

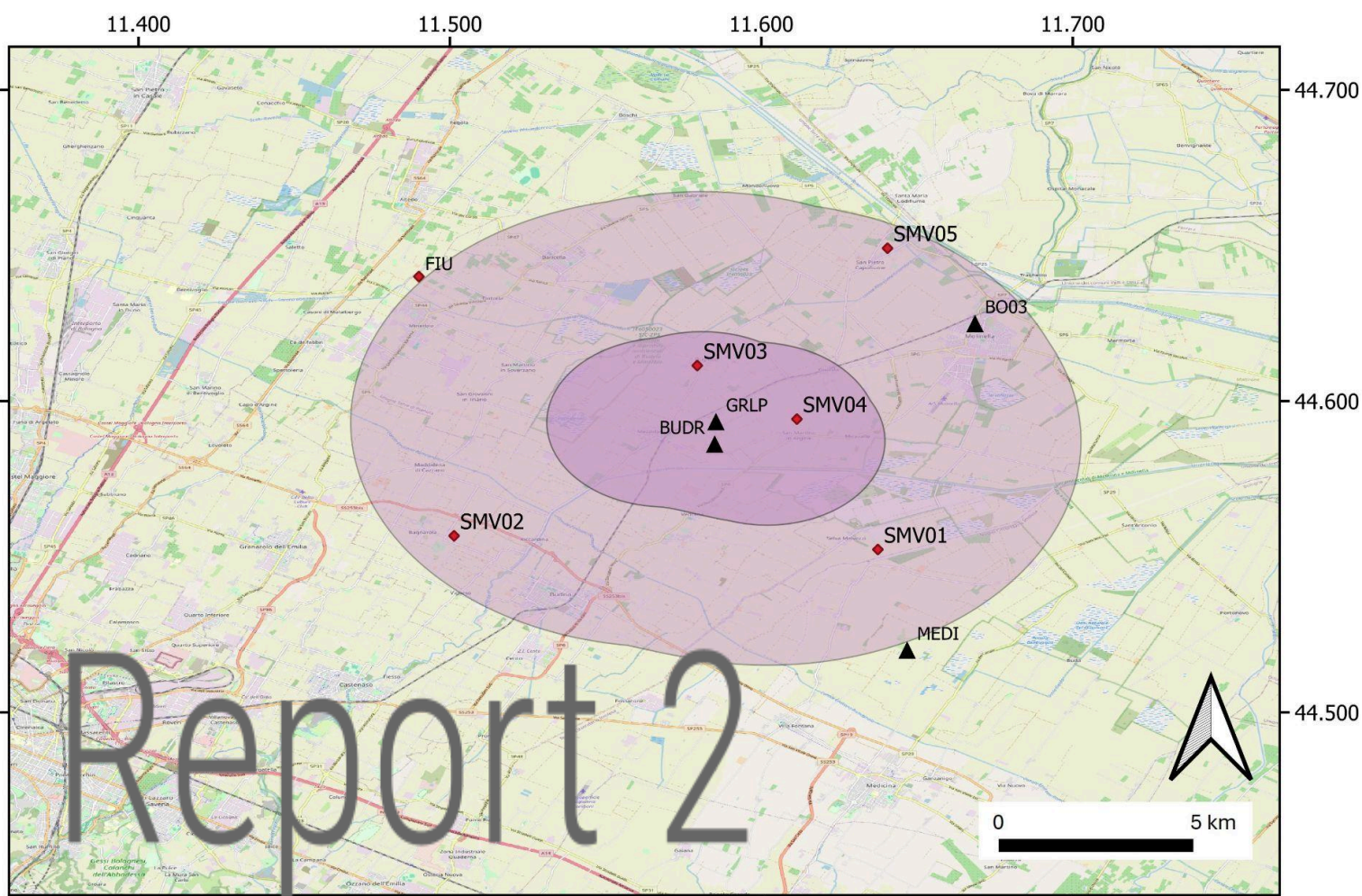
Accordo Quadro 2024-2028

MASE, Regione Emilia Romagna, 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, C. Tolomei, M. Vassallo e G. Zerbinato



PREMESSA	5
1 PARAMETRI DI MONITORAGGIO	6
2 VALIDAZIONE RETE SISMICA	8
2.1 RETE SISMICA	8
2.2 SOGLIE DI DETEZIONE DALLO STUDIO DEL RUMORE SISMICO AMBIENTALE	9
3 MONITORAGGIO SISMICO E ANALISI DATI	12
3.1 FUNZIONAMENTO DELLA RETE SISMICA	12
3.2 ANALISI DELLA SISMICITÀ NEI DOMINI DI MONITORAGGIO	14
4 MONITORAGGIO GEODETICO E ANALISI DEI DATI	14
4.1 DESCRIZIONE RETE GNSS	14
4.2 ANALISI DI QUALITÀ DEI DATI	16
4.3 ELABORAZIONE DEL DATO	17
4.4 CAMPO DI VELOCITÀ	19
4.5 DATI INSAR	21
4.6 CEDIMENTO DEL TERRENO E LIVELLO DI FALDA	32
5 ANALISI DI DATI DI PRESSIONE E PORTATA	34
5.1 PRODUZIONE E PRESSIONI	34
6 CONSIDERAZIONI FINALI	35
6.1 MONITORAGGIO SISMOLOGICO	35
6.2 MONITORAGGIO DELLE DEFORMAZIONI DEL SUOLO	36
6.3 MONITORAGGIO DELLE PRESSIONI DI PORO	37
6.4 Conclusioni	37
GLOSSARIO	38
BIBLIOGRAFIA	39

Accordo Quadro 2024-2028

MASE, Regione Emilia Romagna, Comune di Budrio, INGV, Po Valley
Operations pty ltd

PROGETTO DI MONITORAGGIO CONCESSIONE SELVA MALVEZZI **Relazione semestrale n.2**

Lucia Zaccarelli¹, Giuseppe Pezzo², Letizia Anderlini¹, Eleonora Vitagliano², Maddalena Errico¹,
Maurizio Vassallo³, Giampaolo Zerbinato¹

¹ INGV, Sezione di Bologna, Italia;

² INGV, Osservatorio Nazionale Terremoti, Roma, Italia

³ INGV, Sezione di Roma 1, Roma, Italia.

30/06/2025

Premessa

La presente relazione descrive le attività svolte dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) 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, Dialuce et al., 2014) 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 (PM1d) nella frazione di Mezzolara, comune di Budrio (Bologna). Il pozzo viene realizzato tra novembre e dicembre 2017 e raggiunge i 1340 m di profondità (Po Valley, 2021). Il 4 luglio 2023 il pozzo entra in produzione.

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 all'INGV (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 del monitoraggio
29 agosto 2024	Comunicazione da parte dell'INGV delle definizioni preliminari di DI e DE utili al monitoraggio.
17 gennaio 2025	Invio della prima Relazione semestrale della SPM a tutto il comitato: analisi dei dati di monitoraggio dal 22 maggio 2024 al 21 novembre 2024

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

In questo secondo rapporto semestrale l'obiettivo principale è quello di completare la verifica della rispondenza della rete di monitoraggio sismico integrata ai requisiti dettati dagli ILG Inoltre, vengono riportati i risultati del monitoraggio sismico degli ultimi sei mesi dal 22/11/2024 al 21/05/2025 e i primi risultati delle misure di deformazione per l'area di monitoraggio dai dati GNSS, InSAR e di terreno dai piezometri e assestimetri forniti dal concessionario.

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 • Elaborazioni InSAR dal novembre 2008 a marzo 2024 • Assestimetri e piezometri dal 16 febbraio 2022 al 22 luglio 2024 - non utilizzabili per assenza delle informazioni necessarie a trasformare le misure strumentali in parametri fisici • Dati di produzione e pressione testa pozzo dal 4 luglio 2023 al 30 giugno 2024 • Misure di gradiente statico e dinamico di pressione acquisite a gennaio 2018 e tra giugno 2023 e giugno 2024
19 febbraio 2025	Vengono fornite le credenziali di accesso all'FTP dedicato ai dati di monitoraggio: assestimetri e piezometri (in mm) + dati di produzione, entrambi i tipi di dato vengono aggiornati mensilmente
25 febbraio 2025	Vengono fornite le credenziali di accesso all'FTP dei dati GNSS aggiornati giornalmente
5 marzo 2025	Vengono caricati sull'FTP i dati degli assestimetri e piezometri e i dati di produzione aggiornati a tutto febbraio 2025
7 aprile 2025	Vengono caricati sull'FTP i dati degli assestimetri e piezometri e i dati di produzione aggiornati a tutto marzo 2025
14 maggio 2025	Vengono caricati sull'FTP i dati degli assestimetri, piezometri, InSAR e i dati di produzione aggiornati a tutto aprile 2025
16 giugno 2025	Vengono caricati sull'FTP i dati degli assestimetri, piezometri, e i dati di produzione aggiornati a tutto maggio 2025

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

1 Parametri di monitoraggio

Riportiamo brevemente quanto descritto nella relazione n.1 per avere un riferimento riguardo al contesto e all'ottica in cui si svolge il monitoraggio nella concessione Selva Malvezzi. Le definizioni dei domini e le soglie indicate qui si basano su quanto riportato nel cap.9 degli ILG, in attesa della definizione di uno specifico Documento di Gestione del Monitoraggio (DGOM) per questa concessione.

