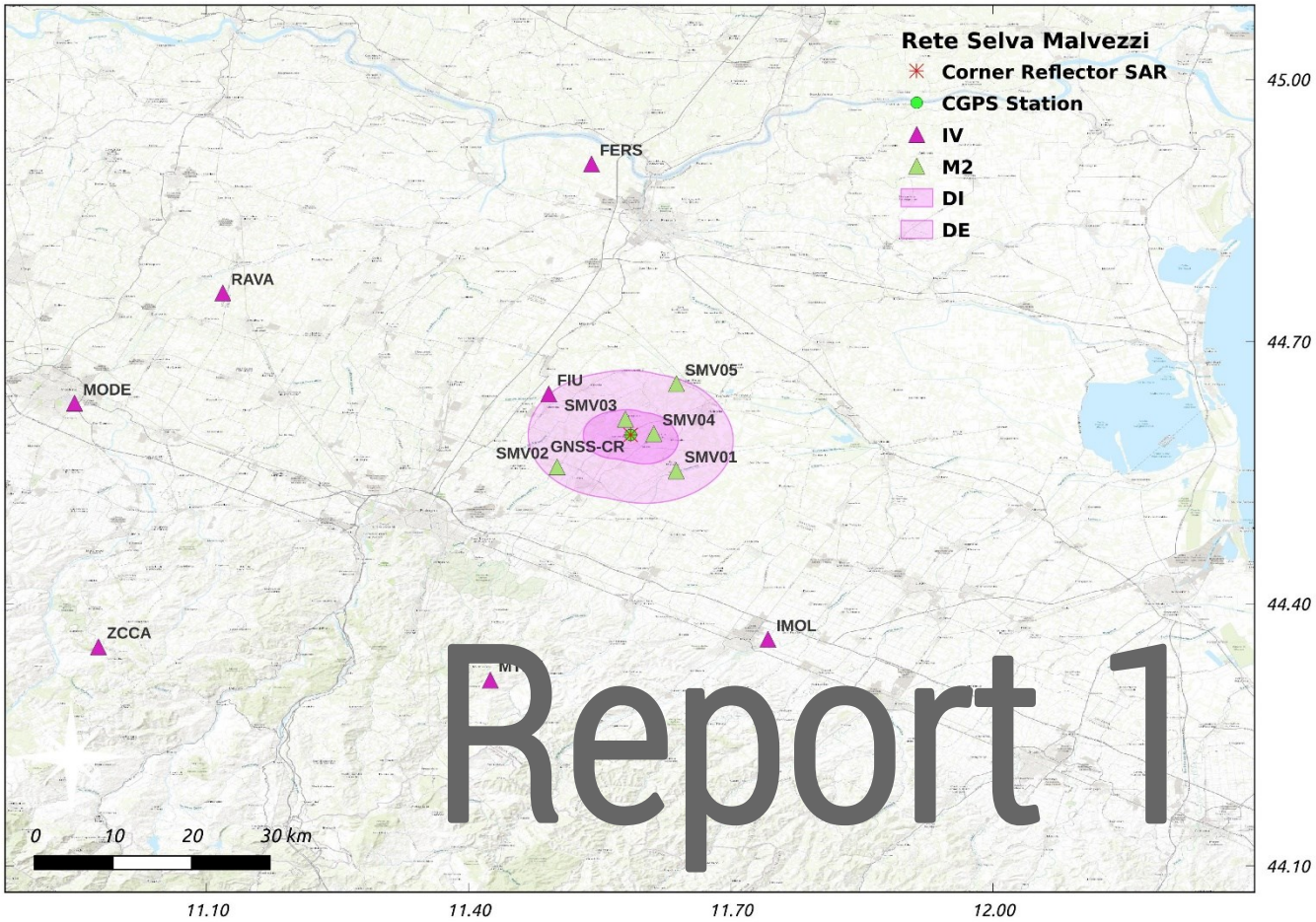
Po Valley Operations pty ltd

PROGETTO DI MONITORAGGIO CONCESSIONE SELVA MALVEZZI

Responsabili di Progetto: Giuseppe Pezzo e Lucia Zaccarelli

Autori: L. Zaccarelli, G. Pezzo, L. Anderlini, E. Vitagliano, M. Errico, S. Baranello, A. Garcia, M. Anselmi, S. Carannante, F. Pintori e G. Zerbinato

Redazione: M. Errico



Report 1

INGV

CMS CENTRO DI MONITORAGGIO DELLE ATTIVITÀ DI SOTTOSUOLO

PREMESSA 4
1 PARAMETRI DI MONITORAGGIO 6
1.1 TLS: DEFINIZIONE PROVVISORIA DEI DOMINI DI MONITORAGGIO 6
1.2 TLS: PARAMETRI E SOGLIE 7
1.3 TLS: LIVELLI E COLORI DI ALLERTA 8
2 INQUADRAMENTO GEOLOGICO 9
2.1 ASSETTO TETTONO-STRATRIGRAFICO REGIONALE 9
2.2 ASSETTO TETTONO-STRATIGRAFICO LOCALE 10
2.3 ASSETTO DEFORMATIVO 12
3 SISMICITÀ DELL'AREA 13
4 MONITORAGGIO SISMICO 16
4.1 DESCRIZIONE DELLA RETE SISMICA 17
4.2 FUNZIONAMENTO DELLA RETE SISMICA 2022-2024 19
4.3 MONITORAGGIO DELLA SISMICITÀ DAL 2022-2024 21
5 MONITORAGGIO DELLE DEFORMAZIONI DEL SUOLO 24
5.1 DESCRIZIONE RETE GNSS 24
5.2 ANALISI DELLE INTERDISTANZE 25
5.3 ANALISI DELLA MONUMENTAZIONE DEL SITO GNSS 28
5.4 ANALISI DI QUALITÀ DEI DATI GPS 29
5.5 DATI STORICI INSAR 30
6 DATI DI PORTATA E PRESSIONE 32
7 COMUNICAZIONE E DISSEMINAZIONE 33
8 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE 34
APPENDICE A: PPSD DELLE COMPONENTI ORIZZONTALI PER LE 6 STAZIONI SISMICHE INTERNE AL DE 36
GLOSSARIO 38
BIBLIOGRAFIA 39
ELENCO DELLE FIGURE 42
ELENCO DELLE TABELLE 44

Accordo Quadro 2024

MASE, RER, Comune di Budrio, INGV, Po Valley Operations pty ltd

PROGETTO DI MONITORAGGIO CONCESSIONE SELVA MALVEZZI

Relazione semestrale n.1

Lucia Zaccarelli[1], Giuseppe Pezzo[2], Letizia Anderlini[1], Eleonora Vitagliano[2], Maddalena Errico[1], Sofia Baranello[1], Alexander Garcia[1], Mario Anselmi[2], Simona Carannante[3], Francesco Pintori[1], Giampaolo Zerbinato[1]

[1] INGV, Sezione di Bologna, Italia; [2] INGV, Sezione ONT, Roma;

[3] INGV, Sezione di Milano, Italia.

15/01/2025

Premessa

La presente relazione descrive le attività svolte dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) nel ruolo di Struttura Preposta al Monitoraggio (SPM) nell'ambito dell'Accordo Quadro per l'applicazione integrata degli Indirizzi e Linee Guida per il Monitoraggio della sismicità, delle deformazioni del Suolo e delle pressioni di poro (ILG) alla concessione di coltivazione idrocarburi denominata "Selva Malvezzi" in Emilia Romagna.

In data 1 gennaio 2017 la società Po Valley Operations pty ltd (di seguito "Concessionario") ottiene l'autorizzazione a perforare il pozzo *Podere Maiar 1 dir* (PM1) nella frazione di Mezzolara, comune di Budrio (Bologna). Il pozzo viene quindi realizzato tra novembre e dicembre 2017 (1340 m di profondità) e nei test che seguono risulta mineralizzato nelle sabbie della formazione Porto Garibaldi (Pliocene medio), e utile alla produzione di gas metano (Po Valley, 2021).

Il 4 luglio 2023 il pozzo entra in produzione (come si evince dai dati di produzione trasmessi dal concessionario).

Di seguito riportiamo una cronologia essenziale delle fasi che hanno portato alla stesura dei documenti che regolano il monitoraggio (Tabella P.1) e dei passaggi di dati e informazioni utili ai fini del monitoraggio dal Concessionario alla SPM (Tabella P.2).

Data	Documento
12 giugno 2023	Trasmissione Accordo Quadro (AQ) tra il Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MaSE), Regione Emilia Romagna, comune di Budrio e INGV, nel quale l'INGV viene nominato Struttura Preposta al Monitoraggio (SPM) per la concessione di coltivazione idrocarburi denominata Selva Malvezzi.
10 luglio 2023	Riunione di insediamento del comitato
29 settembre 2023	Trasmissione Documento di funzionamento e Protocollo trasmissione dati
22 maggio 2023	Invio protocolli d'Intesa tra Comune-Concessionario e Comune-SPM: inizio formale del monitoraggio
29 agosto 2024	Comunicazione da parte dell'INGV delle definizioni preliminari di DI e DE utili al monitoraggio.

Tabella P.1. Date relative alla realizzazione e trasmissione dei documenti necessari a regolamentare il monitoraggio.

Trattandosi del primo rapporto semestrale, l'obiettivo principale è quello di verificare la rispondenza delle reti di monitoraggio integrate ai requisiti dettati dagli ILG, sia per la rete sismica che per quella geodetica. Inoltre, vengono riportati i risultati del monitoraggio dei primi sei mesi di progetto, ovvero dal 22/05/2024 al 22/11/2024.

Data	Dati trasmessi
20 gennaio 2023	Trasmissione relazioni su studi di subsidenza e installazione reti di monitoraggio • Ubicazione del pozzo di estrazione. • Ubicazione delle stazioni della rete sismica, rapporto di installazione e verifica del dato. • Ubicazione delle stazioni della rete geodetica, rapporto di installazione ed elaborazione del dato. • Caratteristiche geometriche del giacimento. • Figure a supporto.
13 settembre 2023	Metadati stazioni sismiche (aggiornamento nome rete e stazioni)
2 ottobre 2023	Coordinate pozzo e giacimento
17 luglio 2024	Trasferimento dati sismici pregressi (17 febbraio 2022 - 16 luglio 2024)
29 luglio 2024	Trasferimento dati: • GNSS in formato RINEX per il periodo 5 giugno 2020 - 28 luglio 2024. • Assestimetri e piezometri dal 16 febbraio 2022 al 22 luglio 2024. • Dati di produzione e pressione testa pozzo dal 4 luglio 2023 al 30 giugno 2024.

Tabella P.2. Date relative alle diverse fasi di trasmissione dati dal concessionario alla SPM.

1 Parametri di monitoraggio

Gli ILG (Dialuce et al., 2014) prescrivono la redazione, ad opera del Comitato, di un Documento di Gestione Operativa del Monitoraggio (DGOM) nel quale vengono indicati i parametri utili al monitoraggio di ogni singola concessione. Nelle more della realizzazione di questo documento, vengono adottati i parametri riportati dagli ILG stessi al § 9, in cui vengono definite le modalità di monitoraggio per le deformazioni del suolo, la pressione di poro e l'attività sismica nella zona interessata dalle attività antropiche. Mentre per le deformazioni del suolo e le pressioni di poro il monitoraggio mira a identificare eventuali variazioni spazio-temporali di medio-lungo periodo rispetto a dei valori di fondo (*background*), per la sismicità il monitoraggio consiste in un controllo in tempo quasi-reale (entro 24/48 ore) degli eventi sismici avvenuti nei domini di interesse. Sulla base della sismicità rilevata si definisce lo stato di allerta seguendo uno schema di livelli di attivazione (sistema a semaforo, *Traffic Light System TLS*) a cui corrispondono ben determinati limiti di operatività/produttività all'interno della concessione ai fini di limitare il verificarsi di eventi sismici di origine antropica. La definizione del sistema a semaforo è soggetta a regolamentazioni nazionali o regionali e si basa sui seguenti parametri:

- Domini di monitoraggio
- Parametri sismici
- Livelli e colori di allerta

Gli ILG propongono un sistema a semaforo con automazione (automaticamente si passa al livello di attivazione corrispondente nel caso di superamento di una soglia tra quelle definite per i parametri monitorati) solo in casi di reiniezione di fluidi nel sottosuolo. In caso contrario si parla di semaforo senza automazione e il passaggio di livello viene stabilito da un "Comitato Decisionale" composto da Regione UNMIG e concessionario, sulla base del superamento dei valori di riferimento per i parametri monitorati definiti nel DGOM.

1.1 TLS: Definizione provvisoria dei domini di monitoraggio

In attesa di uno specifico DGOM per Selva Malvezzi abbiamo definito dei domini di monitoraggio provvisori (comunicazione al comitato del 29 agosto 2024) prendendo in considerazione le caratteristiche minime richieste negli ILG (§ 5), tenendo conto dell'attività prevista nella concessione, di sola estrazione di gas (no stoccaggio, no reiniezione) e dell'estensione ridotta del giacimento. Abbiamo perciò considerato un'area di 3 km attorno alla proiezione in superficie dell'area mineralizzata e ugualmente un'estensione di 3 km sotto la sua profondità massima per il Dominio Interno (DI); e un volume di ulteriori 5 km attorno al DI per il Dominio Esteso (DE). La

mappa con i contorni dei due domini è riportata in Figura 1.1. È importante sottolineare che una definizione condivisa dei domini di monitoraggio è rimandata in fase di preparazione del DGOM.

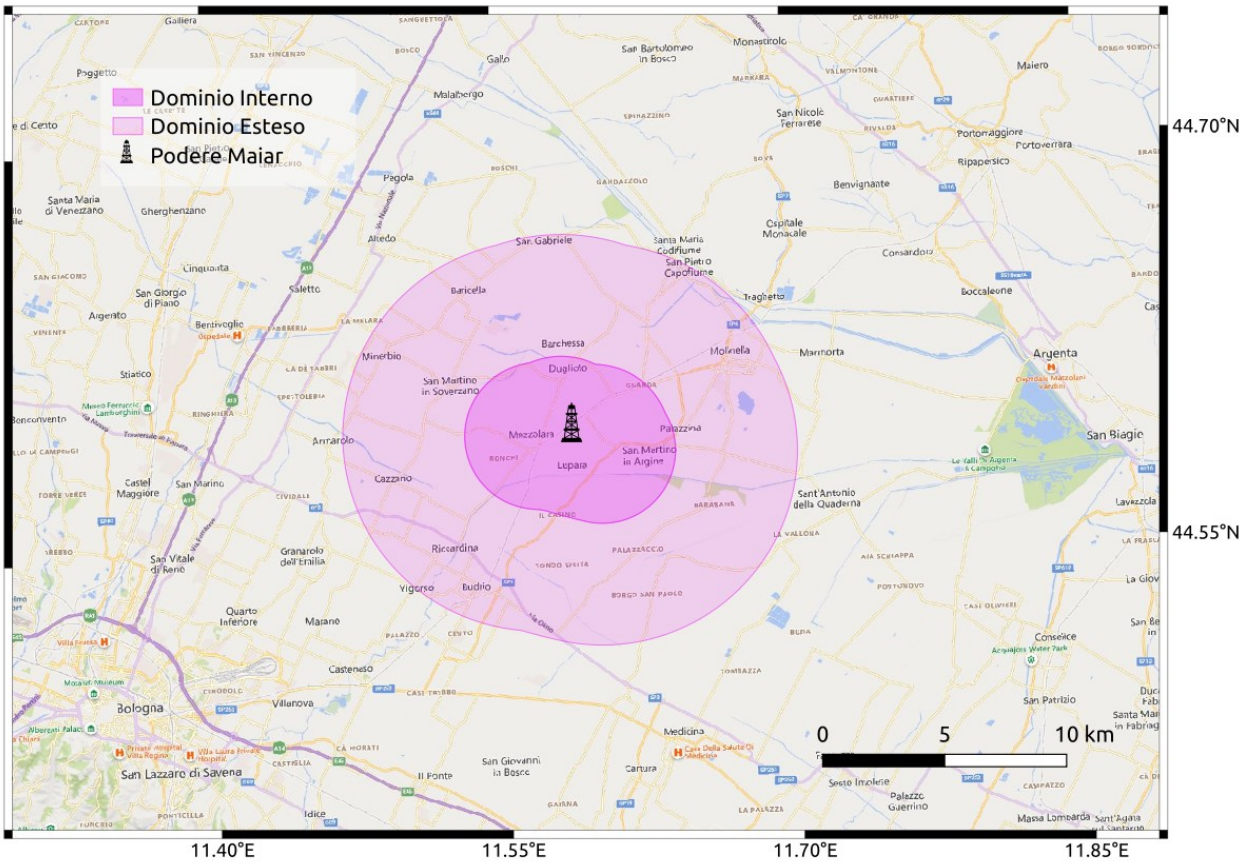


Figura 1.1. Domini di monitoraggio Interno (DI) ed Esteso (DE) provvisori adottati attualmente per il monitoraggio della concessione Selva Malvezzi.