L'area oggetto del monitoraggio e l'estensione dei domini di monitoraggio sono mostrati nella mappa di Figura 1.1, dove si può vedere anche la posizione del pozzo PM1d. Il Dominio Interno è stato preliminarmente definito come il volume che contorna il giacimento fino ad una distanza di 3 km e che si estende dalla superficie fino a 4.278 km di profondità (ovvero di ulteriori 3 km oltre la profondità massima stimata per il giacimento di 1.278 km). Il DE è il volume che contorna il DI di ulteriori 5 km e quindi raggiunge la profondità di 9.278 km.

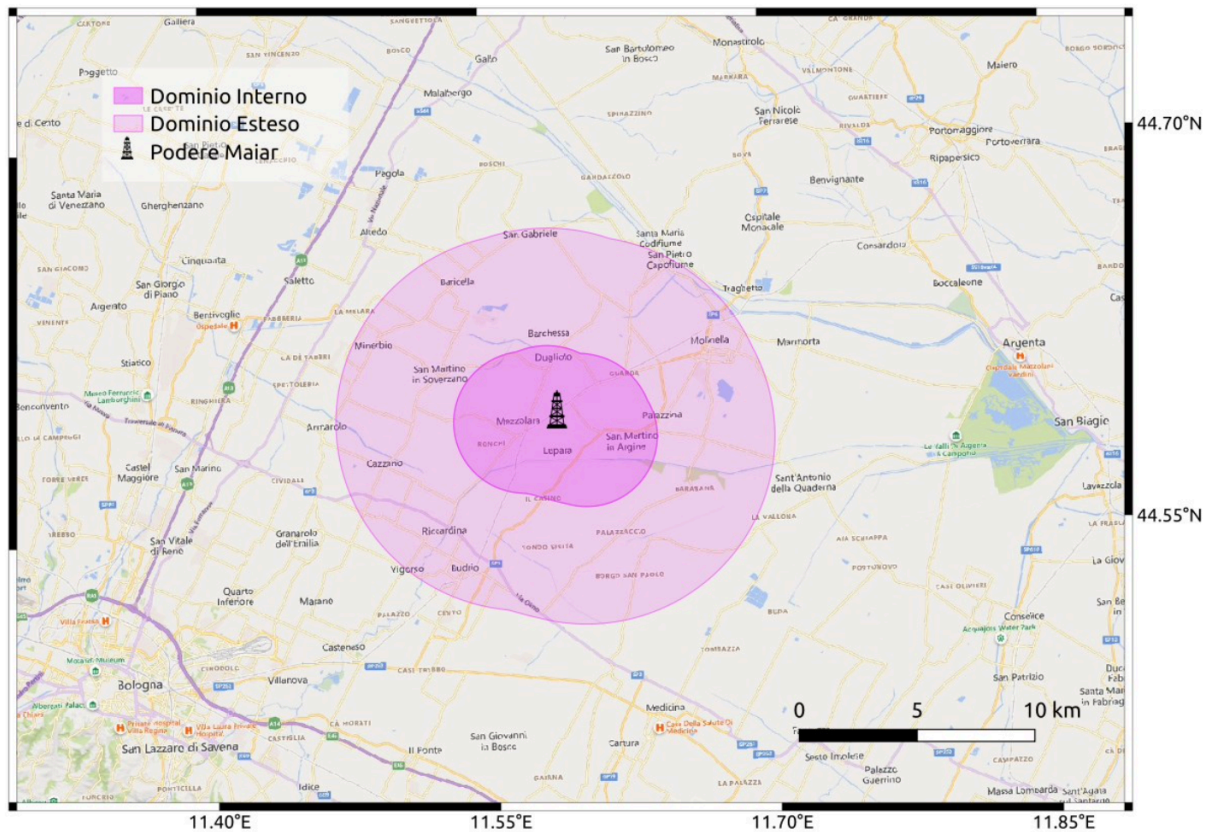


Figura 1.1: Estensione dei Domini di monitoraggio: Interno (DI) ed Esteso (DE) provvisori adottati attualmente per l'area della concessione Selva Malvezzi.

Le soglie per la definizione del passaggio di livello di allerta secondo uno schema a semaforo (TLS, *Traffic Light System*) al momento rimangono quelle indicate nel capitolo 9 degli ILG, come riportato nello schema di Figura 1.2. Sottolineiamo come nel caso delle attività svolte nella concessione Selva Malvezzi che non includono reiniezione, non c'è automatismo per il passaggio da un livello di allerta a un altro.

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, cap. 9, Tabella 3. Nel documento originale l'unità fisica di PGV è stata erroneamente indicata in cm/s².

2 Validazione rete sismica

La validità della rete sismica secondo le prescrizioni degli ILG deve essere valutata su base prestazionale e deve essere in grado di (ILG, cap. 5.3):

- “1. nel dominio interno di rilevazione, rilevare e localizzare i terremoti a partire da magnitudo locale M_L compresa tra 0 e 1 ($0 \leq M_L \leq 1$) e con incertezza nella localizzazione dell'ipocentro di alcune centinaia di metri;
2. nel dominio esteso di rilevazione, migliorare di circa 1 unità il livello di magnitudo di completezza delle rilevazioni effettuate dalle reti nazionali o regionali che svolgono servizio di monitoraggio sismico per finalità di protezione civile 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.”

Non avendo a disposizione un catalogo di eventi abbastanza popolato da poter eseguire analisi statistiche mirate, possiamo unicamente affidarci ad una validazione della rete sismica teorica, basata su simulazioni numeriche della capacità di detezione.

2.1 Rete sismica

La rete sismica locale M2 di proprietà del concessionario si compone di 5 stazioni: SMV01 - SMV05 (tutti velocimetri a 3 componenti), che sono installate in superficie. Abbiamo aggiunto all'acquisizione le 7 stazioni della rete sismica nazionale IV gestita dall'INGV che ricadono entro 50 km dal pozzo PM1d: FERS, FIU, IMOL, MODE, MTRZ, RAVA, ZCCA. La rete sismica integrata viene mostrata in mappa in Figura 2.1, si nota come solo FIU ricada vicino alle stazioni M2, internamente al DE, mentre le altre stazioni della rete IV sono lontane decine di km (una distanza maggiore della massima estensione del DI).

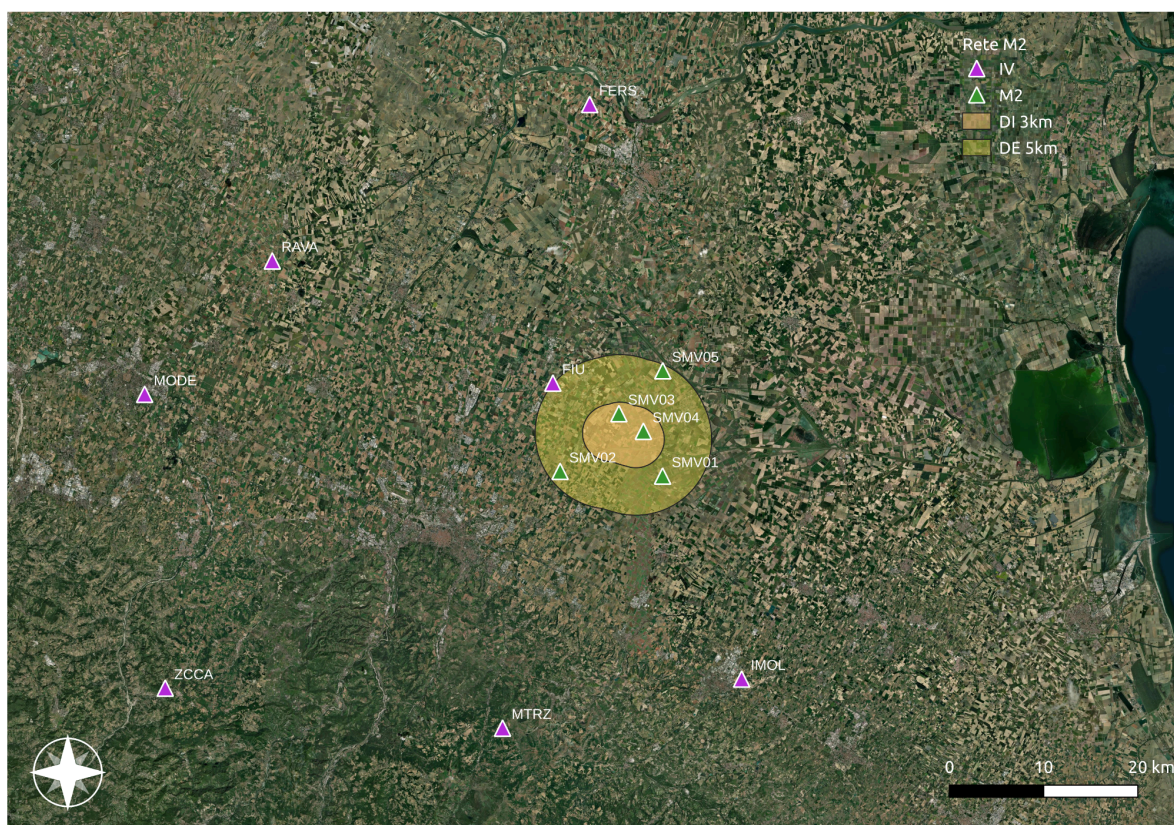


Figura 2.1. Mappa dei domini di monitoraggio (ombreggiati in giallo) per la concessione Selva Malvezzi e della posizione delle stazioni sismiche della rete M2 del concessionario (triangoli verdi) e della rete sismica nazionale IV (triangoli magenta).