1.2 TLS: Parametri e valori di soglia/riferimento

La gestione del monitoraggio delle attività antropiche prevede l'applicazione di un sistema a semaforo che può dipendere da tutti o alcuni dei seguenti parametri sismici:

- Coordinate ipocentrali (se l'ipocentro ricade internamente al DI).
- Numero degli eventi sismici rilevati nel DI.
- Magnitudo dell'evento (M_L, M_W, etc).
- Velocità di Picco, *Peak Ground Velocity* (PGV) - ampiezza massima della velocità del moto del suolo.
- Accelerazione di Picco, *Peak Ground Acceleration* (PGA) - ampiezza massima dell'accelerazione del moto del suolo.
- Intensità macrosismica (mappa di isosiste, basate per esempio su EMS98).

La scelta dei parametri sismici da includere nella definizione di un TLS e dei loro valori di soglia/riferimento dipende sia dalle condizioni geodinamiche e geomeccaniche del sito, sia da regolamentazioni amministrative specifiche. Tali parametri e valori corrispondenti possono quindi variare da concessione a concessione, e saranno oggetto dello specifico DGOM.

Il TLS proposto dagli ILG si basa sulle coordinate ipocentrali rispetto al DI, la magnitudo, la PGV e la PGA. Anche se i valori di soglia/riferimento sono da definire caso per caso, gli ILG suggeriscono dei valori indicativi che sono presentati nella Figura 1.2. Nel caso della concessione Selva Malvezzi non si applica il semaforo con automatismo, non essendo previste attività di reiniezione. Il passaggio di livello di attivazione sarà quindi oggetto di discussione in sede di Comitato Decisionale in seguito al superamento del valore di riferimento per uno dei parametri monitorati.

Livello di attivazione	Semaforo	M_{max}	PGA (% g)	PGV (cm/s)
0	Verde	$M_{max} \leq 1.5$	-	-
1	Giallo	$M_{verde} \leq M_{max} \leq 2.2$	0.5	0.4
2	Arancio	$M_{giallo} \leq M_{max} \leq 3.0$	2.4	1.9
3	Rosso	$M_{arancio} < M_{max}$	6.7	5.8

Figura 1.2. Livelli di attivazione e valori soglia per i parametri sismici come definiti negli ILG, § 9, Tabella 3. Nel documento originale l'unità fisica di PGV è stata erroneamente indicata in cm/s^2.

1.3 TLS: Livelli e colori di allerta

I quattro livelli/colori del TLS possono essere riassunti in maniera sintetica, come segue (ILG, §. 9.2):

- Ordinario – modalità operativa e monitoraggio ordinari.
- Attenzione – operatività ordinaria, comunicazione del monitoraggio.
- Riduzione – riduzione della attività produttive, comunicazione del monitoraggio.
- Sospensione – stop delle attività produttive, comunicazione del monitoraggio.

2 Inquadramento geologico

La concessione di coltivazione "Selva Malvezzi" si colloca 20-25 km a Nord-Est di Bologna e ricade nel settore emiliano della Pianura Padana. Dal punto di vista della geologia di superficie, l'area è caratterizzata da sedimenti di canale e di pianura fluviale, depositati negli ultimi centinaia e migliaia di anni dai fiumi e dai paleo-corsi d'acqua di provenienza appenninica e alpina. Al di sotto di queste successioni, i depositi diventano deltizi e costieri, e, a maggiore profondità, marcatamente marini. Parte di questi depositi è stata messa in movimento dall'attività tettonica che ha strutturato nel passato il tratto emiliano-romagnolo dell'Appennino settentrionale. Inoltre, nell'area della concessione, a profondità comprese tra 1200 e 1500 metri sotto la superficie e fra i sedimenti marini, sono stati individuati alcuni strati di sabbie litificate particolarmente porose, che contengono gas metano in volumi significativi per l'estrazione.

Le tre sezioni seguenti descrivono in maniera più dettagliata l'assetto tettono-stratigrafico a scala regionale e locale dell'area in studio, e la deformazione del suolo, con particolare riferimento al fenomeno della subsidenza, sia naturale che antropica, che interessa l'area.

2.1 Assetto tettono-stratrigrafico regionale

La concessione "Selva Malvezzi" si trova in un dominio geodinamico dell'Appennino Settentrionale caratterizzato da tettonica compressiva (Figura 2.1a). In particolare, l'area della concessione è ubicata tra le città di Bologna e Ferrara, nel settore emiliano della Pianura Padana, e rientra nell'Arco Ferrarese-Romagnolo della catena appenninica (Carminati et al., 2003; Scrocca et al., 2003; 2007). Questa struttura arcuata limita e configura il prisma di accrezione della catena (Figura 2.1b), un corpo sedimentario che si è formato in relazione alla subduzione Ovest-vergente della placca Adriatica al di sotto della placca Europea (Argnani e Ricci Lucchi, 2001; Boccaletti et al. 1990; Doglioni, 1993; Ricci Lucchi 1986).

Rispetto all'evoluzione strutturale dell'area, i sistemi sepolti di pieghe e sovrascorrimenti del prisma sono migrati gradualmente a partire dal Pliocene verso le zone esterne della catena (Figura 2.1b), secondo successive fasi compressive (Carminati e Doglioni, 2003; Carminati et al., 2010; Doglioni, 1993). Nello stesso periodo, i sedimenti in prevalenza torbiditici e originati dall'erosione dalle parti emerse della catena sono stati depositati nei bacini collocati ai margini interni dei sovrascorrimenti e in avanfossa (e.g., Ghielmi et al., 2013). Con il progressivo aumento della coltre sedimentaria, l'ambiente deposizionale è evoluto da marino a continentale

e, a partire dal Pleistocene Medio, la sedimentazione è stata prevalentemente di tipo alluvionale (Agip, 1997; Martelli et al., 2009).

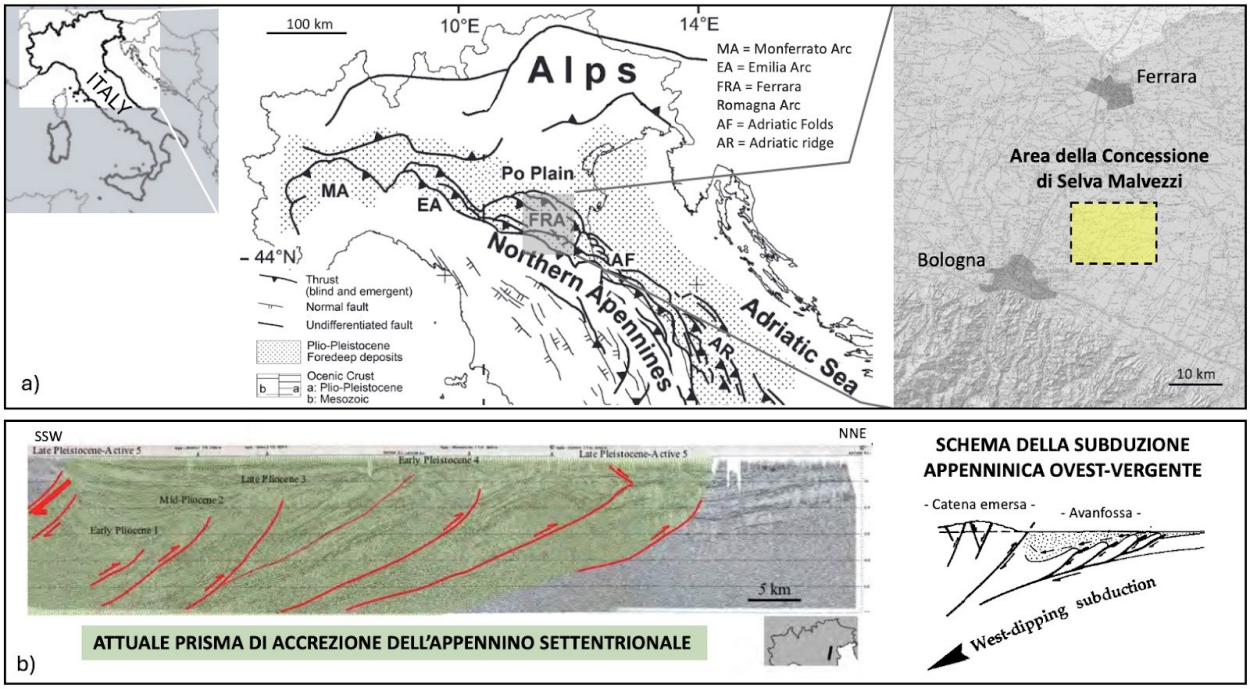


Figura 2.1. Strutture tettoniche dell'Appennino Settentrionale e area di ubicazione della concessione di Selva Malvezzi: a) mappa dei principali lineamenti tettonici dell'Appennino Settentrionale e settore emiliano della Pianura Padana con area di ubicazione della concessione (destra); b) sezione sismica riferita all'Arco Ferrarese-Romagnolo con i principali sovrascorrimenti del prisma di accrezione (linee rosse). Le immagini sono state modificate a partire dai lavori di Carminati et al. (2010), Doglioni (1994) e Scrocca et al. (2007). La carta tecnica regionale mostrata in a) fa riferimento alla Cartografia Geologica del Servizio di Geologia, Sismica e Suoli della Regione Emilia-Romagna (Geoportale RER).

2.2 Assetto tettono-stratigrafico locale

Più nel dettaglio, la concessione di Selva Malvezzi si colloca a Nord-Est di Bologna, tra gli abitati di Budrio, Minerbio e Molinella (Figura 2.2a). In questa zona, il paesaggio della pianura emiliana è caratterizzato dalla presenza di dossi e depressioni, legati agli attuali sistemi di canale-argine-pianura (e.g., Fiume Reno e Torrente Idice) o ereditati dalla paleo-morfologia olocenica (Figura 2.2b, Martelli et al., 2009). A questi sistemi si associano sedimenti con granulometrie variabili, da peliti a ghiaie, e geometrie deposizionali con andamenti trasversali all'asse della catena appenninica (Figura 2.2c).

Come descritto a scala regionale, l'assetto tettono-stratigrafico del sottosuolo all'interno della concessione è legato all'interazione tra attività tettonica compressiva, processi di sedimentazione e subsidenza. Dal punto di vista strutturale si individuano una serie di pieghe e sovrascorrimenti a vergenza appenninica, con assi orientati ONO-

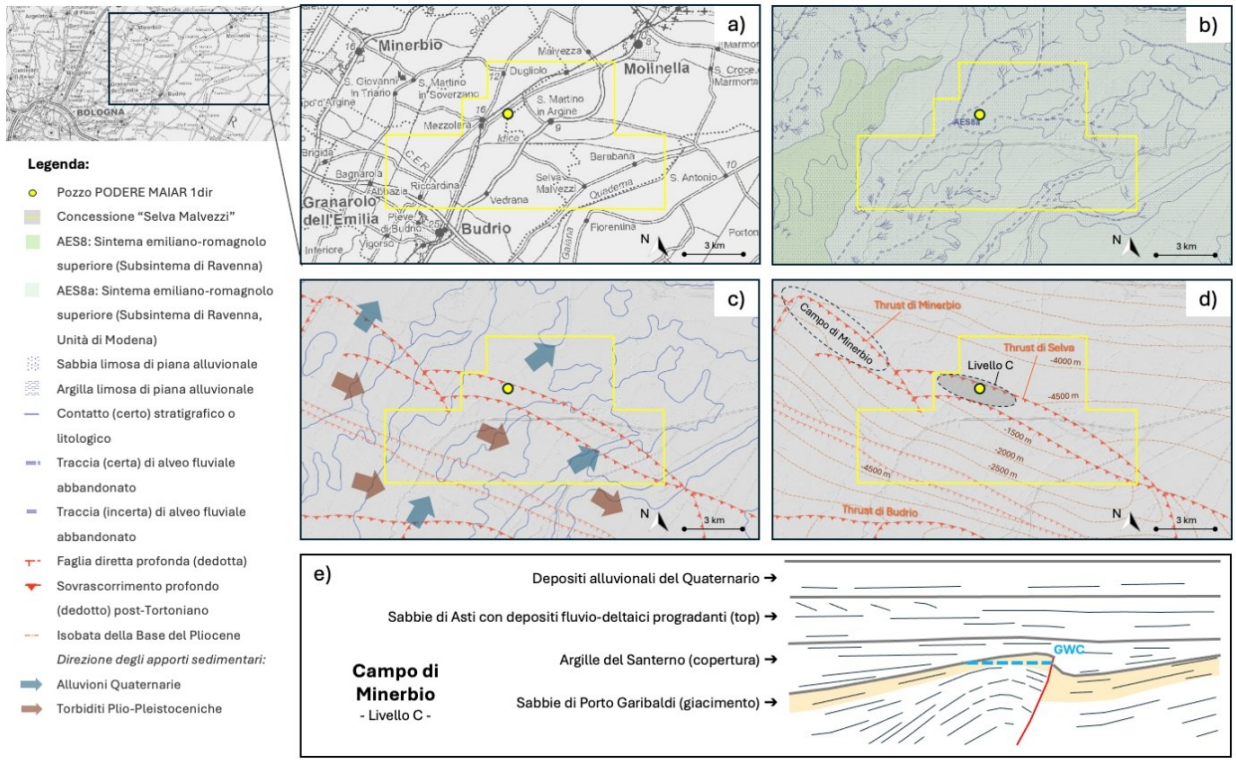


Figura 2.2. Concessione di Selva Malvezzi: a) carta tecnica regionale; b) unità geologiche di superficie; c) direzione degli apporti sedimentari in superficie e in profondità; d) lineamenti strutturali sepolti e andamento in profondità della base del Pliocene; e) sezione geologica trasversale all'asse del sovrascorrimento di Minerbio. Le immagini a) - d) fanno riferimento alla Cartografia Geologica del Servizio di Geologia, Sismica e Suoli della Regione Emilia-Romagna (Geoportale RER). La sezione e) è stata ridisegnata sulla sezione sismica interpretata del campo di stoccaggio di Minerbio (*Snam website*, Campo di stoccaggio di Minerbio).

ESE (sovrascorrimento di Minerbio e Selva) e circa O-E (sovrascorrimento di Budrio) (Figura 2.2d), e ricoperti da coltri sedimentarie con spessori variabili (Agip, 1997).

La base dei sedimenti Plio-Pleistocenici supera nell'area i 4500 m di profondità, mentre il suo andamento mostra che le zone depocentrali dell'avanfossa si sviluppano prevalentemente in direzione NO-SE (Figura 2.2d). A partire dal Miocene superiore queste zone depresse sono sede del passaggio verso Sud-Est delle correnti torbiditiche di mare profondo e della deposizione di importanti spessori di sedimenti porosi (Figura 2.2c; Ghielmi et al., 2013). Fra questi sedimenti, si identificano, in particolare, le sabbie plioceniche della Formazione di Porto Garibaldi, che ospitano i livelli a gas C1 e C2 scoperti nella concessione di Selva Malvezzi (indicato come "livello C" in Figura 2.2d). Si tratta di trappole stratigrafico-strutturali, in cui i livelli produttivi vanno in *onlap* su una anticlinale di rampa (Po Valley, 2021). La struttura antiforme è infine sigillata dalle argille plioceniche della Formazione del Santerno come mostra in maniera schematica la sezione in Figura 2.2e, tracciata attraverso un analogo livello C del Campo di stoccaggio di Minerbio.

2.3 Assetto deformativo

L'assetto tettono-stratigrafico regionale ha un forte impatto anche sulle deformazioni del suolo dell'area. La Pianura Padana è un'area tra le più soggette al fenomeno della subsidenza in Italia. Qui la subsidenza naturale è dovuta principalmente alla compattazione dei sedimenti della piana alluvionale del Po, che si compattano a causa del loro peso e spesso non sono controbilanciati dall'apporto di nuovo materiale fluviale. Nelle aree di grande subsidenza tettonica, l'accumulo dei sedimenti è maggiore. Esiste una relazione tra lo spessore dei sedimenti e la subsidenza naturale: essa si riduce infatti nelle aree dove lo spessore dei sedimenti è minore, ad esempio nell'area a Nord del delta (Gambolati et al., 1998, 1999; Teatini et al., 2005, 2006).

Inoltre la Pianura Padana è sicuramente uno dei casi più noti di subsidenza indotta da un'intensa attività umana, imputabile a due principali processi: lo sfruttamento di reservoir di idrocarburi e delle falde acquifere. La produzione di idrocarburi è iniziata in Pianura Padana circa a metà del secolo scorso e oggi, con la generale diminuzione della produzione di idrocarburi nell'area, l'impatto di questo tipo di attività risulta ridotto rispetto al passato. Lo sfruttamento delle falde acquifere, che ha raggiunto un picco tra gli anni '70 e '80 ha interessato acquiferi superficiali e profondi, per scopi industriali, agricoli e civili, ed è attivo ancora oggi seppur in maniera ridotta.

A scala locale, nella porzione di territorio comprendente la concessione di Selva Malvezzi tra i comuni di Budrio e Molinella, i dati di deformazione pubblicati della Regione Emilia Romagna e dall'Agenzia Regionale per la Prevenzione l'Ambiente e l'Energia dell'Emilia Romagna (ARPAE, https://servizigis.arpae.it/Html5-Viewer/index.html?locale=itIT&viewer&viewer=Geoportal.Geoportal) mostrano una generale subsidenza di pochi millimetri con un massimo di abbassamento entro i 15-20 mm/anno nel centro abitato di Budrio, per il periodo 2016-2021. Dal 1992 al 2021, si osserva nell'area una generale diminuzione della subsidenza.