2.2 Soglie di detezione dallo studio del rumore sismico ambientale

Per comprendere le prestazioni, in termini di soglia di detezione di eventi sismici della rete di monitoraggio di Selva Malvezzi, è stata effettuata un'analisi basata sul rapporto tra segnale e rumore del minimo evento che è possibile registrare ad ogni stazione, seguendo il metodo proposto da Vassallo et al. (2012). Come livello di rumore caratteristico di ogni stazione è stato considerato il 90° percentile mediato fra 1 e 30 Hz delle PPSD (*Probability Power Spectral Density*, presentate nella prima relazione semestrale) calcolate sulle registrazioni di tutto il mese di febbraio 2024. Come segnale invece si considera lo spettro relativo alle fasi P ed S di un evento sismico seguendo l'approccio di Brune (Brune, 1970; Brune, 1971) in cui il segnale spettrale atteso, per un terremoto di fissata magnitudo e distanza dalla stazione, viene calcolato utilizzando i parametri relativi alla sorgente sismica e al mezzo di propagazione (*stress-drop*, densità, velocità delle onde P ed S, attenuazione anelastica). Per queste stime, sono stati utilizzati i seguenti parametri di sorgente e di propagazione: *stress-drop* $\Delta\sigma=1.0$ MPa, attenuazione $t^*=0.08$ s (tempo ridotto), $V_p=4400$ m/s, $V_s=2500$ m/s, densità $\rho=2.4$ g/cm³ (scelti in analogia a quanto presentato in Zaccarelli et al., 2021 per la concessione di Mirandola). I parametri di propagazione sono stati fissati tenendo conto della profondità dei soli due eventi

registrati nell'area del DE di rilevazione da febbraio 2022 (data di installazione della rete sismica) a oggi, pari a circa 4 Km (analisi presentate nella prima relazione semestrale).

Fissato un evento di magnitudo M_w che avviene ad una distanza R da una stazione, il terremoto si considera rilevato se il rapporto segnale/rumore è superiore a 5. Questa soglia ci assicura che la fase considerata (P o S) abbia un'ampiezza tale da superare in maniera significativa il livello di rumore caratteristico della stazione, consentendo in tal modo l'individuazione del tempo di arrivo della fase stessa. Per ogni stazione è quindi possibile calcolare, per una fissata magnitudo, la distanza al di sotto della quale l'evento è registrato con un rapporto segnale/rumore superiore a tale soglia di rilevazione. Avendo a disposizione le curve di rilevabilità distanza-magnitudo per ogni stazione della rete, viene determinata la soglia di detezione per l'intera rete di Selva Malvezzi integrata con le stazioni IV che consideriamo a contorno come mostrato in Figura 2.1.

Per ogni punto della mappa (sia interno che esterno alla rete) preso come possibile ipocentro, si stima quindi la magnitudo minima che un evento deve avere per essere registrato con un rapporto segnale rumore superiore a 5 ad almeno 5 stazioni. La scelta di tale soglia sul numero minimo di stazioni è determinata in maniera empirica, considerando che per una determinazione ipocentrale di precisione adeguata alle dimensioni dell'area investigata, sono necessarie almeno 5 letture di tempi di arrivo ad altrettante stazioni.

Abbiamo infine realizzato le mappe delle soglie di detezione teoriche sia per le onde P che per le onde S. L'onda P è necessaria ad ottenere una buona localizzazione epicentrale, mentre l'onda S serve per migliorare l'accuratezza in profondità e per stimare la magnitudo.

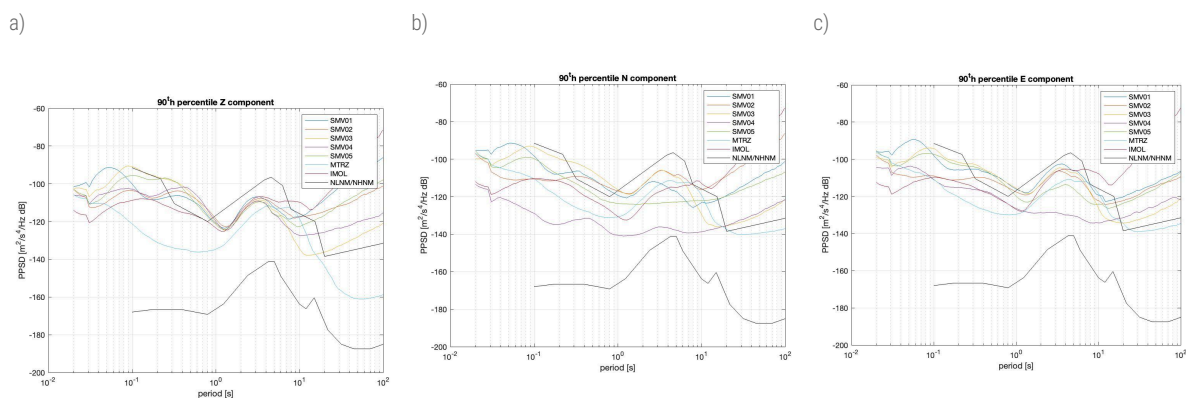


Figura 2.2. Curve di rumore calcolate dal 90° percentile delle PSD del mese di Febbraio 2024 per tutte le stazioni della rete integrata alle tre componenti Z, N e E rispettivamente da sinistra a destra. Le linee nere indicano l'andamento dei valori di rumore minimo NLNM (New Low Noise Model) e massimo NHNM (New High Noise Model) definiti da Peterson (1993) come riferimento.

Per le caratteristiche tipiche che distinguono onde P e S (rispettivamente polarizzate longitudinalmente e perpendicolarmente alla direzione di propagazione) si considera il livello di rumore medio della componente verticale (Z) per stimare la detezione delle onde P, e quello ricavato dalle componenti orizzontali per la definizione delle soglie di detezione della fase S. Dalle curve di rumore medio calcolate a tutte le stazioni e ognuna delle tre componenti (Figura 2.2), si

nota subito come la stazione di Monterenzio (MTRZ), in Appennino, abbia un livello di rumore decisamente inferiore rispetto a tutte le altre stazioni installate in pianura. Questa osservazione è attribuibile a due fattori: il primo, è relazionato alla maggior distanza dalle sorgenti di rumore antropico, più densamente distribuite nei territori della pianura rispetto a quelli montani e pedemontani, ed influisce principalmente per periodi $< 10^{-1}$ s (frequenze > 10 Hz). Il secondo, è invece attribuibile agli effetti di amplificazione locale nei livelli sedimentari superficiali che caratterizzano le aree della pianura per periodi tra 10^{-1} e 1 s (frequenze tra 1 e 10 Hz).

Si osserva anche un comportamento particolarmente anomalo per la componente N della stazione SMV04 che mostra una curva molto diversa da quella mostrata dalla componente E alla stessa stazione e livelli di rumore più bassi anche di MTRZ (non realistici), per questo motivo si sceglie di utilizzare solo la componente E per il calcolo delle mappe di detezone.

Le mappe di detezone teorica della rete integrata sono mostrate in Figura 2.3 a) e b) per le onde P e S, rispettivamente. Si osserva come nell'intera area del DI la magnitudo minima teorica degli eventi che si possono rilevare e localizzare corrisponde a $1.8 \leq M_w \leq 1.9$, mentre per il DE questa soglia si alza a $1.9 \leq M_w \leq 2.0$. Per quanto riguarda invece la magnitudo minima per le onde S le soglie si abbassano a $1.4 \leq M_w \leq 1.5$ nel DI e $1.5 \leq M_w \leq 1.6$ nel DE (Figura 2.3b). Questo effetto non si osserva per la mappa di detezone della fase P, dove sembra anzi che le stazioni più esterne influiscano ben poco alla capacità di detezone della rete proprio perché troppo distanti.

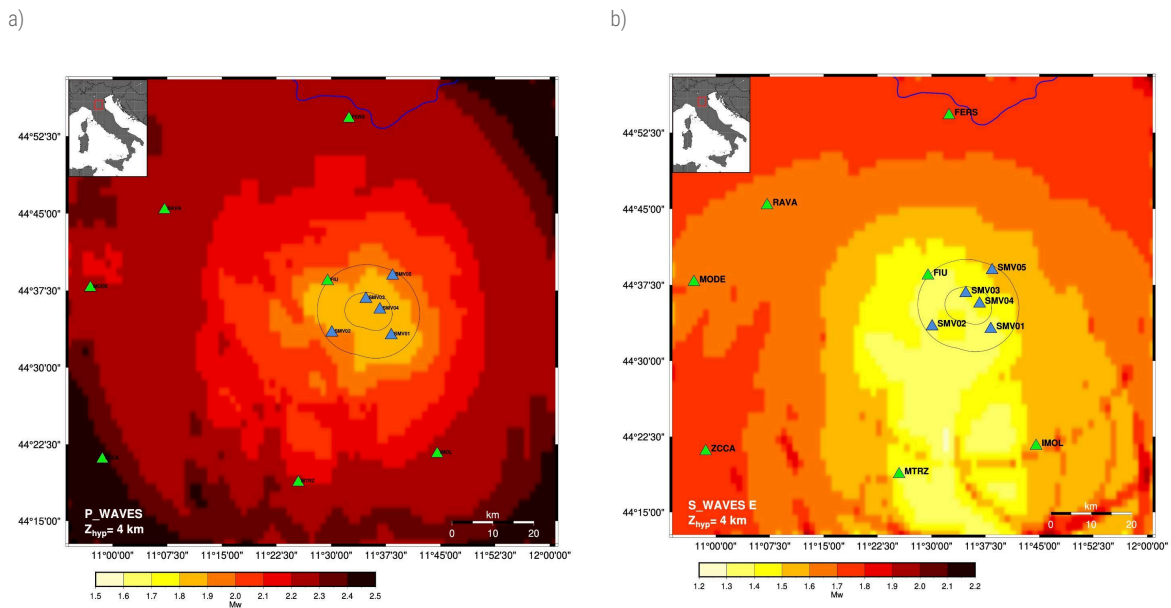


Figura 2.3. Mappa della capacità di detezone della rete integrata M2 e IV. a) Soglie di magnitudo minima rilevabile nell'area rispetto alla fase P, calcolate considerando i livelli di rumore registrati sulla componente verticale Z. b) Soglie di magnitudo minima rilevabile rispetto alla fase S, calcolate considerando i livelli di rumore registrati sulla componente orizzontale E delle stazioni.

Per verificare questa ipotesi mostriamo le mappe ottenute seguendo lo stesso procedimento ma per la sola rete IV e per la sola rete M2 con l'aggiunta della stazione FIU nelle Figure 2.4 a) e b),

rispettivamente, riguardo la capacità di detezione della fase P. Nella mappa del pannello a) relativa alla detezione della sola rete nazionale IV vediamo che le minime magnitudo rilevabili nel DI (e nel DE) si attestano nell'intervallo $2.3 \leq M_w \leq 2.4$, mentre nel pannello b) per la rete M2+FIU le magnitudo minime rilevabili corrispondono a $1.9 \leq M_w \leq 2.0$ quindi solo di un decimo di grado di magnitudo maggiori rispetto alle prestazioni stimate per la rete integrata.

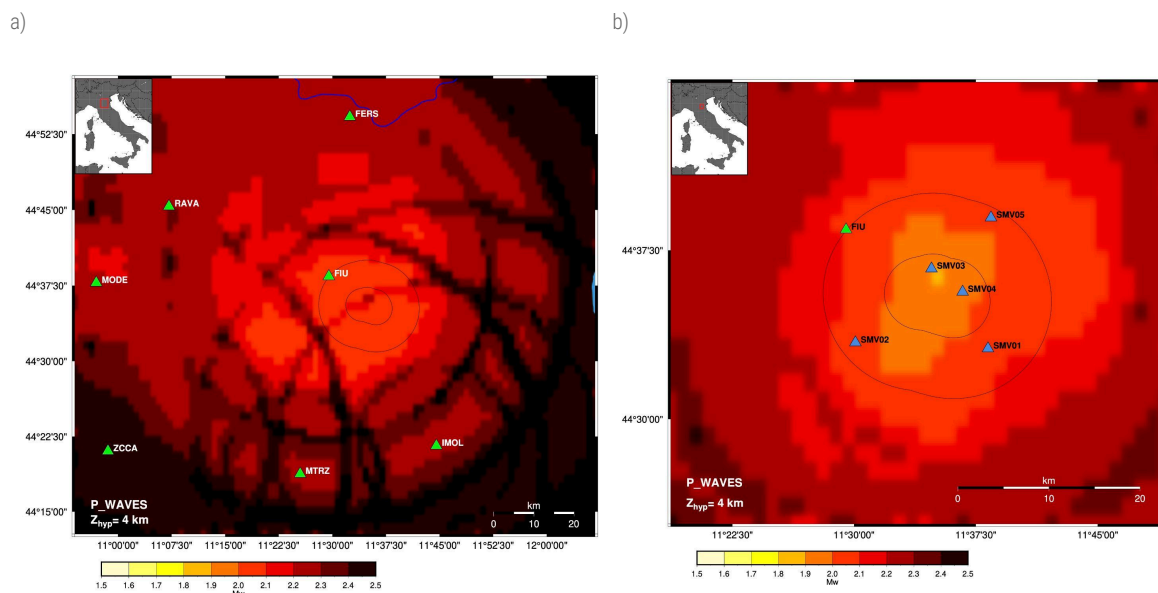


Figura 2.4. Mappa della capacità di detezione della rete IV (a) e della rete M2 (b) prese singolarmente. In entrambe le mappe sono graficate le soglie di magnitudo minima rilevabile nell'area rispetto alla fase P.

La scelta del 90° percentile insieme alla soglia di rapporto segnale/rumore pari a 5 (entrambe alquanto conservative) ci permettono di confrontare questo valore di soglia di detezione, non tanto con la magnitudo minima che è possibile registrare con questa rete, quanto più direttamente con la magnitudo di completezza, ovvero la magnitudo minima al di sopra della quale vi è certezza di rilevare tutti gli eventi.

3 Monitoraggio sismico e analisi dati

3.1 Funzionamento della rete sismica

Nel semestre in oggetto (22 Novembre 2024 - 21 maggio 2025), le stazioni della rete M2 hanno funzionato con una buona continuità, a parte le stazioni SMV01 e SMV05 che presentano interruzioni anche lunghe dovute ad allagamenti che hanno causato l'interruzione del sistema di acquisizione. Questi problemi dovrebbero essere stati risolti con un intervento di manutenzione mirato a un riposizionamento degli acquisitori di entrambe le stazioni (comunicato alla SPM con email del 29 maggio 2025).

Dalla Figura 3.1 si può osservare la continuità di ricezione del dato (bande blu) e i periodi di fermo dell’acquisizione (spazi grigi) alle singole stazioni dall’inizio del monitoraggio.

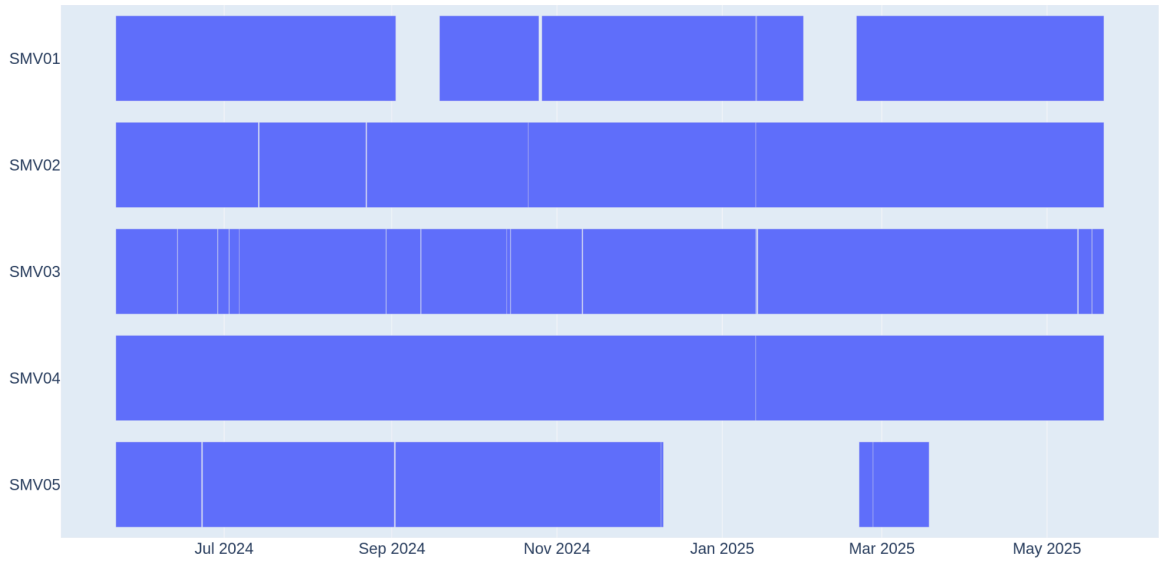


Figura 3.1. Grafico della disponibilità del dato nel primo anno di monitoraggio (22 maggio 2024 - 21 maggio 2025) per ognuna delle cinque stazioni della rete M2 gestita dal concessionario. Le barre blu e grigie corrispondono a dati giornalieri correttamente ricevuti o mancanti, rispettivamente.