3 Sismicità dell'area

L'analisi preliminare della sismicità storica e recente della zona della concessione di coltivazione di idrocarburi di Selva Malvezzi è stata svolta prendendo in considerazione un'area di circa 700 Km^2 compresa tra le latitudini 44.5–44.7 e le longitudini 11.4–11.8, corrispondente all'incirca all'area inclusa tra Malalbergo e Medicina, in direzione Nord-Sud, e tra Castel maggiore e Argenta in direzione Est-Ovest (Figura 1.1). Abbiamo preferito limitare la variabilità in latitudine in modo da escludere eventuali sequenze sismiche associate alle strutture appenniniche o a quelle della zona del Ferrarese, concentrandoci così su un ambito più specifico e rilevante ai fini dello studio.

Per quanto riguarda la sismicità storica dell'area, è stato consultato innanzitutto il catalogo PFG (Progetto Finalizzato Geodinamica; Postpischl, 1985) in cui sono raccolti i terremoti italiani avvenuti dall'anno 1000 fino al 1980, senza soglia di intensità, corredati di tutti i parametri epicentrali. Questo rappresenta, a tutt'oggi, un punto di riferimento per lo studio dei terremoti storici di bassa magnitudo.

Successivamente, i dati estrapolati dal PFG sono stati confrontati e integrati, con quelli inclusi nel più recente e aggiornato Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15; Rovida et al., 2022), che contiene tutti gli eventi sismici dal 1000 al 2020 con Magnitudo ≥ 4.0 o intensità ≥ 5, escludendo quindi gli eventi di minore energia, ma coprendo gli anni dal 1980 al 2020 e in certi casi riportando dati rivisti e più accurati.

Il lavoro svolto ha portato all'identificazione di 34 terremoti tra eventi principali e repliche ad essi associati, tutti eventi di bassa (M < 4) o moderata (M < 5.5) energia.

Di questi 34 eventi però, alcuni che da PFG ricadono internamente alla zona investigata, vengono poi localizzati, in base ai nuovi studi del CPTI15, esternamente al poligono. Escludendo quindi questi eventi più probabilmente esterni ai domini, solo una dozzina di eventi (Tabella 3.1 e Figura 3.1) risulta localizzata nell'area di studio.

In tabella, oltre alla data e all'orario, sono riportati per ogni evento il catalogo di riferimento (colonna "Cat.") e i relativi parametri epicentrali (colonne data, zona, intensità "I_0", latitudine e longitudine). L'ultima colonna ("M") riporta i valori in magnitudo momento (M_W) per i dati provenienti dal CPTI (4 casi, indicati con un asterisco), mentre per quelli da catalogo PFG presenta i valori di magnitudo macrosismica (M_m), una misura generica senza tipologia specifica (per maggiori dettagli si veda la definizione nel PFG stesso).

Tabella 3.1. Elenco dei 13 terremoti storici localizzati entro l'area di interesse secondo i cataloghi PFG o CPTI (la fonte è indicata nella prima colonna di sinistra). La magnitudo è espressa come magnitudo macrosismica (M_m), ad eccezione dei quattro eventi inclusi nel CPTI per i quali viene riportata la magnitudo momento (M_W, valori contrassegnati da un asterisco).

Cat.	Data	Zona	I_o	Lat.	Lon.	M
CPTI	1561-11-24	Ferrarese	5-6	44.781	11.454	4.4*
CPTI	1796-10-22	Emilia orientale	7	44.614	11.67	5.5*
PFG	1796-10-24	Medicina	4	44.5	11.583	3.1
PFG	1801-10-08	Bologna	7	44.5	11.417	4.7
PFG	1834-10-04	Bologna	7	44.5	11.417	4.7
PFG	1896-03-09	Malalbergo	3	44.667	11.533	2.5
PFG	1898-03-11	Portomaggiore	3	44.717	11.783	2.5
PFG	1905-08-12	Selva Malvezzi	3	44.583	11.667	2.5
CPTI	1909-01-13	Emilia orientale	6-7	44.579	11.688	5.4*
PFG	1916-10-06	Portonovo	3-4	44.583	11.8	2.8
PFG	1916-10-07	Portonovo	3-4	44.583	11.8	2.8
CPTI	1929-04-12	Bolognese	4	44.539	11.478	4.8*

Per la sismicità strumentale recente, ovvero dal 1985 ad oggi, è invece possibile consultare il bollettino dei terremoti strumentali registrati e localizzati dall'INGV (https://www.ingv.it). In questo caso abbiamo effettuato una ricerca sull'area di interesse per tutti gli eventi di magnitudo $-1 < M < 10$ e profondità comprese tra -10 e 1000 Km. Sono stati individuati nove terremoti (Tabella 3.2 e Figura 3.1), tutti con magnitudo (M_d o M_L) ≤ 3.1.

Data e Ora (Italia)	M	Zona	Z (km)	Lat.	Lon.
1987-04-24 22:56	Md 2.5	6 km NW Molinella (BO)	13	44.67	11.63
1991-02-21 22:48	Md 2.4	8 km S Molinella (BO)	5	44.55	11.67
1991-02-21 22:48	Md 3.1	4 km E Budrio (BO)	4	44.52	11.59
1992-06-27 07:15	Md 2.7	5 km W Portomaggiore (FE)	5	44.70	11.74
2003-08-15 15:05	Md 2.7	3 km N Molinella (BO)	5	44.65	11.68
2012-05-20 05:22	ML 2.4	3 km S Bentivoglio (BO)	9	44.61	11.42
2014-03-09 05:16	ML 2.0	5 km NW Medicina (BO)	47	44.51	11.59
2018-02-01 02:02	ML 2.8	5 km NE Molinella (BO)	36	44.65	11.72
2020-10-17 04:35	ML 2.2	5 km NW Medicina (BO)	38	44.51	11.59

Tabella 3.2. Elenco dei terremoti strumentali presenti nel bollettino INGV che ricadono nell'area di studio.

Dall'analisi preliminare condotta integrando le informazioni presenti nei cataloghi PFG e CPTI per la sismicità storica (1000), e completando con i dati del bollettino INGV per quella recente (dal 1985 al 16 dicembre 2024), emerge che l'area è caratterizzata prevalentemente da una sismicità di bassa o moderata energia (M < 5.5). La mappa in Figura 3.1 rappresenta la distribuzione geografica dei 13 terremoti storici (cerchi rossi) e dei 9 strumentali (cerchi blu) identificati. Nella mappa sono rappresentati anche i contorni dei domini di monitoraggio (DI in rosa e DE in arancione): nel volume del DI non si osservano eventi sismici, né di natura storica né strumentale, mentre nel DE sono stati identificati tre terremoti avvenuti in età storica e due più recenti, rilevati strumentalmente. Si sottolinea comunque come altri sei eventi ricadano appena fuori del contorno del DE e data l'incertezza di localizzazione (difficile da stimare per eventi storici), potrebbero facilmente essere in realtà di interesse per creare un quadro completo.

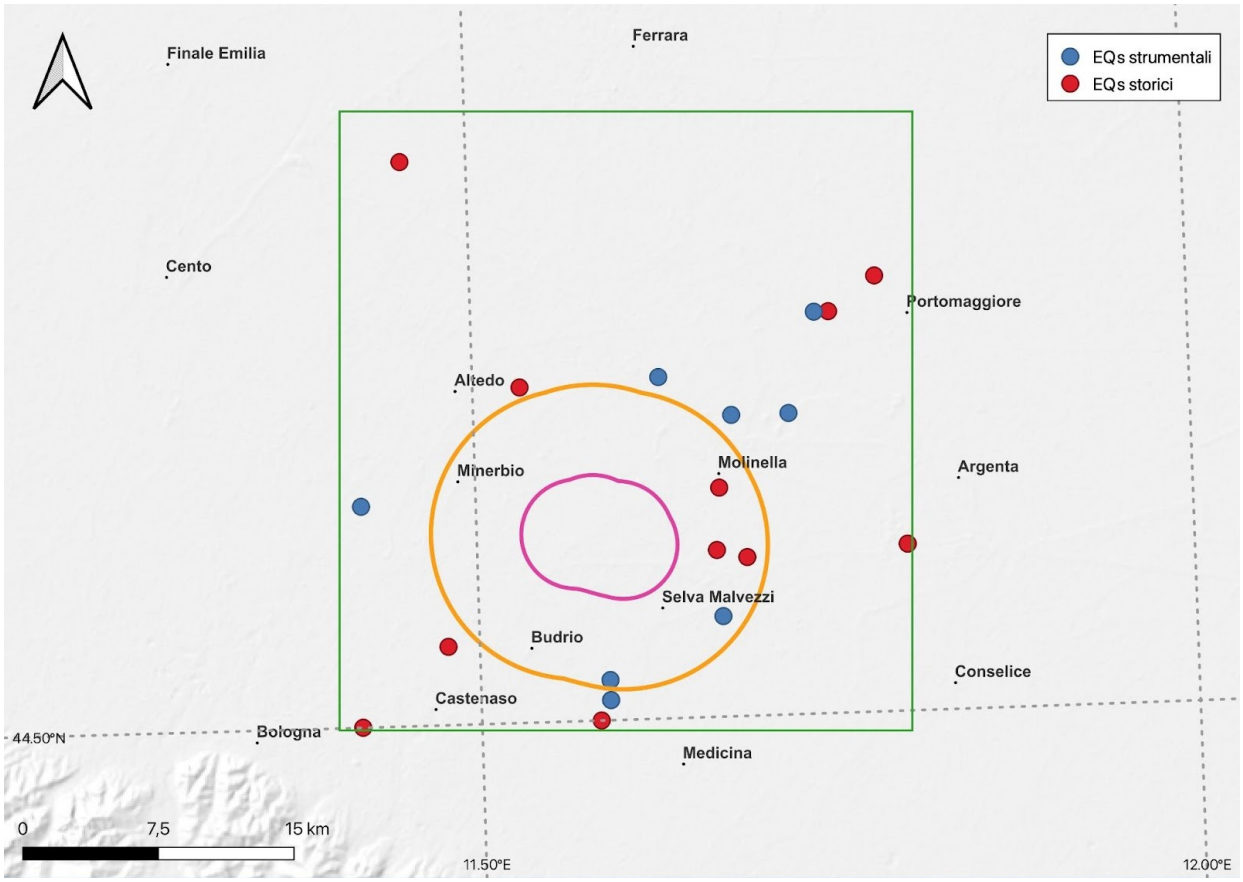


Figura 3.1. Mappa della distribuzione dei terremoti che ricadono nell'area di interesse (rettangolo in verde), sia storici (relativi al periodo 1000-1985, cerchi rossi) che strumentali (relativi al periodo 1985-2024, cerchi blu). Il cerchio rosa identifica il dominio di monitoraggio interno mentre quello arancione identifica il dominio esteso.

4 Monitoraggio sismico

Gli ILG prevedono che "*Dopo due anni consecutivi di attività, la SPM valuterà le prestazioni della rete di monitoraggio ed eventuali criticità del sistema di analisi ed elaborazione dei dati adottato*" (§ 5.3, ILG).

In particolare la rete di monitoraggio sismico deve essere in grado di:

"*1. nel dominio interno di rilevazione (DI), rilevare e localizzare i terremoti a partire da magnitudo locale ML compresa tra 0 e 1 (0 ≤ ML ≤ 1) e con incertezza nella localizzazione dell'ipocentro di alcune centinaia di metri;*

2. nel dominio esteso di rilevazione (DE), 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 a livello nazionale o regionale, con incertezza nella localizzazione dell'ipocentro contenuta entro circa 1 km;

3. determinare l'accelerazione e la velocità del moto del suolo provocata da eventuali terremoti (deboli e forti) presso i punti di misurazione;

4. integrarsi opportunamente con le reti di monitoraggio esistenti (ovvero: rete nazionale, reti regionali e ulteriori eventuali reti locali) al fine di migliorare l'accuratezza e la completezza della rilevazione della sismicità."

Anche se l'idoneità della rete di monitoraggio sarà valutata su base prestazionale, gli ILG forniscono delle raccomandazioni, ovvero dei riferimenti tecnico-pratici su come progettare la rete di monitoraggio sismico che riassumiamo nei seguenti punti (§ 5.3, ILG):

a) Interdistanza tra stazioni di 3-5 km nel DI che aumenti progressivamente nel DE
b) Stazioni composte da velocimetro e accelerometro, i primi anche a corto periodo (T<1s) ma almeno uno a larga banda (T > 20-40s)
c) Acquisizione in continuo con frequenza di campionamento di almeno 200 e 100 campioni al secondo rispettivamente per i sismometri e gli accelerometri (250 Hz per sensori in pozzo), trasmissione in tempo reale e temporizzazione tramite GPS
d) Si raccomanda che la stazione a banda larga sia co-locata con una stazione GPS permanente
e) In caso di elevato rumore sismico di fondo si consiglia un'installazione dei sensori in pozzi di almeno 100/200 m di profondità
f) Adottare strategie per una copertura del dato sismico di almeno il 95% del tempo di registrazione
g) Adeguate curve di risposta per strumenti e acquisitori che siano aggiornate nel tempo

N.B. Al punto c) gli ILG riportano passi di campionamento che sono molto probabilmente invertiti per velocimetro e accelerometro e sarebbero quindi da intendersi pari a 100 e 200 Hz rispettivamente.

4.1 Descrizione della rete sismica

In accordo con quanto disposto al § 5.3, punto 4 degli ILG, la SPM acquisisce in tempo reale presso la Sala di Monitoraggio del CMS i dati in continuo della rete sismica installata dal concessionario e di tutte le reti pubbliche presenti nell'area, a partire dal 24 maggio 2024 (2 giorni dopo la firma dei protocolli, data di avvio ufficiale del monitoraggio, Tabella P.1).

Allo stato attuale il monitoraggio sismico nei domini della concessione di "Selva Malvezzi" si basa su una rete costituita da 11 stazioni sismiche: 5 che appartengono alla rete sismica del concessionario (M2) e 6 appartenenti alla rete sismica nazionale IV gestita dall'INGV. L'elenco completo è riportato in Tabella 4.1, insieme al tipo di sensore e acquisitore corrispondenti, e la loro posizione è visibile nella mappa di Figura 4.1. Le stazioni della rete M2 sono tutte equipaggiate con velocimetri di periodo 5 s prodotti dalla Lunitek srl (https://lunitek.it/,specifiche tecniche dello strumento alla

Rete	Stazione	Latitudine [°N]	Longitudine[°E]	Quota (m)	Sensore	Acquisitore
M2	SMV01	44.5523	11.6374	8	Lunitek Tellus-5s	Lunitek Atlas-F-6T
M2	SMV02	44.5567	11.5013	20	Lunitek Tellus-5s	Lunitek Atlas-F-6T
M2	SMV03	44.6114	11.5794	9	Lunitek Tellus-5s Lunitek LTFB-160HHV	Lunitek Atlas-F-6T
M2	SMV04	44.5942	11.6114	10	Lunitek Tellus-5s	Lunitek Atlas-F-6T
M2	SMV05	44.6491	11.6405	7	Lunitek Tellus-5s	Lunitek Atlas-F-6T
IV	FERS	44.9035	11.5406	3	Lunitek Tellus-5s	GAIA2-FS-16-VPP
IV	FIU	44.64031	11.49165	12	Lennartz LE3D-5S	GAIA1-FS-9-VPP
IV	MODE	44.629722	10.949167	41	Kinemetrics Episensor	GAIA2-FS-40-VPP
IV	MTRZ	44.3128	11.4248	570	Nanometrics Trillium 40s	GAIA2-FS-40-VPP
IV	RAVA	44.75587	11.1188	15	Lennartz LE3D-5s	GAIA2-FS-10-VPP
IV	ZCCA	44.35085	10.9765	700	Nanometrics Trillium 40s	GAIA2-FS-16-VPP

Tabella 4.1. Stazioni sismiche utilizzate nel monitoraggio della concessione Selva Malvezzi, la rete M2 è la rete locale gestita dal concessionario e si compone di 5 stazioni, la IV invece è la rete sismica nazionale gestita dall'INGV, dalla quale abbiamo selezionato le stazioni più prossime ai domini di monitoraggio.

pagina: https://lunitek.it/seismic/seismic-sensors/seismometers/tellus-5s/), mentre co- locato con il velocimetro SMV03 (in posizione centrale poco distante dal pozzo PM1) si trova anche un accelerometro Lunitek LTFB-160-BH (https://lunitek.it/seismic/seismic-sensors/accelerometers/ltfb-160-bh/). Tutte le stazioni funzionano in continuo, sono temporizzate con GPS e acquisiscono 100 campioni al secondo (passo di 0.01s), a parte l'accelerometro che ha un campionamento doppio (200 Hz, passo di 0.005s), quindi le richieste di cui al punto c) delle raccomandazioni sono tutte soddisfatte.