La percentuale di dato acquisito nel semestre è riportata in Tabella 3.1: A parte le due stazioni menzionate sopra SMV01 e SMV05, tutte le altre hanno mantenuto un’ottima continuità del dato per tutto il primo anno di monitoraggio.

SMV01	SMV02	SMV03	SMV04	SMV05
89.9%	99.8%	99.4%	100%	75.7%

Tabella 3.1. Percentuali di dato sismico acquisito da ognuna delle cinque stazioni della rete M2 durante il primo anno di monitoraggio (22 maggio 2024 - 21 maggio 2025).

Riportiamo anche le curve di PPSD nel periodo 7 maggio 2025 - 14 giugno 2025, in modo da confrontarle con quelle calcolate per i dati precedenti all’inizio del monitoraggio e mostrate nel primo rapporto semestrale e valutare eventuali variazioni nel loro funzionamento. In Figura 3.2 mostriamo solamente quelle che hanno evidenziato qualche anomalia di funzionamento. Nella prima riga, le PPSD del sensore accelerometrico co-locato con il velocimetro SMV03, tutte e tre le componenti (E, N e Z da sinistra a destra rispettivamente) mostrano delle probabilità spettrali molto appiattite, in particolare la componente Z. Nella seconda riga invece riportiamo le PPSD per il velocimetro SMV04, per il quale si osserva una chiara differenza tra le curve ottenute per la componente N (al centro) e le altre due componenti, come osservato anche in Figura 2.2 per un diverso intervallo di tempo. Anche in questo caso le curve di probabilità spettrale sono assottigliate e quasi piatte, non mostrando la tipica multimodalità associata alle variazioni del

rumore sismico a periodi inferiori ad 1 s (frequenze > 1 Hz), dove il moto del suolo in pianura padana è dominato dalle amplificazioni dovute allo strato di sedimenti e alle sorgenti di origine antropica. Queste caratteristiche delle PPSP di solito corrispondono al rumore elettronico dello strumento, e non ad un segnale corrispondente all'effettivo moto del suolo correttamente registrato.

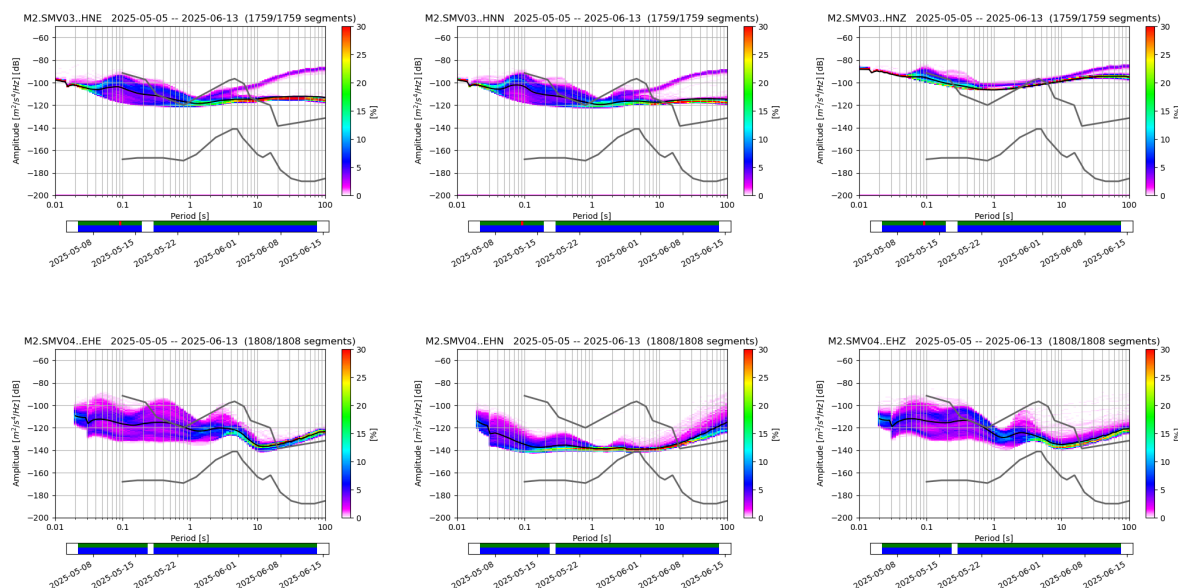


Figura 3.2. PPSP calcolate per le due stazioni SMV03 (sensore accelerometrico, in alto) e SMV04 (velocimetro, in basso) nel periodo 7/05-14/06/2025, per le componenti E, N e Z rispettivamente da sinistra a destra. Le linee nere indicano l'andamento dei valori minimo NLNM e massimo NHNM definiti da Peterson (1993) come riferimento.

3.2 Analisi della sismicità nei domini di monitoraggio

Nel secondo semestre di monitoraggio non sono stati rilevati eventi sismici localizzati all'interno dei domini di monitoraggio

4 Monitoraggio geodetico e analisi dei dati

4.1 Descrizione rete GNSS

Il capitolo 6 degli ILG descrive la modalità di monitoraggio delle deformazioni del suolo della "porzione superficiale dei domini di rilevazione (interno ed esteso)" tramite prevalentemente misure GNSS e InSAR. Per il primo tipo di misure viene raccomandata la presenza di "una rete GPS 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".

La Figura 4.1 mostra la posizione delle stazioni GNSS disponibili che si trovano nell’area di monitoraggio, appartenenti sia a reti pubbliche (RING, ASI e EUREF) sia private (Netgeo e Assogeo) e tra le quali solo una è di pertinenza della concessionaria POVALLEY, le cui caratteristiche tecniche sono riportate in Tabella 4.1:

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

In Figura 4.1 sono mostrate le stazioni più vicine ai domini di monitoraggio, ma ai fini di un inquadramento ottimale delle deformazioni del suolo in atto nell’area, sono state prese in considerazione dalla SPM anche tutte le stazioni GNSS presenti nel raggio di 30-40 km dal centro dei domini, i cui risultati sono descritti nei paragrafi 4.3 e 4.4. A questo scopo, tutti dati provenienti dalle stazioni disponibili nell’area di monitoraggio in formato RINEX (*Receiver INdependent EXchange*) sono stati utilizzati ed elaborati, tranne quelli della stazione MINE che appartiene alla società STOGIT ed è legata ad attività inerenti lo stoccaggio di idrocarburi nella concessione adiacente.

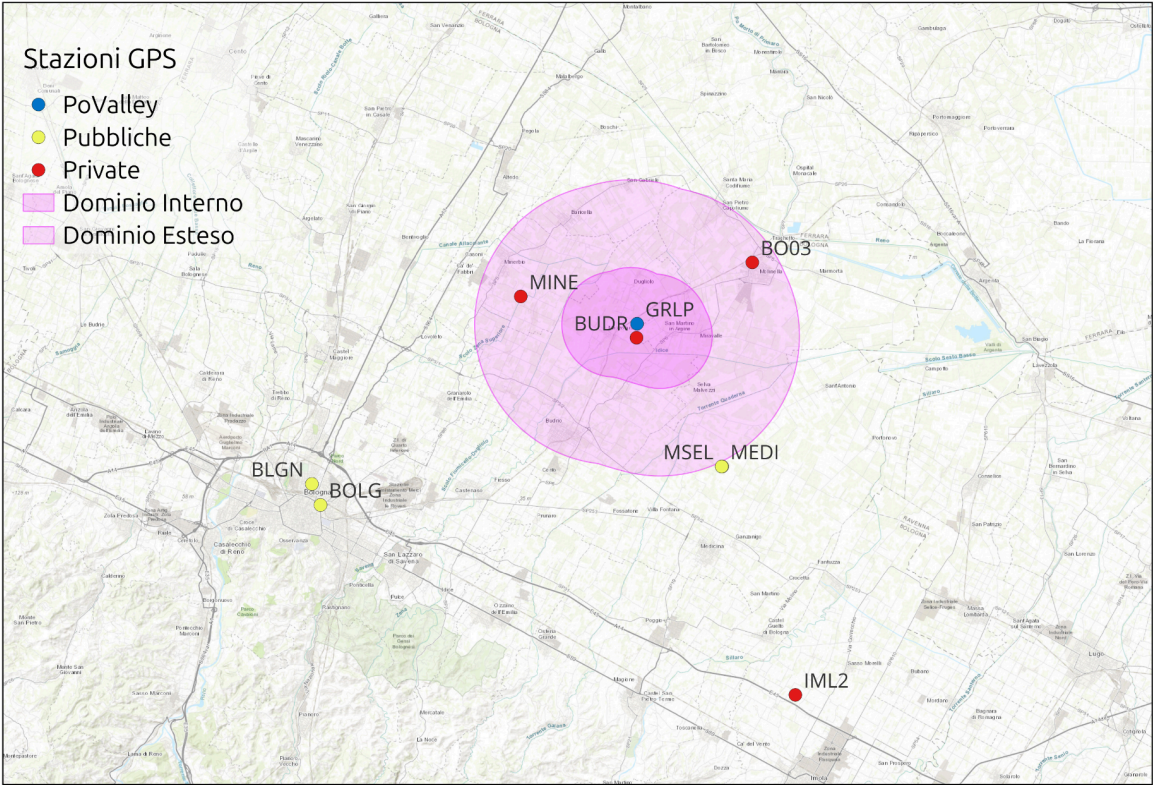


Figura 4.1. Mappa dei domini di monitoraggio (ombreggiati in rosa) per la concessione Selva Malvezzi e della posizione delle stazioni geodetiche GNSS disponibili appartenenti a diverse reti pubbliche (giallo), private (rosso) e di proprietà della concessionaria (blu).