La stazione FIU è l'unica della rete IV che ricade internamente ai domini di monitoraggio, tutte le altre distano qualche decina di km dal pozzo PM1, e anzi, alcune si trovano a distanze ben maggiori della massima estensione del DE. Rimane scoperto il quadrante Est dell'area monitorata, dove non risultano presenti stazioni sismiche con accesso aperto ai dati (https://eida.ingv.it/). Le due stazioni interne al DI, SMV03 e SMV04, distano 3.2 km, mentre le interdistanze tra stazioni vicine nel DE complessivamente variano tra i 5.1 e gli 11.9 km con una media di 8.8 km, in accordo con quanto suggerito dagli ILG al punto a) delle raccomandazioni. Le richieste riportate nei punti b) e d) invece non sono verificate per la rete di monitoraggio M2, data la

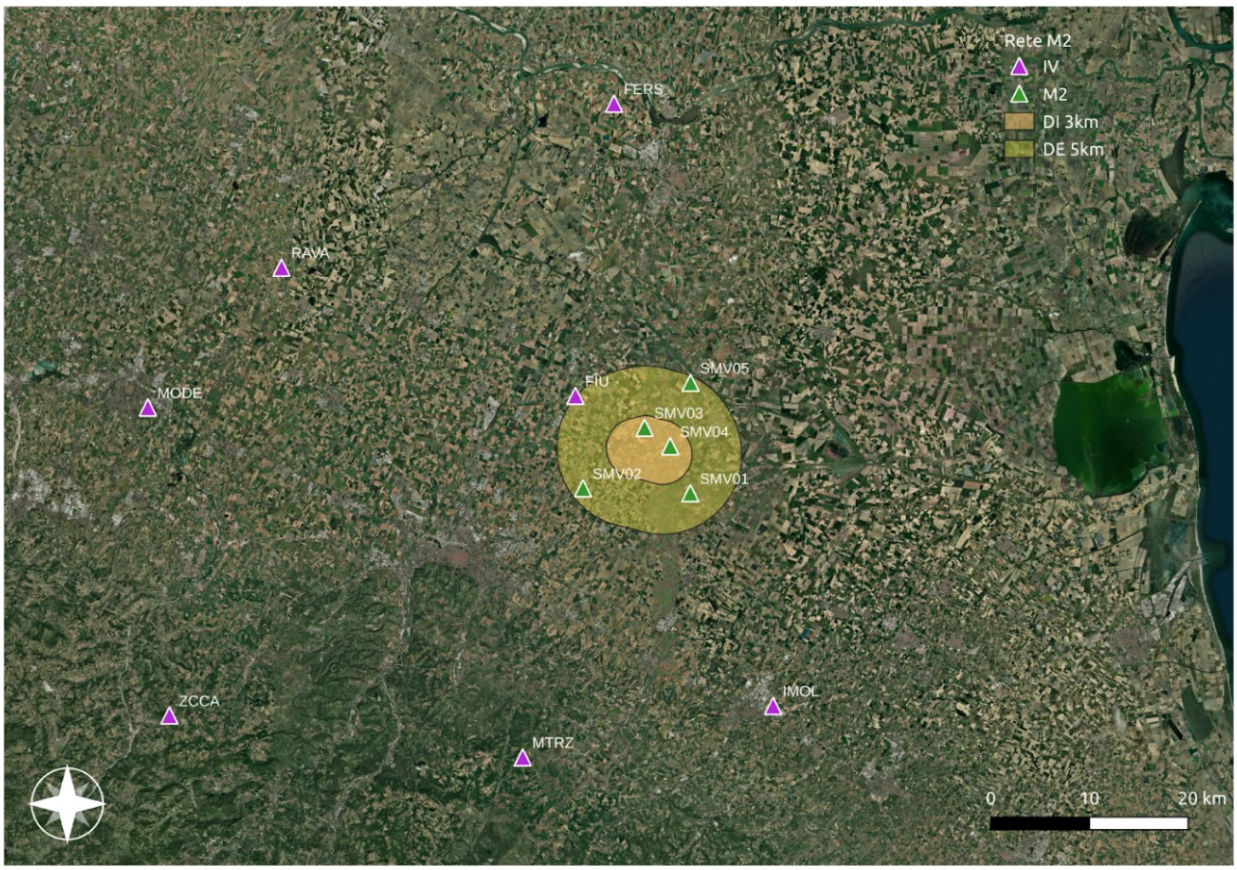


Figura 4.1. Mappa dell'area monitorata per la concessione Selva Malvezzi. DI e DE sono indicati con le aree ombreggiate. La posizione delle stazioni della rete sismica del concessionario M2 è segnata con i triangoli verdi, mentre le stazioni della rete IV sono segnalate con i triangoli porpora.

mancanza di stazione a banda larga e la presenza di un solo accelerometro. Questo di per sé non comporta una lacuna nella detezione di eventi sismici e ci riserviamo di valutare la prestazione della rete sulla base delle future analisi della capacità di detezione teorica e dell'effettivo rilevamento di eventi che si potrà constatare con il monitoraggio.

4.2 Funzionamento della rete sismica 2022-2024

Le 5 stazioni della rete M2 hanno funzionato in modo abbastanza continuo per il periodo 2022-2024, come visibile in Figura 4.2 dove viene mostrata la disponibilità dei dati per ogni stazione per tutto il periodo 2022-2024.

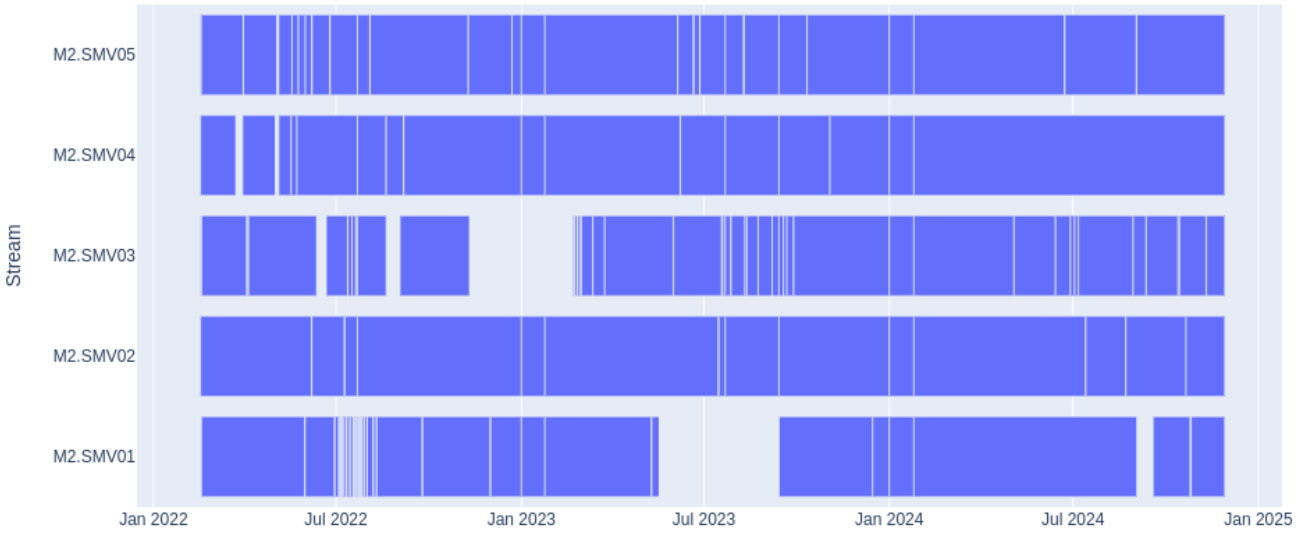


Figura 4.2. Rappresentazione grafica del funzionamento delle cinque stazioni della rete M2. Ad ogni giorno di effettiva registrazione del dato sismico corrisponde una barra verticale blu, quindi la mancata colorazione indica i periodi di interruzione del flusso di dati per malfunzionamento.

La Tabella 4.2 riporta la percentuale di dato acquisito per ogni stazione, sia per tutto il periodo di funzionamento 2022-2024, che per ogni singolo anno. Nel complesso si osserva un miglioramento del corretto funzionamento delle stazioni con il tempo, con percentuali di dato nel 2024 ben superiori alla soglia del 95% riportata dalla raccomandazione f) degli ILG (§ 5.3 e riportate all'inizio di questa sezione). Solo due stazioni mostrano lunghi periodi di interruzione: la stazione SMV01 è probabilmente rimasta danneggiata dall'alluvione che ha colpito la regione Emilia Romagna nel maggio 2023. Per la stazione SMV03, che ha mostrato un lungo periodo di interruzione a cavallo tra il 2022 ed il 2023, possiamo ipotizzare un analogo allagamento data la quota molto bassa, o un problema tecnico che abbia richiesto la sostituzione di qualche componente visto che nel seguito la stazione ha poi funzionato correttamente. Ci riserviamo di concordare una visita ai siti che ospitano le stazioni per avere un quadro completo.

	SMV01	SMV02	SMV03	SMV04	SMV05
2022-2024	87.1%	99.3%	92.4%	98.4%	98.8%
2022	94.8%	97.9%	88.7%	94.9%	96.8%
2023	67.5%	99.9%	88.2%	99.8%	99.4%
2024	100%	99.8%	99.7%	100%	99.8%

Tabella 4.2. Percentuali di corretto funzionamento di ogni stazione calcolate per tutto il periodo 2022-2024 e per ognuno dei tre anni. In giallo sono evidenziati i periodi con meno dati rispetto al 95% consigliato dagli ILG.

Il segnale sismico registrato in continuo dalle stazioni operanti nell'area di interesse per l'AQ, fornisce uno strumento utile per ricavare informazioni sullo stato di salute delle stazioni stesse e sulle loro prestazioni in termini di capacità di rilevazione di eventi sismici di bassa magnitudo. Il livello di rumore registrato ad una stazione viene quantificato dalla densità spettrale di potenza sismica *Power Spectral Density (*PSD*)*. A partire dalle stime di PSD calcolate su diverse finestre temporali, vengono effettuate analisi di frequenza volte alla definizione della funzione densità di probabilità della PSD (*Probability Power Spectral Density,* PPSD), dalla quale è possibile ricavare indicatori statistici circa i livelli spettrali del rumore caratteristici per la stazione. Abbiamo utilizzato le funzioni di Obspy (Krischer et al., 2015) basate sul metodo di Cooley e Tukey (1965) per la stima delle PSD e sul metodo proposto da McNamara e Buland (2004) per la stima delle PPSD. Le curve delle PPSD per le registrazioni del 2022 alle componenti verticali delle 6 stazioni incluse nel DE sono mostrate in Figura 4.2 (analoghe figure per le componenti orizzontali sono riportate in Appendice A), ogni grafico mostra l'andamento dei valori del 5°, 50° e 95° percentile, ottenuti considerando i dati registrati nel periodo febbraio - dicembre 2022. Per tutte le stazioni si osservano valori molto rumorosi (più elevati del massimo livello di rumore NHNM calcolato da Petersen, 1993; come riferimento, indicato con la curva nera) nell'intervallo compreso tra 0.2 e 0.9 s ovvero corrispondente alle frequenze ~1-5 Hz. Queste amplificazioni delle registrazioni sismiche per determinate frequenze sono caratteristiche dei bacini sedimentari o alluvionali come la Pianura Padana, ed associate a fenomeni di risonanza nella coltre sedimentaria su cui poggiano le stazioni (Luzi et al., 2013; Tarabusi et al., 2024). Tale banda di frequenza è comune agli eventi sismici che, se poco energetici, possono quindi essere nascosti dai livelli di rumore elevati, con conseguente necessità di adottare strategie come l'installazione in pozzi profondi dei sensori (raccomandazione e) degli ILG; si veda anche Zaccarelli et al., 2021).

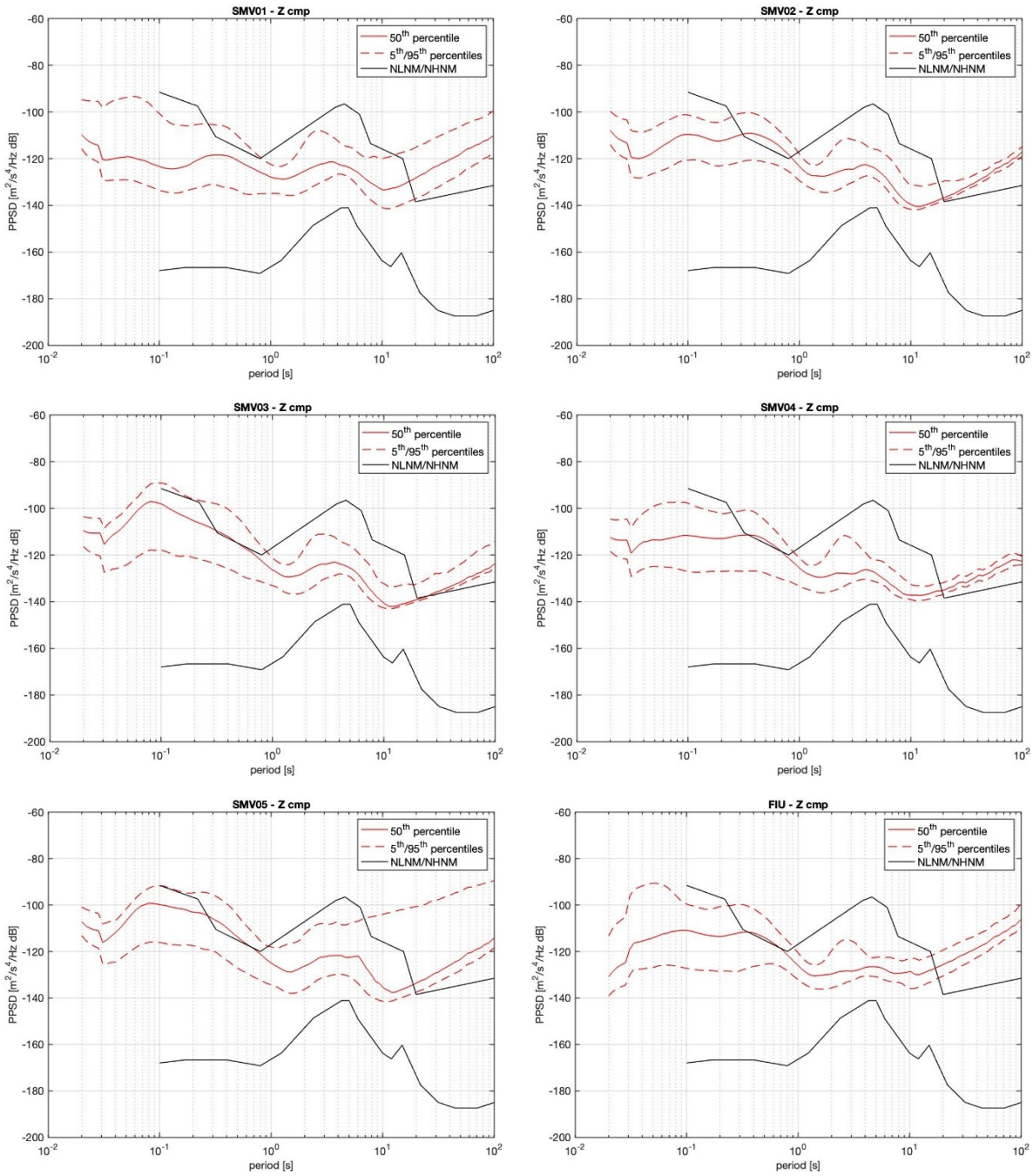


Figura 4.3. PPSD calcolate sui dati registrati alle componenti Z delle 6 stazioni interne al DI dal 17 febbraio 2022 al 31 dicembre 2022. Le linee rosse continue indicano il valore mediano della distribuzione di probabilità per le PSD, le curve tratteggiate invece indicano i valori del 5° (curva sottostante) e 95° (curva superiore) percentile. Le linee nere indicano l'andamento dei valori minimo NLNM e massimo NHNM definiti da Petersen (1993) come riferimento.

4.3 Monitoraggio della sismicità dal 2022-2024

Per le procedure di analisi il CMS utilizza il software SeisComP (https://www.seiscomp.de/), fornito tramite licenza dalla ditta GEMPA© GmbH, che permette un'analisi automatica del segnale sismico sia in tempo reale che differito. SeisComP è stato sviluppato appositamente per un uso in sala di monitoraggio. I

segnali continui sono soggetti ad una prima procedura di discriminazione di eventi sismici, che sono successivamente localizzati automaticamente. Questo insieme di localizzazioni automatiche è poi revisionato manualmente su base giornaliera da un analista sismologo, per la creazione del catalogo definitivo. Per la localizzazione dei terremoti in questa zona abbiamo scelto il codice Hypo71 (Lee e Lahr, 1975), associato ad un modello di velocità sismica per quest'area estrapolato dal modello MAMBo (Molinari et al., 2015). Per il calcolo della magnitudo locale consideriamo la relazione di Bakun e Joyner (1984), in questo Report contrassegnata con la notazione ML_{bj}:

$$ML_{bj} = LogA + Log\left(\frac{R}{100}\right) + 0.00301 \times (R - 100) + 3.0.$$

Dove: A = massima semi-ampiezza della traccia in mm, misurata sulle componenti orizzontali, dopo simulazione di un sismografo Wood-Anderson sintetico; R = distanza ipocentrale in km.

I segnali registrati alle stazioni della rete M2 sono poi stati integrati con alcune stazioni selezionate dalla rete IV elencate in Tabella 4.1 e mostrate in Figura 4.1, a partire dal 17 febbraio 2022 e fino al 22 novembre 2024.