4.2 Analisi di qualità dei dati

In questo paragrafo mostriamo un aggiornamento dello stato dei parametri di qualità (come già illustrato nella relazione di monitoraggio n. 1) per le acquisizioni della stazione GRLP aggiornate fino al 27.03.2025, in termini di:

1. percentuale dei RINEX giornalieri disponibili per ciascun mese di acquisizione, mostrata in Figura 4.2;
2. valori medi giornalieri di multipath, MP1 e MP2, (ossia l'interferenza tra segnali satellitari diretti e riflessi) registrato per ciascuna portante del segnale satellitare (L1 e L2), calcolato come la radice quadratica media, RMS, del multipath su ciascuna portante, mostrato in Figura 4.3;
3. percentuale di osservazioni satellitari (o epoche) presenti nei RINEX rispetto alle osservazioni attese nello stesso intervallo di tempo giornaliero di acquisizione della stazione, mostrato in Figura 4.3.

Per quanto riguarda il primo punto la stazione mostra una buona continuità del dato, avendo acquisito in media per tutto il periodo di funzionamento il 92% dei file RINEX attesi, mostrando solo poche interruzioni nel 2024 a causa di problemi legati alla connettività.

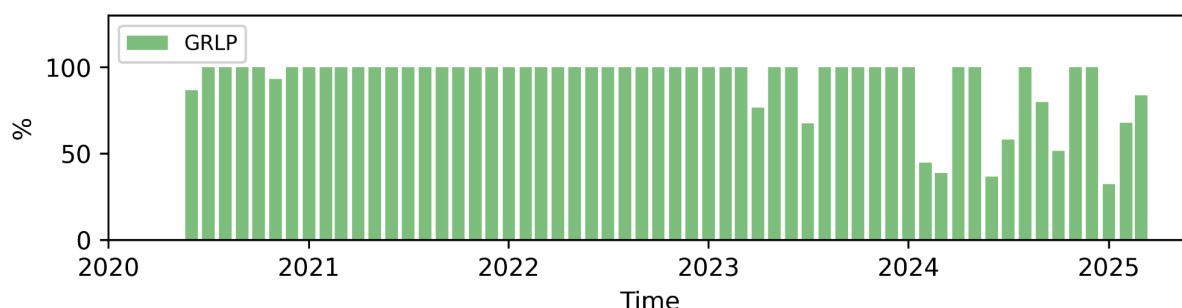


Figura 4.2: Percentuale di RINEX giornalieri disponibili per ciascun mese di acquisizione della stazione GRLP

In merito agli altri due parametri, dai valori riportati in Figura 4.3 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.

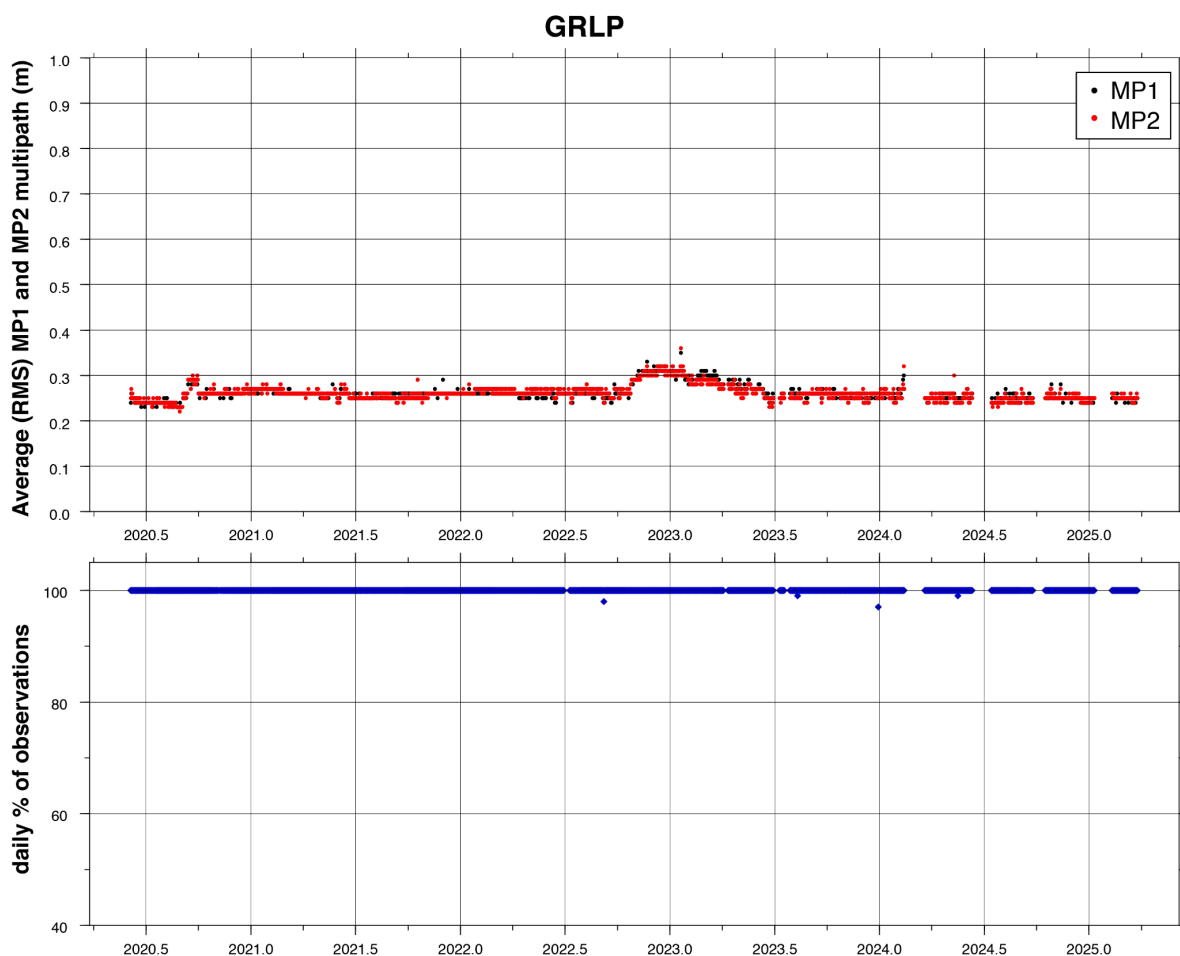


Figura 4.3: Analisi di qualità per ciascuna misura gionaliere della stazione GRLP in termini di multipath MP1 in nero e MP2 in rosso (sopra), e di percentuale di osservazioni presenti nei RINEX giornalieri rispetto alle osservazioni attese nell'intervallo di tempo gionaliere di funzionamento effettivo (sotto).

4.3 Elaborazione del dato

I dati giornalieri in formato RINEX delle stazioni GNSS disponibili per l'area di monitoraggio sono stati elaborati dal centro di analisi INGV presso la sezione di Bologna all'interno di una soluzione geodetica molto ampia a scala euro-Mediterranea, come illustrato in Serpelloni et al. (2022). La procedura di elaborazione eseguita consiste in:

1. Analisi delle osservazioni registrate (ossia le fasi GPS dei segnali satellitari) dalle stazioni di una sotto-rete che include la stazione GRLP di Selva Malvezzi, più altre stazioni permanenti della rete IGS (International GNSS Service), e realizzazione di una soluzione di rete debolmente vincolata (posizioni, orbite, ecc...), utilizzando il pacchetto GAMIT del software per analisi dati GPS GAMIT/GLOBK (<http://geoweb.mit.edu/gg>, versione 10.71).
2. Combinazione delle soluzioni giornaliere ottenute per tutte le sotto-reti processate dalla SPM e allineamento delle soluzioni al sistema di riferimento globale IGB14 (Reischung et al., 2020), utilizzando il pacchetto GLOBK del software GAMIT/GLOBK.

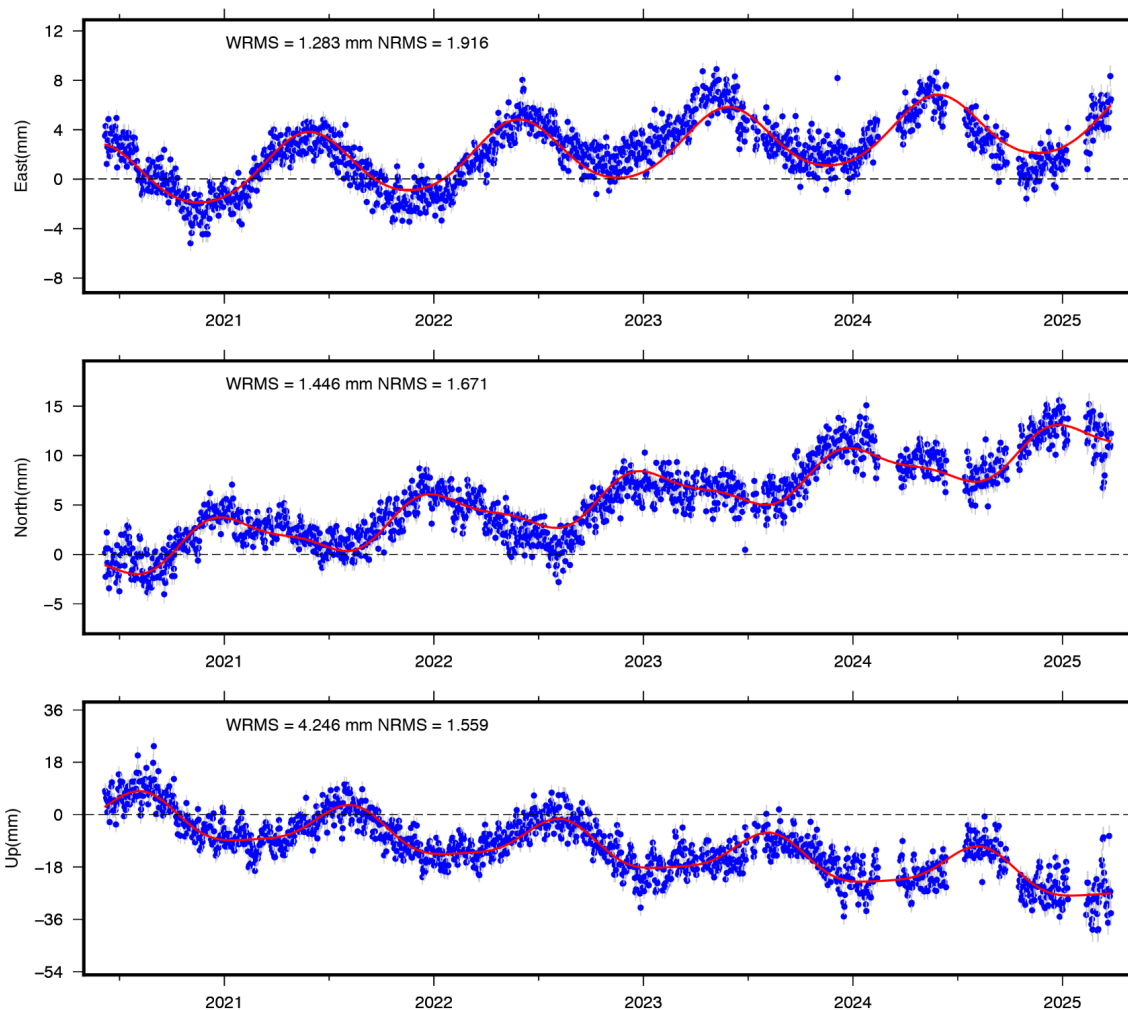
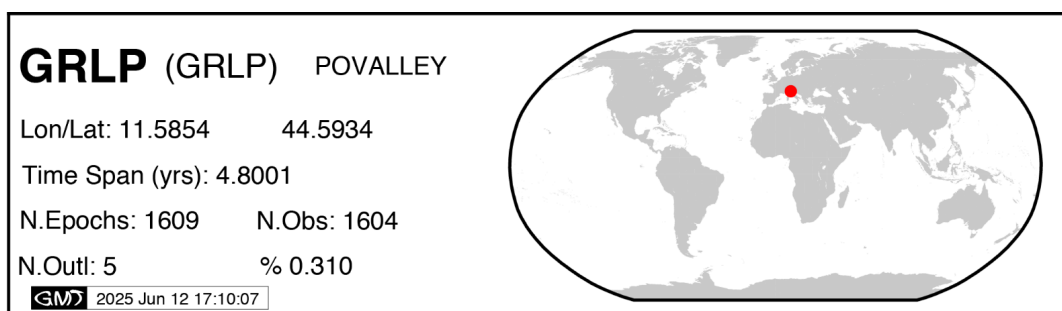


Figura 4.4. Serie temporale di spostamento (punti blu) della stazione GRLP nel sistema di riferimento Eurasia-fisso per le componenti Est e Nord e in IGB14 per la componente verticale. Le linee grigie indicano le barre d'errore (1σ) per gli spostamenti e la linea rossa rappresenta il modello analitico atteso.

Da quest'ultimo passaggio si ottengono per ciascuna stazione GNSS le serie temporali di spostamento (nelle tre componenti Est, Nord e verticale) realizzate nel sistema di riferimento globale IGB14. Ciascuna serie così ottenuta viene poi modellata con un modello funzionale analitico "classico" (Bevis & Brown, 2014) che considera gli spostamenti del suolo come la combinazione di: 1- un contributo lineare nel tempo (ossia la velocità di spostamento), 2- componenti stagionali annuali e semi-annuali e 3- possibili salti di posizione dovuti a cambi strumentali ed eventuali salti di natura co-sismica.

Le serie temporali riferite rispetto al sistema di riferimento globale IGB14 non ci permettono però di apprezzare le deformazioni a scala locale. Per evidenziare meglio i gradienti di velocità dell'ordine del mm/anno o inferiori, che sono tipici sia della tettonica attiva presente nell'area sia delle deformazioni locali di tipo naturale o antropico, risulta necessario ruotare e riferire il campo di spostamento rispetto a un sistema di riferimento locale, ossia rispetto ad un blocco tettonico o una placca tettonica vicina assunta come rigida e fissa (plate-fixed). Nel nostro caso le serie temporali orizzontali GPS (quelle verticali rimangono riferite al sistema di riferimento globale IGB14) sono state poste rispetto alla placca Eurasia-fissa, utilizzando come polo di rotazione quello riportato da Altamimi et al. (2017). Per fare ciò vengono rimosse dalle serie di spostamento orizzontali assolute in IGB14 le velocità attese dal polo di rotazione scelto, ottenendo così serie temporali di spostamento residue utili per analizzare il campo di deformazione a scala locale per l'area di studio.

La Figura 4.4 mostra la serie temporale degli spostamenti giornalieri per la stazione GRLP per le componenti Est e Nord nel sistema di riferimento Eurasia fisso e per la componente verticale nel sistema di riferimento IGB14. Ad ogni epoca è associata un'incertezza corrispondente ad una deviazione standard (1σ) e viene riportato anche il modello funzionale atteso sopra descritto (linea rossa). Dal risultato così ottenuto non si osservano particolari anomalie nell'andamento temporale degli spostamenti per questa stazione rispetto al modello funzionale atteso di cui sopra.

4.4 Campo di velocità

Dall'analisi delle serie temporali di spostamento di tutte le stazioni utilizzate nell'area di monitoraggio viene stimato il termine lineare, generando un campo di velocità di spostamento rispetto al sistema di riferimento locale Eurasia-fisso. Le misure così ottenute descrivono la deformazione a lungo termine in atto, che nell'area di studio è prevalentemente di natura tettonica compressiva lungo il fronte pede-appenninico settentrionale di circa 2 mm/anno in direzione circa Nord-Sud (Devoti et al., 2011, Bennett et al., 2012). Pertanto un campo di velocità fornito da stazioni stabili e affidabili dovrebbe mostrare questo andamento comune e coerente tra le stazioni adiacenti. Il risultato di questa analisi è mostrato in Figura 4.5, sia per le componenti orizzontali che verticali, e i valori di velocità sono riportati in Tabella 4.2.