Gli eventi rilevati nel periodo 2022-2024 sono 21, vengono elencati in Tabella 4.3 e mostrati nella mappa di Figura 4.3. Solo due di questi sono stati localizzati nel DE, con ML 0.4 e 0; i restanti 19 cadono fuori dai domini, ma vengono ugualmente riportati per un generale confronto con la sismicità dell'area mostrata al Capitolo 3. Tutti questi terremoti sono di bassa energia, con ML che non superano 1.9 e profondità principalmente tra 6 e 9 km e comunque non oltre i 20 km. Oltre a questi segnaliamo 2 eventi molto piccoli rilevati in solo 2 stazioni della rete (quelle più interne SMV03 e SMV04), che non sono quindi localizzabili ma molto probabilmente sono stati originati nelle immediate vicinanze delle due stazioni, quindi internamente al DI.

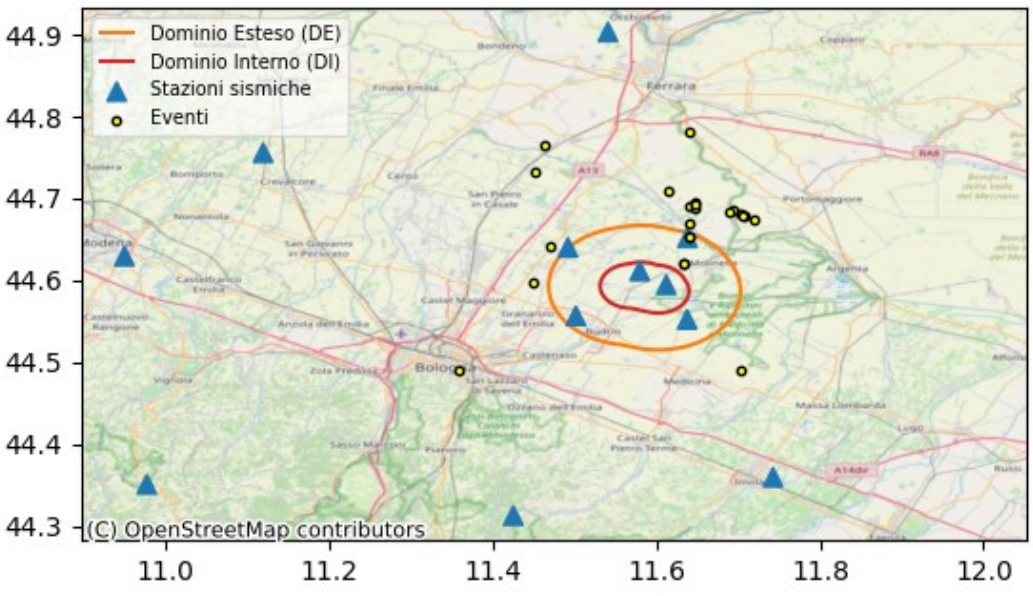


Figura 4.4. Mappa degli epicentri calcolati per gli eventi riportati in Tabella 4.3 (cerchi gialli) In arancione (DE) e rosso (DI) sono delineati i contorni dei domini. Le stazioni sismiche prese in considerazione per il monitoraggio dell'area sono indicate con i triangoli blu.

Data	Ora (UTC)	Lat. [°N]	Lon. [°E]	E. O. (km)	Prof. (km)	Mag. (ML_{bj})	PGV (m/s)	PGA (m/s^2)	Comune
2022-04-02	12:00:48	44.7333	11.4508	1.2	8.0 +/-2.5	1.9 +/- 0.4	1.58E-04	7.17E-03	San Vincenzo (BO)
2022-04-27	19:45:45	44.7658	11.4625	1	8.27 +/-0.9	1.4 +/- 0.2	2.08E-05	1.29E-03	Poggio Renatico (FE)
2022-07-02	18:23:43	44.7088	11.614	0.3	7.17 +/-0.4	1.5 +/- 0.3	3.04E-05	1.35E-03	Spinazzino (FE)
2022-07-15	23:15:52	44.6212	11.6338	0.8	0.0 +/-0.9	0.4 +/- 0.1	2.09E-05	3.06E-03	Guarda (BO)
2023-01-02	17:12:35	44.6908	11.6393	0.5	10.24 +/-0.3	1.2 +/- 0.2	1.24E-05	2.02E-03	(FE)
2023-02-17	00:01:54	44.687	11.6947	0.4	7.96 +/-0.2	1.6 +/- 0.4	1.01E-04	1.05E-02	(FE)
2023-02-17	01:13:01	44.6535	11.6393	0.1	4.0 +/-0.0	0.0 +/- 0.3	2.92E-06	1.36E-04	S. Pietro Capofiume (BO)
2023-02-18	00:17:02	44.678	11.707	0.3	7.52 +/-0.3	0.6 +/- 0.2	4.09E-06	2.63E-04	Ospital Monacale (FE)
2023-02-21	22:02:56	44.6818	11.7038	0.2	7.78 +/-0.2	0.8 +/- 0.3	9.97E-06	1.66E-03	Ospital Monacale (FE)
2023-03-25	21:47:20	44.6953	11.6477	0.2	8.6 +/-0.1	1.7 +/- 0.3	2.20E-05	1.19E-03	(FE)
2023-04-23	23:58:25	44.4908	11.3587	2.1	20.0 +/-3.1	1.1 +/- 0.3	2.70E-05	2.91E-03	(BO)
2023-08-29	02:24:39	44.6893	11.6465	0.6	8.58 +/-0.2	0.3 +/- 0.5	1.34E-06	1.17E-04	(FE)
2023-10-12	21:26:44	44.6933	11.6473	0.3	8.0 +/-0.1	1.0 +/- 0.3	9.46E-06	5.70E-04	(FE)
2023-10-14	21:28:50	44.5972	11.4487	1.1	16.0 +/-0.8	1.3 +/- 0.3	9.06E-06	2.73E-04	Capo d'Argine (BO)
2024-01-19	03:11:35	44.6848	11.69	0.3	8.23 +/-0.2	1.2 +/- 0.4	1.20E-05	8.66E-04	Bova di Marrara (FE)
2024-04-30	23:12:04	44.6793	11.7062	0.1	7.58 +/-0.1	0.7 +/- 0.6	1.08E-05	6.18E-04	Ospital Monacale (FE)
2024-05-16	02:30:11	44.6687	11.6393	0.7	9.0 +/-0.5	0.9 +/- 0.0	1.15E-06	3.40E-04	S. Maria Codifiume (FE)
2024-06-02	23:54:35	44.6418	11.4688	2.1	8.0 +/-1.1	0.6 +/- 0.2	3.67E-06	2.37E-04	Saletto (BO)
2024-07-02	22:26:37	44.6735	11.7202	0.1	6.72 +/-0.2	0.4 +/- 0.1	1.95E-06	1.99E-04	(FE)
2024-07-29	23:56:30	44.7825	11.6393	1.4	8.0 +/-1.5	1.1 +/- 0.3	4.17E-06	7.18E-04	Gaibanella (FE)
2024-10-02	01:17:23	44.9505	11.7032	0.8	18.0 +/-0.7	1.8 +/- 0.7	1.49E-04	1.71E-03	Via Nuova (BO)

Tabella 4.3. Elenco dei terremoti rilevati e localizzati grazie alla rete sismica locale M2 integrata dalle stazioni IV nel periodo 17 febbraio 2022 – 22 novembre 2024. Solo due eventi cadono all'interno dei domini di Selva Malvezzi e vengono evidenziati in verde.

5 Monitoraggio delle deformazioni del suolo

5.1 Descrizione rete GNSS

Al §6.2, gli ILG indicano le caratteristiche tecniche del monitoraggio delle deformazioni del suolo, raccomandando che questo riguardi "la porzione superficiale dei domini di rilevazione (interno ed esteso)" e che rispetti certe caratteristiche sia per le misure GNSS che InSAR. Se da un lato per il secondo tipo di misure non è necessaria un'infrastruttura fissa per ottenere le osservazioni necessarie a eseguire il monitoraggio richiesto, per quanto attiene invece le misure GNSS è raccomandata la presenza di "una rete GPS [più in generale GNSS, ndr.] in continuo, preesistente o di nuova realizzazione", composta "di stazioni permanenti di precisione (di tipo geodetico), distribuite opportunamente in funzione dell'estensione e delle caratteristiche dell'area da monitorare ed installate con una adeguata monumentazione adatta a scopi geofisici (ad esempio UNAVCO). In particolare, si richiede che le stazioni abbiano interdistanze inferiori a 10-15 km e che una di esse sia co-locata con la stazione a banda larga della rete di monitoraggio sismico".

Per la concessione di Selva Malvezzi la rete di monitoraggio geodetico consta solo di una stazione permanente, le cui caratteristiche tecniche sono riportate in Tabella 5.1.

Nome sito	Lon. (°E)	Lat (°N)	Quota (m)	Data installazione	Antenna	Ricevitore
GRLP	11.5854	44.5934	15	04/06/2020	TPS PG-S1	TOPCON MR-2

Tabella 5.1. Caratteristiche della stazione GNSS installata per la concessione Selva Malvezzi in termini di coordinate, data di installazione e strumentazione in uso.

Si fa presente che la stazione GNSS non risulta co-locata in corrispondenza di una stazione sismica a banda larga della rete di monitoraggio, come richiesto negli ILG. Inoltre con una stazione sola non si può parlare di rete di monitoraggio, che, per poter misurare nello spazio le deformazioni nelle 3 componenti, dovrebbe essere composta da almeno 5 stazioni.

In questo report la validazione della rete GNSS sarà eseguita valutando nello specifico i seguenti aspetti:

- qualità della strumentazione utilizzata, che risulta conforme secondo le caratteristiche tecniche riportate in Tabella 5.1, in quanto la stazione è equipaggiata di antenna *choke ring* di tipo geodetico e di ricevitore a doppia frequenza;

- copertura areale della rete di monitoraggio, che essendo composta da una sola stazione, risulta necessario integrarla con la "*strumentazione già esistente*", come indicato negli ILG, e conseguente valutazione dell'adeguata distribuzione nello spazio tramite le analisi;
- interdistanze tra stazioni riportate nella sezione 5.2;
- corretta monumentazione/installazione delle stazioni che sia "*adatta a scopi geofisici*", ossia solidale con il substrato roccioso affiorante in modo da poter registrare segnali dovuti a sorgenti profonde (deformazioni tettoniche, idrologiche, di giacimento, etc.), come trattato nella sezione. 5.3;
- adeguata qualità di registrazione del segnale da parte della stazione GNSS (si considerano solo i segnali GPS) attraverso le analisi mostrate nella sezione 5.4.

5.2 Analisi delle interdistanze

Considerata la necessità di integrare le reti di monitoraggio e tenendo conto del "*principio di valorizzazione dell'esistente*" (come più volte indicato negli ILG), la SPM ha verificato la condizione posta dagli ILG per la distribuzione dei siti, ossia che siano distanti tra di loro entro i 10-15 km. A questo proposito sono state considerate tutte le stazioni disponibili, non solo quelle appartenenti a reti pubbliche (come la RING), ma anche a reti geodetiche o topografiche private (come Italpos e Netgeo), integrate con la stazione GRLP del Concessionario, come mostrato in Figura 5.1.

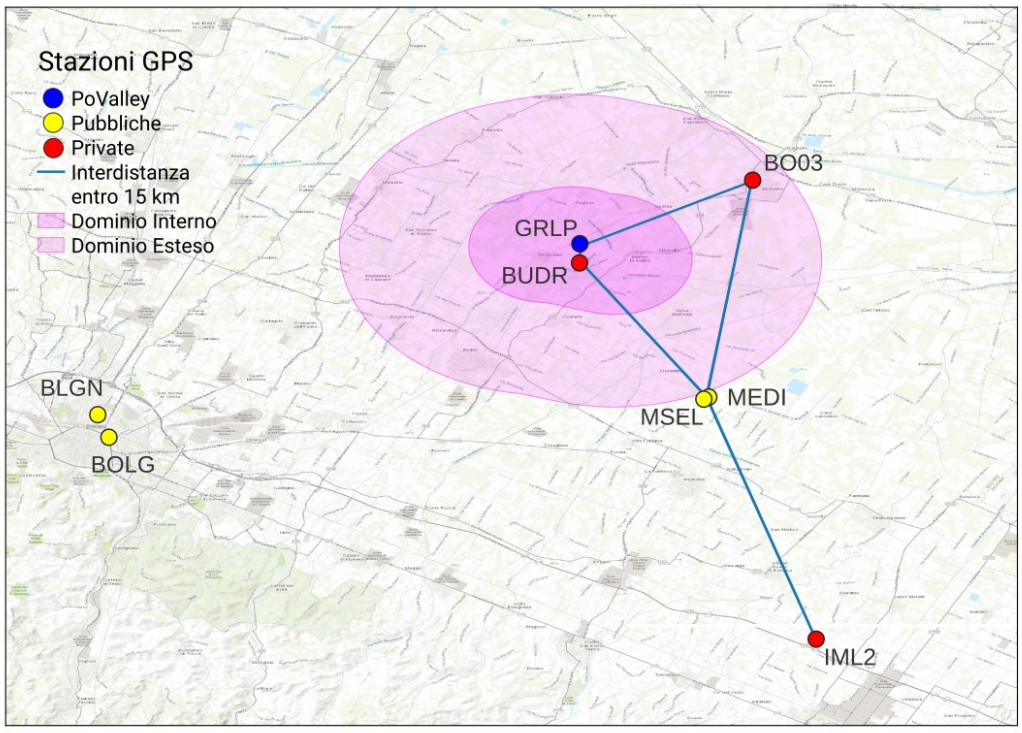


Figura 5.1. Interdistanze entro i 15 km tra tutte le stazioni GNSS attive appartenenti sia a reti pubbliche (gialle) sia a reti private (rosse) disponibili nell'area di monitoraggio della concessione Selva Malvezzi.

Si fa presente che in questa analisi è stata considerata anche la stazione BO03 che non è più attualmente in funzione (è stata dismessa il 12 Marzo 2011) e può essere solo considerata per la valutazione del campo di deformazione di *background* nei dintorni dell'area di monitoraggio. La distribuzione delle interdistanze in Figura 5.1 mostra una parziale copertura nella porzione orientale dei domini di monitoraggio, secondo i criteri minimi forniti dagli ILG, e una totale assenza di stazioni per la porzione a Ovest. Inoltre, è bene fare presente che una parte delle stazioni considerate appartiene a reti private i cui dati sono al momento disponibili per l'INGV, ma sulle quali non si può fare affidamento a lungo termine ai fini del monitoraggio. Tenendo conto inoltre delle dimensioni del DI, ci si aspetta che le deformazioni attese per effetto dell'attività di estrazione dal giacimento siano confinate entro il DI che ha dimensioni minori di 15 km sia longitudinalmente che, a maggior ragione, trasversalmente. E' bene far presente che negli ILG stessi "*si raccomanda che la rete locale GPS preveda la presenza di stazioni permanenti opportunamente distribuite in funzione dell'estensione e delle caratteristiche dell'area da monitorare*" e che pertanto il requisito richiesto dagli ILG di interdistanza minima di 15 km si rivela in questo caso un limite troppo ampio ai fini del monitoraggio delle deformazioni del suolo per effetto delle attività industriali. Infatti solitamente questo tipo di deformazioni interessa lunghezze caratteristiche simili alle dimensioni del giacimento, che va da pochi km a massimo una decina di km.

Per valutare se la rete allo stato attuale possa fornire una copertura adeguata o meno al monitoraggio dell'area e per fornire una caratterizzazione spaziale delle lunghezze d'onda caratteristiche identificabili dalla rete, è stata applicata un'analisi (senza la stazione BO03) con *wavelet* sferiche (Tape et al., 2009) che fornisce una stima della capacità di identificazione spaziale dei segnali da parte della distribuzione delle stazioni, come mostrato in Figura 5.2, in termini di grado q. Il valore della scala q indica l'ordine di *wavelet* sferica riproducibile da parte della rete di stazioni, e maggiore è l'ordine, minore sarà la scala spaziale del segnale che può essere identificato in termini di semi-lunghezza d'onda del segnale, secondo Tabella 5.2 che segue (da Tape et al., 2009):

Tabella 5.2. Scala spaziale delle wavelet sferiche che indicano la semi-lunghezza d'onda del segnale riprodotto.

Semi-lunghezza (km)	87.2	43.6	21.8	11.4	5.8	2.9
q	7	8	9	10	11	12

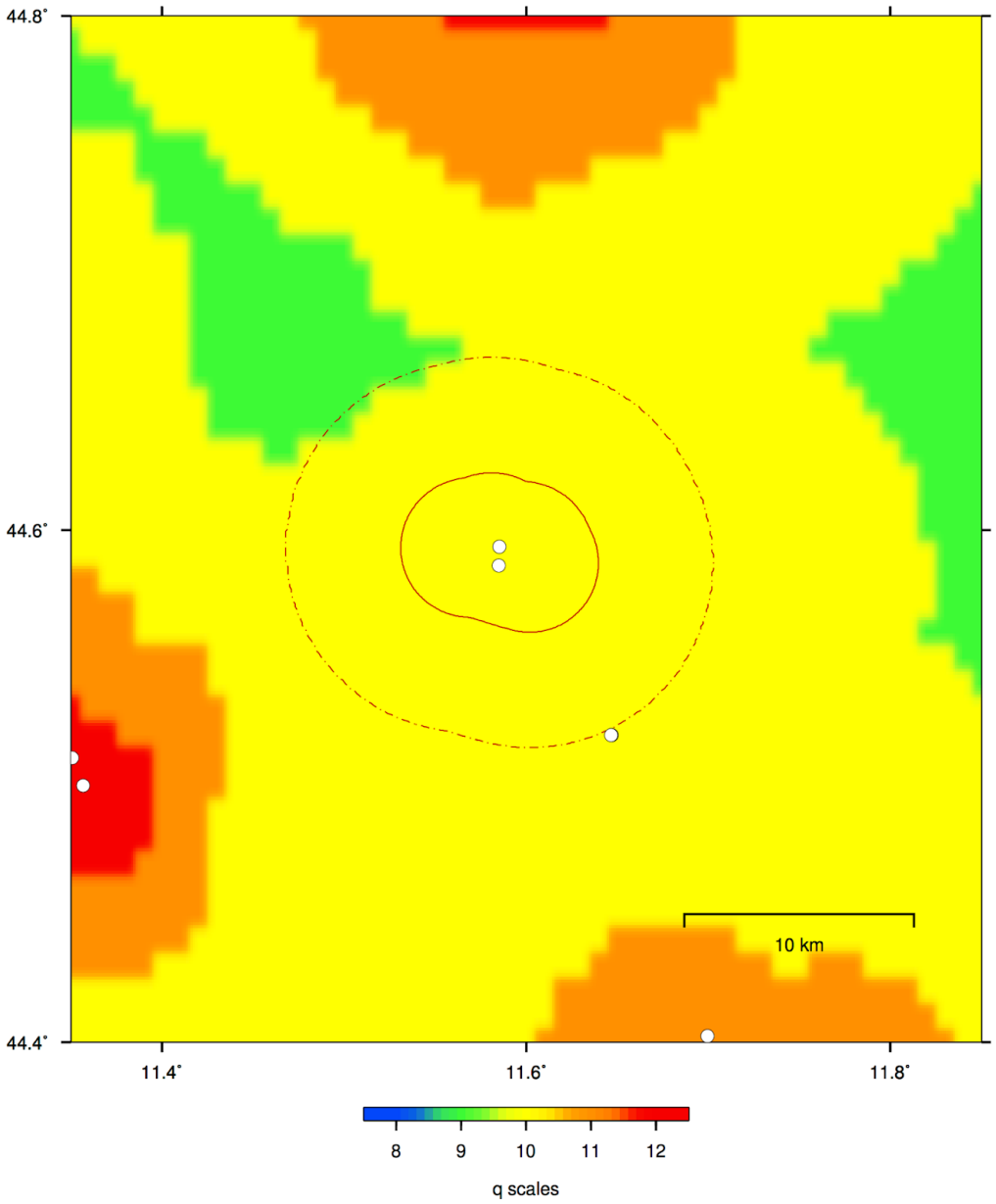


Figura 5.2. risoluzione spaziale in termini di valore massimo della scala q di wavelet sferiche riproducibile con la distribuzione spaziale di tutte le stazioni GNSS, corrispondente alla scala spaziale riportata in Tabella 5.2.

Dalla Figura 5.2 si può osservare che la rete GNSS sarebbe potenzialmente in grado di identificare segnali di deformazione con lunghezze d'onda dell'ordine di 20 km (grado q 10), rendendo molto difficile identificare l'estensione spaziale di potenziali segnali di deformazione dovuti all'attività industriale del giacimento. E' vero che la stazione GRLP è posizionata esattamente sopra il giacimento, ma questo permette solo di registrare eventuali spostamenti verticali dovuti all'attività estrattiva, mentre per la detezione di spostamenti orizzontali sono necessarie stazioni posizionate ai bordi del giacimento dove questo tipo di segnali raggiunge i valori massimi. Si raccomanda perciò di prevedere un'integrazione della rete con almeno altre 4 stazioni che copra il dominio interno di monitoraggio con interdistanze tra le stazioni minori di 10 km.

5.3 Analisi della monumentazione del sito GNSS

La validazione della rete in termini di monumentazione è un aspetto fondamentale perché solo i siti adeguatamente monumentati possono registrare eventuali segnali di deformazione dovuti all'attività di coltivazione idrocarburi, che è l'obiettivo del monitoraggio delle deformazioni del suolo. A questo scopo una corretta monumentazione delle stazioni deve essere "*adatta a scopi geofisici*" e questo avviene solo se il sito è solidale con il substrato roccioso affiorante tramite un ancoraggio che vada in profondità (da alcune decine di cm ad alcuni metri in funzione della specifica geologia di sito). Questa modalità è l'unica che garantisce di poter registrare segnali dovuti a sorgenti profonde (come deformazioni tettoniche, idrologiche e di giacimento per esempio) e non segnali superficiali di possibili instabilità locali (es. frane, compattazione di sedimenti sciolti, instabilità della piattaforma di appoggio, etc.) che potrebbero "sporcare" il segnale rendendo inutilizzabili i dati ai fini del monitoraggio.

Per la concessione di Selva Malvezzi abbiamo a disposizione la relazione tecnica di installazione della stazione GRLP, che descrive le caratteristiche tecnico-strumentali del sito. In Figura 5.3 è mostrata l'area di installazione della stazione in corrispondenza del piazzale del pozzo *Podere Maiar 1 dir* in località Mezzolara (BO).

Figura 5.3. Sito di installazione della stazione GNSS GRLP.

L'antenna della stazione GNSS è stata installata su un palo di acciaio alto 2.5 m ancorato al piazzale di cemento dell'area industriale. Non sappiamo se l'area pozzo in questione sia stata costruita su dei pali in profondità o se sia appoggiata sul terreno

di riporto non consolidato. Alla luce di informazioni tecniche più di dettaglio riguardo all'installazione del sito GNSS e dei risultati di elaborazione del dato, sarà possibile valutare la stabilità e l'affidabilità delle misure GNSS ottenute dalla stazione GRLP.

5.4 Analisi di qualità dei dati GPS

Per ottenere misure di precisione per scopi geofisici è necessario che la stazione GNSS acquisisca i dati per il maggior tempo possibile e che l'antenna della stazione sia installata al di sopra di eventuali ostacoli locali che potrebbero bloccare o degradare i segnali satellitari in arrivo, come rocce o fogliame. Nel caso di presenza nelle vicinanze della stazione di superfici riflettenti, l'antenna dovrebbe essere posizionata al di sopra di queste per ridurre il *multipath* (segnale satellitare riflesso indesiderato che riduce la precisione del GPS).

Per valutare perciò la qualità delle acquisizioni geodetiche giornaliere (file RINEX) è stato utilizzato il software TEQC (https://www.unavco.org/software/data-processing/teqc/teqc.html) ampiamente utilizzato per il trattamento standard di dati GNSS durante la fase di pre-processamento e sono state eseguite le seguenti analisi:

percentuale dei RINEX giornalieri disponibili per ciascun mese di acquisizione per la stazione GRLP (Figura 5.4);

valori medi giornalieri di *multipath* (ossia l'interferenza tra segnali satellitari diretti e riflessi) registrato per ciascuna portante del segnale satellitare (L1 e L2), in termini di MP1 e MP2, ossia la radice quadratica media, RMS, del *multipath* su ciascuna portante;

percentuale di osservazioni satellitari (o epoche) presenti nei RINEX rispetto alle osservazioni attese nello stesso intervallo di tempo giornaliero durante il quale la stazione è stata funzionante.

L'esito dell'analisi dei punti 2 e 3 è mostrato in Figura 5.5 e l'intervallo temporale dei dati utilizzati va dalla prima epoca di acquisizione (giugno 2020, Tabella 5.1) fino a luglio 2024.

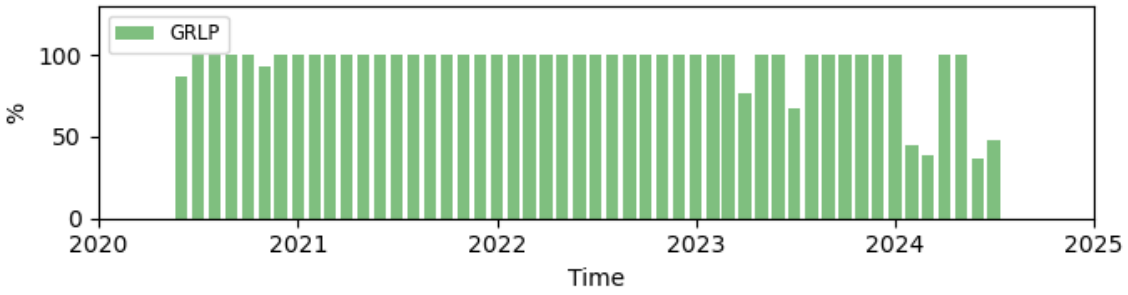


Figura 5.4. Percentuale di RINEX giornalieri disponibili per ciascun mese di acquisizione della stazione GRLP.

Per quanto riguarda il punto 1, dalla Figura 5.4 si può osservare come la stazione mostri un'ottima continuità del dato per il periodo che ci è stato consegnato, con un valore medio della percentuale di dati del 94%. Per quanto concerne il punto 2, ricordiamo che per stazioni di buona qualità i valori di MP1 e MP2 dovrebbero variare rispettivamente tra 0.1 - 0.4 m e 0.1 - 0.6 m. Dai valori riportati in Figura 5.5 si osserva come i valori medi giornalieri di MP1 e MP2 siano minori di 0.3 m e che le percentuali di acquisizioni satellitari eseguite rispetto a quelle attese nell'intervallo di tempo giornaliero di funzionamento effettivo sono sempre vicine al 100%, indicando in entrambi i casi l'ottimo posizionamento e l'elevata qualità di acquisizione della stazione.

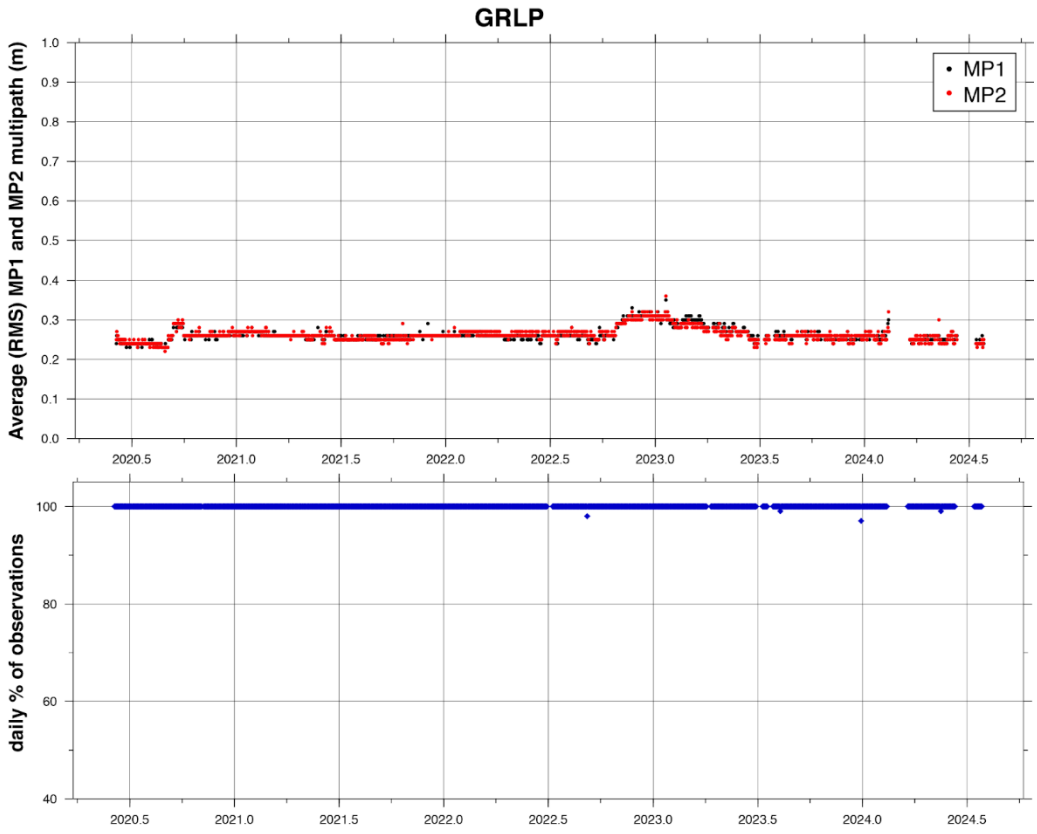


Figura 5.5. Analisi di qualità per ciascuna misura giornaliera della stazione GRLP in termini di valori di multipath MP1 in nero e MP2 in rosso (sopra), e di percentuale di osservazioni presenti nei RINEX giornalieri rispetto alle osservazioni attese nell'intervallo di tempo giornaliero di funzionamento effettivo (sotto).

5.5 Dati Storici InSAR

Il concessionario ha fornito i risultati dell'analisi delle deformazioni del suolo effettuate mediante interferometria satellitare SAR utilizzando i dati della costellazione COSMO-SkyMed. I dati consegnati coprono spazialmente un'area poco più estesa dell'area di concessione e temporalmente vanno da novembre 2008 a marzo 2024.

E' stata anche consegnata una relazione tecnica dell'analisi storica delle deformazioni misurate tramite InSAR utilizzando i dati COSMO-SkyMed svolta da Nhazca s.r.l. per il periodo 2008-2022. In tale relazione vengono riportati i risultati delle misure sia lungo la linea di vista del satellite (*Line of Sight,* LoS), sia nelle componenti E-O e Verticale. In tale relazione si conclude che nell'area prossima al pozzo PM1 "*le analisi A-DInSAR hanno restituito spostamenti di lieve intensità in allontanamento lungo la LOS compresi tra i -1,50 e -3,00 mm/anno per entrambe le geometrie orbitali*".

6 Dati di portata e pressione

Nell'ambito della produzione di gas, il Concessionario ha fornito alla SPM i volumi giornalieri e mensili di gas ed acqua prodotti dai livelli C1 e C2 del pozzo PM1 e i relativi dati di pressioni (*Tubing Head Pressure*, THP). I dati fanno riferimento al periodo 4/7/2023 - 30/6/2024 (Figura 6.1). Ha inoltre fornito la portata oraria e giornaliera nello stesso periodo, riferita al livello C2 di PM1.

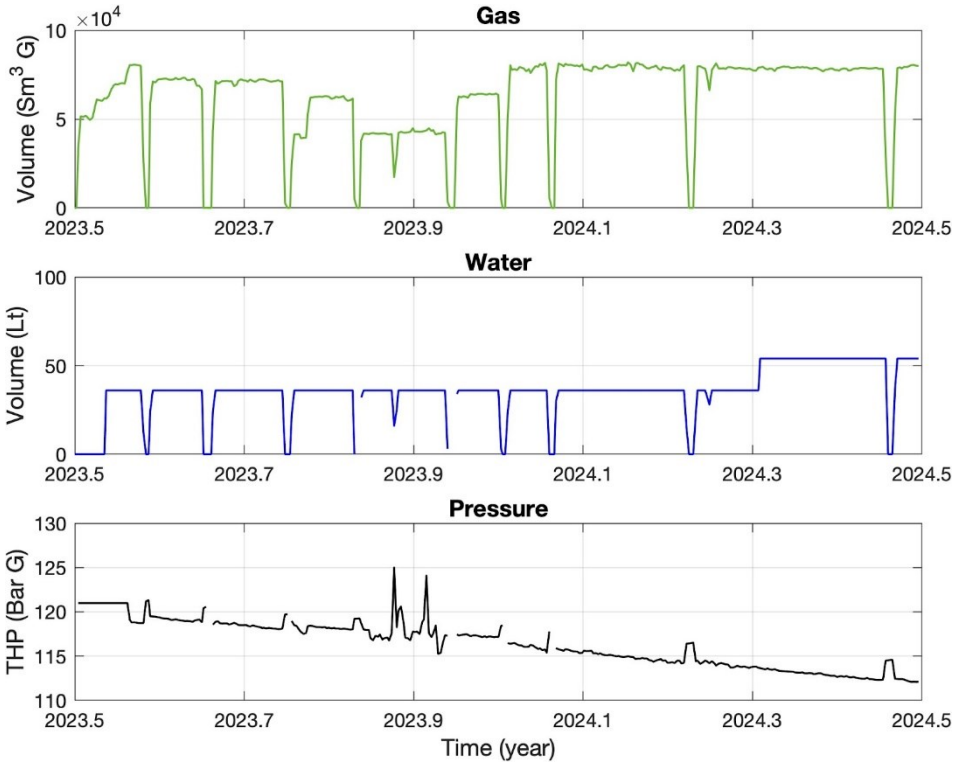


Figura 6.1. Volumi di gas e di acqua prodotti dal livello C2 del pozzo PM1 e relativi valori di pressione (THP). Il periodo dei dati va dal 4/7/2023 al 30/6/2024. Il livello C1 ha valori nulli nello stesso periodo.

Nell'ambito delle pressioni del fluido, sono state fornite 13 misure di THP, ottenute prevalentemente in condizioni di assenza di flusso (Shut-in THP). Le misure sono state acquisite a gennaio 2018 e tra giugno 2023 e giugno 2024. I valori riferiti a questo ultimo periodo hanno un andamento in linea con le misure THP mostrate in Figura 6.1.

7 Comunicazione e Disseminazione

Il Centro di Monitoraggio per le attività del Sottosuolo ha attivato un sito web dedicato alla disseminazione delle informazioni relative alle attività di monitoraggio nelle aree di concessione per le quali sia stato nominato SPM. Il sito http://cms.ingv.it (raggiungibile anche dal portale istituzionale INGV), riporta informazioni generali, documenti, mappe e relazioni sia per le sperimentazioni iniziali che per gli attuali monitoraggi in corso, in Figura 7.1 mostriamo a titolo esemplificativo la pagina dedicata alla concessione Selva Malvezzi.

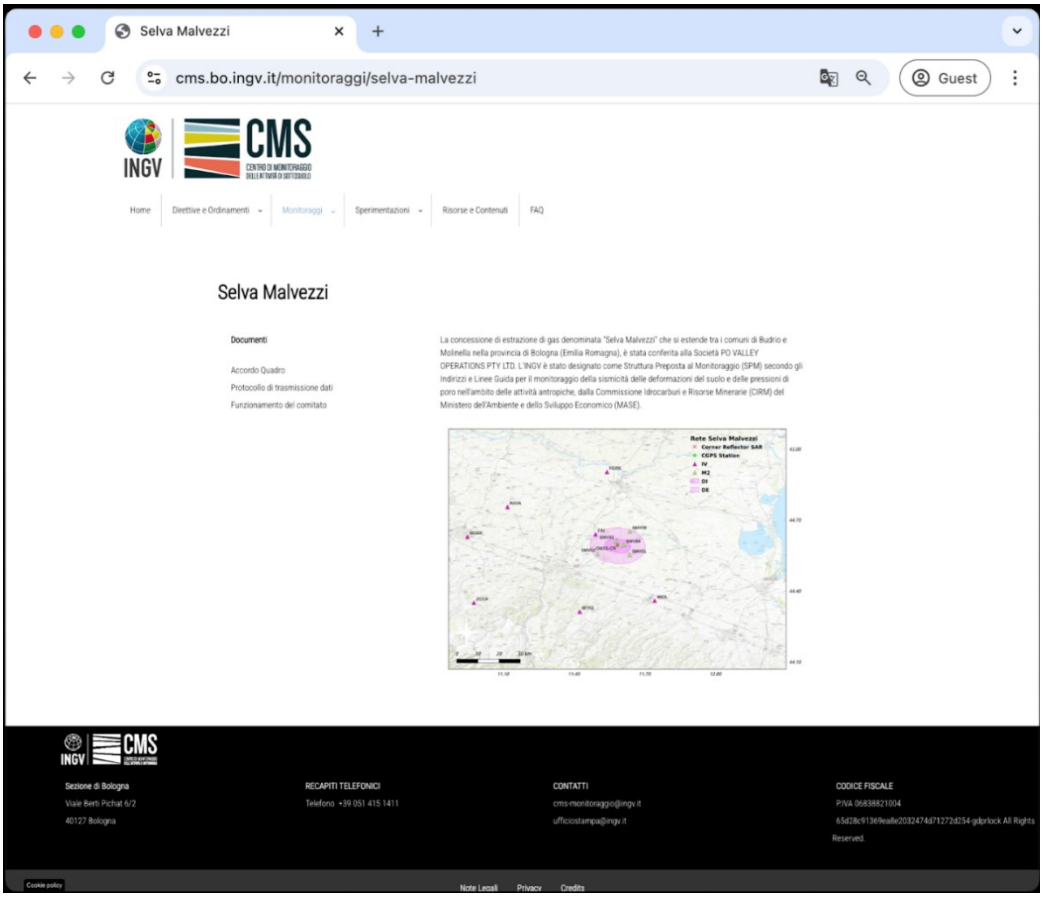


Figura 7.1. Schermata della pagina internet del CMS dedicata al monitoraggio della concessione Selva Malvezzi. Il menù a sinistra permette di aprire le diverse sottopagine dedicate ai documenti e conterrà una voce dedicata alle relazioni.

Oltre ai Report periodici semestrali, il CMS produce, ad uso interno, bollettini a cadenza giornaliera e mensile, riassuntivi della sismicità delle aree interessate dal monitoraggio, della disponibilità dei dati delle stazioni, di eventuali manutenzioni a strumenti, *hardware, software* e informazioni utili alle attività di monitoraggio. Questi bollettini e informazioni possono essere rapidamente divulgati in caso di necessità.

8 Considerazioni Conclusive

Come primo report nell'ambito del progetto di monitoraggio secondo gli ILG della concessione Selva Malvezzi e sulla base delle prime analisi effettuate sui dati raccolti, è possibile trarre alcune considerazioni.

Monitoraggio sismico:

- La rete sismica locale è rispondente alle raccomandazioni presentate negli ILG per interdistanza, percentuale di dato acquisito (a parte casi sporadici), acquisizione in continuo, temporizzazione GPS, passo di campionamento e curve di risposta aggiornate; non è rispondente per mancanza di sismometri a banda larga. Indicazioni riguardo eventuali variazioni da apportare alla configurazione e geometria della rete sismica sono subordinate ad una successiva valutazione della stessa su base prestazionale.
- Nell'area padana, la Rete Sismica Nazionale dell'INGV è molto sparsa; con stazioni localizzate a grande distanza tra loro e dalla zona d'interesse. Infatti, il bollettino INGV (http://terremoti.ingv.it) non riporta nessuno degli eventi rilevati con la rete locale integrata.
- Tutte le stazioni sono caratterizzate da livelli elevati di rumore per frequenze >~ 1Hz, che compromettono la completezza della detezione della microsismicità locale.
- La sismicità rilevata è costituita da pochi eventi di bassa energia, coerentemente con il quadro che emerge dall'analisi della sismicità storica e strumentale per l'area. Solo due eventi sismici sono stati localizzati all'interno del DE.

Monitoraggio delle deformazioni:

- La copertura spaziale della rete GNSS, anche considerando le stazioni disponibili oltre quella installata dal concessionario, permette di monitorare segnali deformativi con lunghezze d'onda di 20km, che non risultano adeguate ai segnali potenzialmente legati allo sfruttamento del giacimento. Pertanto, l'installazione di una sola stazione GNSS risulta non sufficiente allo svolgimento del monitoraggio delle deformazioni del suolo come previsto dagli ILG. Inoltre, è bene fare presente che una parte delle stazioni considerate appartiene a reti private i cui dati sono al momento disponibili per l'INGV, ma sulle quali non si può fare affidamento a lungo termine ai fini del monitoraggio.
- La stazione installata dal concessionario, tuttavia, mostra un dato di buona qualità del segnale e anche in termini di continuità.
- Allo stesso modo la strumentazione utilizzata e la tipologia di monumentazione realizzata risulta essere adeguata agli scopi di monitoraggio.

– I dati piezometrici e assestimetrici forniti non possono essere utilizzati per poter effettuare l'analisi del livello delle falde e le variazioni di quota del suolo nei formati e con le informazioni con le quali sono stati consegnati. Sarà quindi necessario un confronto con il Concessionario per una definizione ottimale di formati, tipologia di informazioni, campionamento, etc

Monitoraggio delle pressioni di poro:

– Sulla base dei dati forniti dal Concessionario è possibile osservare una diminuzione della pressione dei fluidi (THP) nel periodo 07/2023-06/2024, correlata all'estrazione dei fluidi (volumi di gas estratti dal livello C2).
– Il trend di pressione mostra dei picchi prominenti in corrispondenza dei volumi più ridotti di gas estratto.
– Non è possibile, con i dati geologici e geofisici al momento disponibili, descrivere la distribuzione dei fluidi (acqua e gas) nel giacimento e i flussi sotterranei, in relazione alla variazione delle pressioni di poro, come anche individuare eventuali limiti di permeabilità/confinamento dei fluidi nel sistema geologico. Una valutazione più accurata dello stato di pressioni di poro si rimanda così all'ottenimento di nuovi dati.

Appendice A: PPSD delle componenti orizzontali per le 6 stazioni sismiche interne al DE

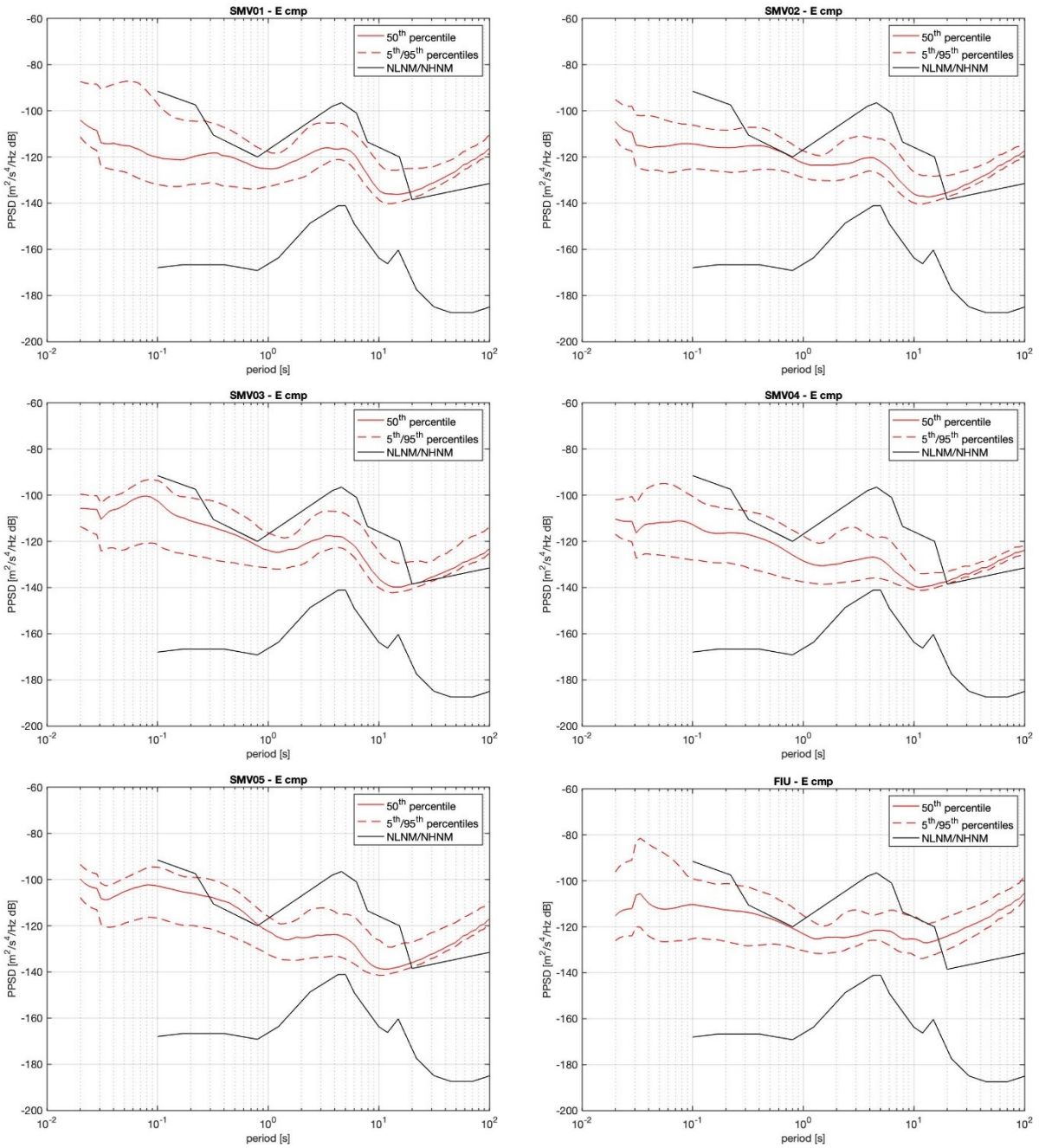


Figura A.1. PPSD calcolate sui dati registrati alle componenti E delle 6 stazioni interne ai domini dal 17 febbraio 2022 al 31 dicembre 2022. Le linee rosse continue indicano il valore mediano della distribuzione di probabilità per le PSD, le curve tratteggiate invece indicano i valori del 5° (curva sottostante) e 95° (curva superiore) percentile. Le linee nere indicano l'andamento dei valori minimo NLNM e massimo NHNM definiti da Petersen (1993) come riferimento.

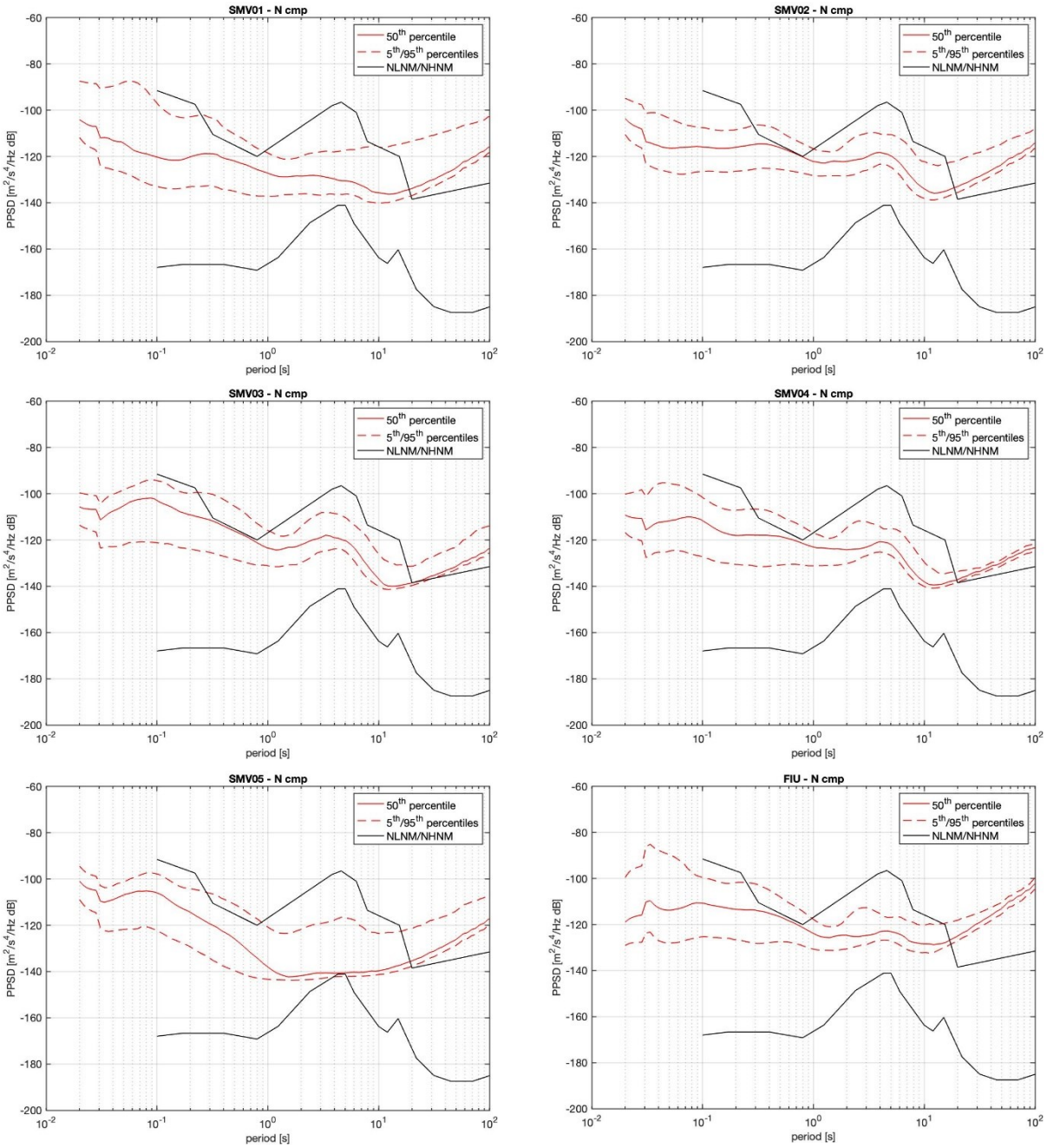


Figura A.2. PPSD calcolate sui dati registrati alle componenti N delle 6 stazioni interne ai domini dal 17 febbraio 2022 al 31 dicembre 2022. Le linee rosse continue indicano il valore mediano della distribuzione di probabilità per le PSD, le curve tratteggiate invece indicano i valori del 5° (curva sottostante) e 95° (curva superiore) percentile. Le linee nere indicano l'andamento dei valori minimo NLNM e massimo NHNM definiti da Petersen (1993) come riferimento.

Glossario

AQ	Accordo Quadro
CGPS	Continuous Global Positioning System
CMS	Centro di Monitoraggio per le attività di Sottosuolo dell'INGV
DE	Dominio Esteso
DGOM	Documento di Gestione Operativa del Monitoraggio
DI	Dominio Interno
EMS98	Scala Macrosismica Europea
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
ILG	Indirizzi e Linee Guida per il Monitoraggio della sismicità delle deformazioni del Suolo e delle pressioni di poro nell'ambito delle attività antropiche
INGV	Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar
IV	Sigla rete sismica RSN gestita dall'INGV
M2	Sigla rete sismica locale gestita da Po Valley Operations
MASE	Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica
MiSE	Ministero dello Sviluppo Economico
MiTE	Ministero della Transizione Ecologica
ML	Magnitudo Locale
Mlbj	Magnitudo Locale di Bakun & Joyner
Mw	Magitudo momento
PGA	Peak Ground Acceleration
PGV	Peak Ground Velocity
PM1	Podere Maiar 1 dir
PPSD	Probability Power Spectral Density
PSD	Power Spectral Density
RING	Rete Nazionale Integrata GPS
RSN	Rete Sismica Nazionale (INGV)
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SPM	Struttura Preposta al Monitoraggio
THP	Tubing Head Pressure - pressione dei fluidi misurata a testa pozzo nel tubo di rivestimento
TLS	Traffic Light System - sistema a semaforo

Bibliografia

Agip, (1997). Permesso Fiume Reno – Relazione tecnica allegata all'istanza di attribuzione. Disponibile al link: https://www.videpi.com/videpi/videpi.asp (ultimo accesso: 18/12/2024)

Argnani, A., and Ricci Lucchi, F. (2001). Tertiary Siliciclastic Turbidite Systems of the Northern Apennines. In: G.B., Vai, & I.P., Martini (eds.), Anatomy of a Mountain: the Apennines and adjacent Mediterranean Basins. Kluwer Academic Publisher, London, 327-350.

Bakun, W.H., and W.B. Joyner (1984). The ML scale in Central California Bulletin of the Seismological Society of America (1984) 74 (5): 1827–1843.

Boccaletti, M., Calamita, F., Deiana, G., Gelati, R., Massari, F., Moratti, G. and Ricci Lucchi, F. (1990). Migrating foredeep-thrust belt system in the Northern Apennines and Southern Alps. Paleogeogr. Paleoclim. Paleoecol. 77, 3–14.

Carminati, E. and Doglioni, C. (2003). Apennines subduction-related subsidence of Venice (Italy). Geophysical Research Letters 30(13), 1717.

Carminati, E., Scrocca & D, Doglioni, C. (2003). Compaction-induced stress variations with depth in an active anticline: Northern Apennines, Italy. J. Geophys. Res. 115, B02401.

Carminati, E., Lustrino, M., Cuffaro, M. and Doglioni, C. (2010). Tectonics, magmatism and geodynamics of Italy: What we know and what we imagine. In: The Geology of Italy: tectonics and life along plate margins. Eds.: Beltrando, M., Peccerillo, A., Mattei, M., Conticelli, S. & Doglioni, C., Journal of the Virtual Explorer, Electronic Edition, 36(9).

CMS. Centro di monitoraggio delle attività di sottosuolo. accesso 16 dicembre 2024, http://cms.ingv.it/monitoraggi/selva-malvezzi

Cooley J., and Tukey J. (1965). An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series. Math. Computat., 19, 90, 297-301, http://dx.doi.org/10.1090/S0025-5718-1965-0178586-1.

Dialuce, G., Chiarabba, C., Di Bucci, D., Doglioni, C., Gasparini, P., Lanari, R., Priolo, E., Zollo, A., (2014): Indirizzi e linee guida per il monitoraggio della sismicità, delle deformazioni del suolo e delle pressioni di poro nell'ambito delle attività antropiche. GdL MISE, Roma. unmig.mise.gov.it/unmig/agenda/upload/85238.pdf. (ultimo accesso Ottobre 2019).

Doglioni, C. (1993). Some remarks on the origin of foredeeps. Tectonophysics 228,1-20.

Doglioni, C. (1994). Foredeeps versus subduction zones. Geology 22, 271-274.

Gambolati G., Teatini P., 1998. Numerical Analysis of Land Subsidence due to Natural Compaction of the Upper Adriatic Sea Basin. In: Gambolati G. (eds) CENAS. Water Science and Technology Library, vol 28. Springer, Dordrecht. 10.1007/978-94-011-5147-4_5.

Gambolati, G, Teatini, P., Tomasi, L., Gonella, M., 1999. Coastline regression of the Romagna Region, Italy, due to natural and anthropogenic land subsidence and sea level rise. Volume35, Issue1 January 1999 Pages 163-184. 10.1029/1998WR900031.

Geoportale RER. Cartografia Geologica del Servizio di Geologia, Sismica e Suoli della Regione Emilia-Romagna, disponibile al link: https://servizimoka.regione.emilia-romagna.it/mokaApp/apps/geo/index.html (ultimo accesso: 18/12/2024)

Ghielmi, M., Minervini, M., Nini, C., Rogledi, S. and Rossi, M. (2013). Late Miocene-Middle Pleistocene sequences in the Po Plain - Northern Adriatic Sea (Italy): The stratigraphic record of modification phases affecting a complex foreland basin. Marine and Petroleum Geology 42, 50-81.

Krischer L., Megies T., Barsch R., Beyreuther M., Lecocq T., Caudron C., Wassermann J. (2015). ObsPy: a bridge for seismology into the scientific Python ecosystem. Comput. Sci. Discov., 8 (1) (2015), Article 014003.

Lee, W. H. K., and J. C. Lahr, HYP071 (REVISED): a computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes, Open-file report 75-311, U. S. Geological Survey, 114 pp., 1975.

Luzi, L., Pacor, F., Ameri, G., Puglia, R., Burrato, P., Massa, M., Augliera, P., Franceschina, G., Lovati, S., and Castro, R., 2013: Overview on the Strong-Motion Data Recorded during the May-June 2012 Emilia Seismic Sequence, Seismol. Res. Lett., 84, 629–644, https://doi.org/10.1785/0220120154.

Martelli, L., Amorosi, A. e Severi, P. (2009). Note illustrative della carta geologica d'Italia alla scala 1:50000, F. 221 Bologna. Servizio Geologico d'Italia, ISPRA.

McNamara, D. E. and Buland, R. P. (2004) Ambient Noise Levels in the Continental United States, B. Seism. Soc. Am., 94, 1517–1527.

Molinari, I., J. Verbeke, L. Boschi, E. Kissling, and A. Morelli (2015), Italian and Alpine three-dimensional crustal structure imaged by ambient-noise surface-wave dispersion, Geochem. Geophys. Geosyst., 16, 4405–4421, doi:10.1002/2015GC006176.i

Petersen, J. R. (1993), Observations and modeling of seismic background noise, Open-File Report, 93-322, https://doi.org/10.3133/ofr93322

Postpischl D., (1985). Catalogo dei terremoti italiani dall'anno 1000 al 1980. Progetto Finalizzato Geodinamica. Quaderni de La Ricerca Scientifica, n. 114, vol. 2B

Po Valley, (2021). Istanza di Concessione di Coltivazione denominata "Selva Malvezzi" derivante dal Permesso di Ricerca "Podere Gallina" – Piano di monitoraggio – Aggiornamento novembre 2021, Recepimento prescrizioni VIA.

Ricci Lucchi, F. (1986). The Oligocene to recent foreland basins of the northern Apennines. In: Foreland basins. Eds. Allen P. A., Homewood P., I.A.S. Special Publication, 8, 105–139.

Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli B., Gasperini P. e Antonucci A., (2022). Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15), versione 4.0. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). https://doi.org/10.13127/CPTI/CPTI15.4

Scrocca, D., Doglioni, C. and Innocenti, F. (2003). Constraints for an interpretation of the Italian geodynamics: a review.Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia LXII, 15-46.

Scrocca, D., Carminati, E., Doglioni, C. and Marcantoni, D. (2007). Slab retreat and active shortening along the central-northern Apennines. In: Thrust belts and Foreland Basins – Fold Kinematics to hydrocarbon systems - Eds.: Lacombe O., Lavè J., Roure F, Verges J. Frontiers in Earth Sciences, Springer, 471-487.

Snam website - Campo di stoccaggio di Minerbio. Disponibile al link: https://www.snam.it/it/snam_per_minerbio/impianto_progetto/giacimento_stoccaggio_minerbio/ (ultimo accesso: 18/12/2024)

Tape, C., Musé, P., Simons, M., Dong, D., and Webb F. (2009). Multiscale estimation of GPS velocity fields. Geophys. J. Int. 179(2), 945–971. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04337.x.

Tarabusi G., Sgattoni G. and Caputo R. (2024). Imaging buried anticlines in the Po Plain, northern Italy, based on HVSR frequency and amplitude analyses. Int. J. Earth Sci. 113, 1457–1473 https://doi.org/10.1007/s00531-024-02448-0.

Teatini, P., Ferronato, M., Gambolati, G., Bertoni, W. and Gonella M., 2005. A century of land subsidence in Ravenna Italy. Environ. Geol. 47 (6), 831–846. https://doi.org/10.1007/s00254-004-1215-9.

Teatini, P., M. Ferronato, G. Gambolati, and M. Gonella; 2006. Groundwater pumping and land subsidence in the Emilia-Romagna coastland, Italy: Modeling the past occurrence and the future trend. Water Resour. Res., 42, W01406. DOI: 10.1029/2005WR004242.

Zaccarelli L., Anselmi M., Vassallo M., Munafò I., Faenza L., Sandri L., Garcia A., Polcari M., Pezzo G., Serpelloni E., Anderlini L., Errico M., Molinari I., Zerbinato G. and Morelli A., (2021). Practical Issues in Monitoring a Hydrocarbon Cultivation Activity in Italy: The Pilot Project at the Cavone Oil Field. Front. Earth Sci. 9:685300. doi: 10.3389/feart.2021.685300.

Elenco delle figure

Figura 1.1. Domini di monitoraggio Interno (DI) ed Esteso (DE) provvisori adottati attualmente per il monitoraggio della concessione Selva Malvezzi. 7

Figura 1.2. Livelli di attivazione e valori soglia per i parametri sismici come definiti negli ILG, § 9, Tabella 3. Nel documento originale l'unità fisica di PGV è stata erroneamente indicata in cm/s2. 8

Figura 2.1. Strutture tettoniche dell'Appennino Settentrionale e area di ubicazione della concessione di Selva Malvezzi: a) mappa dei principali lineamenti tettonici dell'Appennino Settentrionale e settore emiliano della Pianura Padana con area di ubicazione della concessione (destra); b) sezione sismica riferita all'Arco Ferrarese-Romagnolo con i principali sovrascorrimenti del prisma di accrezione (linee rosse). Le immagini sono state modificate a partire dai lavori di Carminati et al. (2010), Doglioni (1994) e Scrocca et al. (2007). La carta tecnica regionale mostrata in a) fa riferimento alla Cartografia Geologica del Servizio di Geologia, Sismica e Suoli della Regione Emilia-Romagna (Geoportale RER). 10

Figura 2.2. Concessione di Selva Malvezzi: a) carta tecnica regionale; b) unità geologiche di superficie; c) direzione degli apporti sedimentari in superficie e in profondità; d) lineamenti strutturali sepolti e andamento in profondità della base del Pliocene; e) sezione geologica trasversale all'asse del sovrascorrimento di Minerbio. Le immagini a) - d) fanno riferimento alla Cartografia Geologica del Servizio di Geologia, Sismica e Suoli della Regione Emilia-Romagna (Geoportale RER). La sezione e) è stata ridisegnata sulla sezione sismica interpretata del campo di stoccaggio di Minerbio (Snam website, Campo di stoccaggio di Minerbio). 11

Figura 3.1. Mappa della distribuzione dei terremoti che ricadono nell'area di interesse (rettangolo in verde), sia storici (relativi al periodo 1000-1985, cerchi rossi) che strumentali (relativi al periodo 1985-2024, cerchi blu). Il cerchio rosa identifica il dominio di monitoraggio interno mentre quello arancione identifica il dominio esteso. 15

Figura 4.1. Mappa dell'area monitorata per la concessione Selva Malvezzi. DI e DE sono indicati con le aree ombreggiate. La posizione delle stazioni della rete sismica del concessionario M2 è segnata con i triangoli verdi, mentre le stazioni della rete IV sono segnalate con i triangoli porpora. 18

Figura 4.2. Rappresentazione grafica del funzionamento delle cinque stazioni della rete M2. Ad ogni giorno di effettiva registrazione del dato sismico corrisponde una barra verticale blu, quindi la mancata colorazione indica i periodi di interruzione del flusso di dati per malfunzionamento. 19

Figura 4.3. PPSD calcolate sui dati registrati alle componenti Z delle 6 stazioni interne al DI dal 17 febbraio 2022 al 31 dicembre 2022. Le linee rosse continue indicano il valore mediano della distribuzione di probabilità per le PSD, le curve tratteggiate invece indicano i valori del 5° (curva sottostante) e 95° (curva superiore) percentile. Le linee nere indicano l'andamento dei valori minimo NLNM e massimo NHNM definiti da Petersen (1993) come riferimento. 21

Figura 4.4. Mappa degli epicentri calcolati per gli eventi riportati in Tabella 4.3 (cerchi gialli) In arancione (DE) e rosso (DI) sono delineati i contorni dei domini. Le stazioni sismiche prese in considerazione per il monitoraggio dell'area sono indicate con i triangoli blu. 22

Figura 5.1. Interdistanze entro i 15 km tra tutte le stazioni GNSS attive appartenenti sia a reti pubbliche (gialle) sia a reti private (rosse) disponibili nell'area di monitoraggio della concessione Selva Malvezzi. 25
Figura 5.2. risoluzione spaziale in termini di valore massimo della scala q di wavelet sferiche riprodu-cibile con la distribuzione spaziale di tutte le stazioni GNSS, corrispondente alla scala spaziale riportata in Tabella 5.2. 27
Figura 5.3. Sito di installazione della stazione GNSS GRLP. 28
Figura 5.4. Percentuale di RINEX giornalieri disponibili per ciascun mese di acquisizione della stazione GRLP. 29
Figura 5.5. Analisi di qualità per ciascuna misura giornaliera della stazione GRLP in termini di valori di multipath MP1 in nero e MP2 in rosso (sopra), e di percentuale di osservazioni presenti nei RINEX giorna-lieri rispetto alle osservazio-ni attese nell'intervallo di tempo giornaliero di funzio-namento effettivo (sotto). 30
Figura 6.1. Volumi di gas e di acqua prodotti dal livello C2 del pozzo PM1 e relativi valori di pressione (THP). Il periodo dei dati va dal 4/7/2023 al 30/6/2024. Il livello C1 ha valori nulli nello stesso periodo. 32
Figura 7.1. Schermata della pagina internet del CMS dedicata al monitoraggio della concessione Selva Malvezzi. Il menù a sinistra permette di aprire le diverse sottopagine dedicate ai documenti e conterrà una voce dedicata alle relazioni. 33
Figura A.1. PPSD calcolate sui dati registrati alle componenti E delle 6 stazioni interne ai domini dal 17 febbraio 2022 al 31 dicembre 2022. Le linee rosse continue indicano il valore mediano della distribuzione di probabilità per le PSD, le curve tratteggiate invece indicano i valori del 5° (curva sottostante) e 95° (curva superiore) percentile. Le linee nere indicano l'andamento dei valori minimo NLNM e massimo NHNM definiti da Petersen (1993) come riferimento. 36
Figura A.2. PPSD calcolate sui dati registrati alle componenti N delle 6 stazioni interne ai domini dal 17 febbraio 2022 al 31 dicembre 2022. Le linee rosse continue indicano il valore mediano della distribuzione di probabilità per le PSD, le curve tratteggiate invece indicano i valori del 5° (curva sottostante) e 95° (curva superiore) percentile. Le linee nere indicano l'andamento dei valori minimo NLNM e massimo NHNM definiti da Petersen (1993) come riferimento. 37

Elenco delle tabelle

Tabella P.1. Date relative alla realizzazione e trasmissione dei documenti necessari a regolamentare il monitoraggio. 5
Tabella P.2. Date relative alle diverse fasi di trasmissione dati dal concessionario alla SPM. 5
Tabella 3.1. Elenco dei 13 terremoti storici localizzati entro l'area di interesse secondo i cataloghi PFG o CPTI (la fonte è indicata nella prima colonna di sinistra). La magnitudo è espressa come magnitudo macrosismica (M_m), ad eccezione dei quattro eventi inclusi nel CPTI per i quali viene riportata la magnitudo momento (M_w, valori contrassegnati da un asterisco). 14
Tabella 3.2. Elenco dei terremoti strumentali presenti nel bollettino INGV che ricadono nell'area di studio. 14
Tabella 4.1. Stazioni sismiche utilizzate nel monitoraggio della concessione Selva Malvezzi, la rete M2 è la rete locale gestita dal concessionario e si compone di 5 stazioni, la IV invece è la rete sismica nazionale gestita dall'INGV, dalla quale abbiamo selezionato le stazioni più prossime ai domini di monitoraggio. 17
Tabella 4.2. Percentuali di corretto funzionamento di ogni stazione calcolate per tutto il periodo 2022-2024 e per ognuno dei tre anni. In giallo sono evidenziati i periodi con meno dati rispetto al 95% consigliato dagli ILG. 20
Tabella 4.3. Elenco dei terremoti rilevati e localizzati grazie alla rete sismica locale M2 integrata dalle stazioni IV nel periodo 17 febbraio 2022 – 22 novembre 2024. Solo due eventi cadono all'interno dei domini di Selva Malvezzi e vengono evidenziati in verde. 23
Tabella 5.1. Caratteristiche della stazione GNSS installata per la concessione Selva Malvezzi in termini di coordinate, data di installazione e strumentazione in uso. 24
Tabella 5.2. Scala spaziale delle wavelet sferiche che indicano la semi-lunghezza d'onda del segnale ripro-dotto. 26