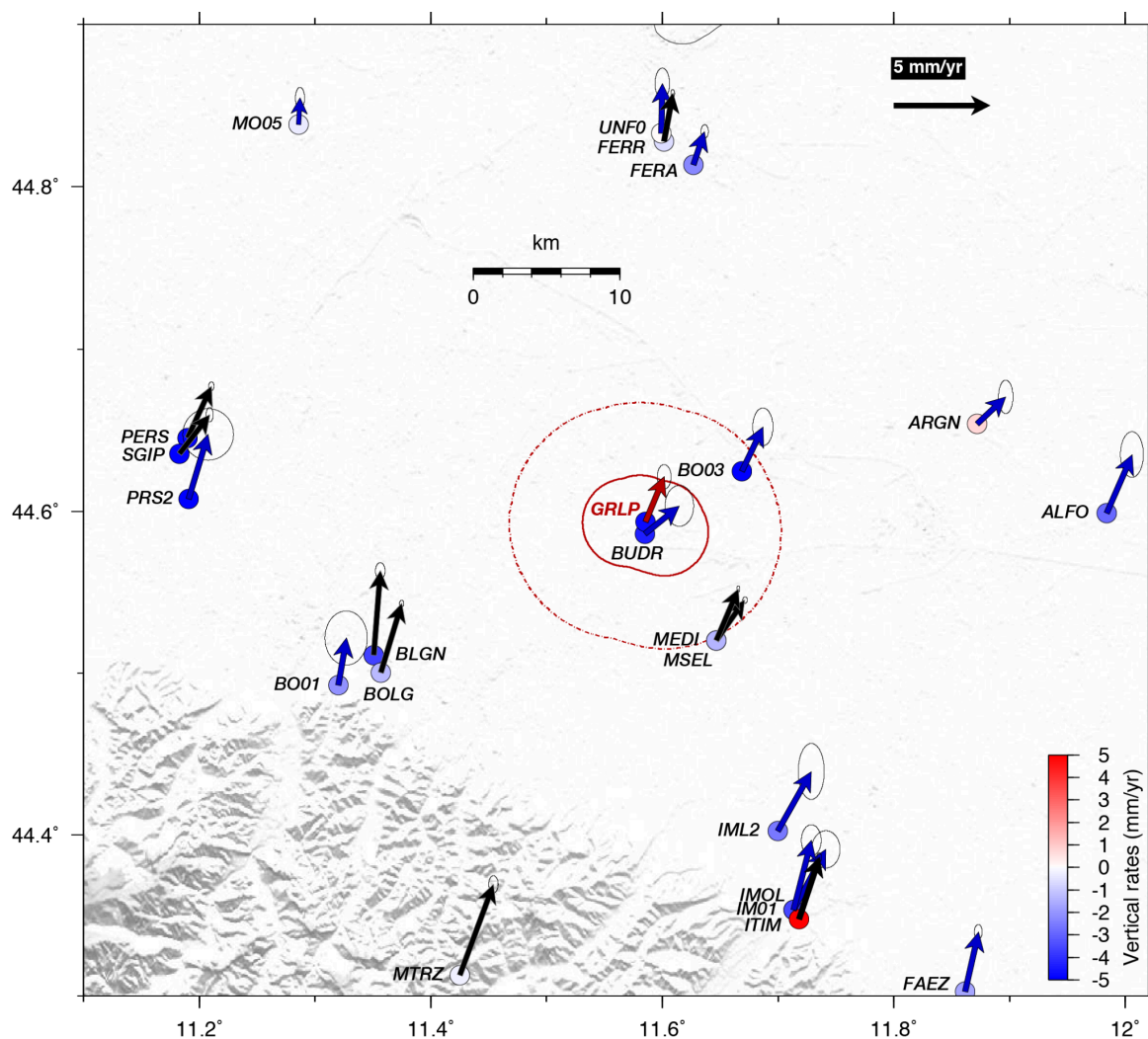


Figura 4.5. Campo di velocità di spostamento ottenuto dall'analisi dei dati GNSS per le componenti orizzontali (freccie nere per le stazioni pubbliche e freccie blu per le stazioni private) nel sistema di riferimento locale Eurasia-fissa (con ellissi di errore al 95%), e le corrispondenti componenti verticali, mostrate dai cerchi colorati secondo la palette in basso a destra. I domini di monitoraggio sono indicati in rosso.

Dal risultato così ottenuto si osserva una generale convergenza in direzione prevalentemente Nord-Sud che va da circa 4-5 mm/anno nell'area del bolognese fino a circa 2-3 mm/anno nella zona di Ferrara, descrivendo la compressione attiva lungo il fronte appenninico. All'interno di questo contesto la velocità di GRLP si inserisce in ottimo accordo, dimostrando la buona affidabilità della stazione.

Per quanto riguarda le velocità verticali, i dati mostrano un generale abbassamento in media di 3-4 mm/anno che caratterizza tutta la zona della pianura padana, a parte pochi casi isolati. Questi valori di subsidenza possono essere ascritti a diversi fenomeni in atto, come l'emungimento di acqua dal sottosuolo, la compattazione dei sedimenti, la tettonica regionale, senza considerare possibili effetti di sito e/o di attività di coltivazione di idrocarburi. Anche in

questo caso la velocità verticale di GRLP mostra valori molto simili alle stazioni adiacenti, dimostrandosi un sito stabile e affidabile ai fini del monitoraggio.

Longitude	Latitude	V_est (mm/a)	V_nord (mm/a)	sig_v_est (mm/a)	sig_v_nord (mm/a)	V_vert (mm/a)	sig_v_vert (mm/a)	ID_stazione
11.9836	44.5990	1.323	3.029	0.243	0.484	-2.925	2.636	ALFO_GPS
11.8719	44.6540	1.484	1.398	0.154	0.355	0.758	1.470	ARGN_GPS
11.3506	44.5110	0.345	4.377	0.102	0.173	-3.682	0.546	BLGN_GPS
11.3199	44.4926	0.420	2.440	0.449	0.574	-2.147	2.342	BO01_GPS
11.6686	44.6249	1.094	2.287	0.214	0.400	-5.978	1.611	BO03_GPS
11.3568	44.5002	1.083	3.589	0.046	0.072	-1.374	0.344	BOLG_GPS
11.5850	44.5862	1.784	1.442	0.303	0.433	-4.330	1.731	BUDR_GPS
11.8613	44.3028	0.697	3.086	0.082	0.157	-1.742	0.805	FAEZ_GPS
11.6270	44.8136	0.577	1.726	0.078	0.142	-2.305	0.688	FERA_GPS
11.6013	44.8279	0.461	2.488	0.040	0.086	-0.673	0.420	FERR_GPS
11.5854	44.5934	0.972	2.343	0.146	0.259	-4.755	1.207	GRLP_GPS
11.7135	44.3535	1.665	3.131	0.301	0.395	-2.536	2.117	IM01_GPS
11.6997	44.4024	1.737	3.079	0.275	0.594	-2.632	2.669	IML2_GPS
11.7133	44.3534	0.922	3.604	0.210	0.330	-3.624	1.793	IMOL_GPS
11.7179	44.3475	1.057	3.203	0.050	0.100	5.190	0.564	ITIM_GPS
11.6468	44.5200	1.477	2.111	0.050	0.070	-1.877	0.272	MEDI_GPS
11.2858	44.8383	0.074	1.371	0.098	0.228	-0.343	0.780	MO05_GPS
11.6465	44.5200	1.147	2.683	0.033	0.065	-1.475	0.346	MSEL_GPS
11.4250	44.3128	1.747	4.721	0.100	0.181	-0.219	0.444	MTRZ_GPS
11.1898	44.6453	1.240	2.681	0.057	0.093	-4.847	0.481	PERS_GPS
11.1910	44.6077	1.002	3.343	0.537	0.545	-10.892	2.917	PRS2_GPS
11.1827	44.6355	1.579	2.029	0.076	0.154	-5.435	0.377	SGIP_GPS
11.5990	44.8330	0.058	2.569	0.153	0.329	0.015	1.706	UNF0_GPS

Tabella 4.2: Valori delle velocità di spostamento GPS nelle 3 componenti (con gli errori associati) per le stazioni analizzate

4.5 Dati InSAR

Nel secondo semestre, nell'ambito del monitoraggio delle deformazioni del suolo tramite tecniche di interferometria satellitare applicate a dati SAR (Synthetic Aperture Radar), il concessionario ha fornito un aggiornamento delle serie storiche di deformazioni e relative mappe di velocità di spostamento del suolo utilizzando i dati della costellazione COSMO-SkyMed. I dati consegnati coprono spazialmente un'area poco più estesa dell'area che copre il DI e parzialmente il DE. La copertura temporale si estende da novembre 2008 a marzo 2025.

Contestualmente ai risultati dell'analisi è stata anche consegnata una relazione tecnica esplicativa redatta da Nhazca s.r.l., che ha svolto l'analisi. In tale report tecnico si descrive come i due stack di immagini in geometria orbitale ascendente e discendente già analizzati nell'analisi storica siano stati integrati con 39 immagini SAR (19 in geometria ascendente e 20 in discendente), acquisite da aprile 2024 ad aprile 2025.

Nelle Figure 4.6 e 4.7 sono riportate le velocità di spostamento del suolo (dato COSMO-SkyMed) rispettivamente lungo la linea di vista (Line of Sight - LoS) relativa alle orbite ascendente e discendente. Nelle Figure 4.8 e 4.9 sono riportate le componenti verticale e est-ovest dello spostamento.

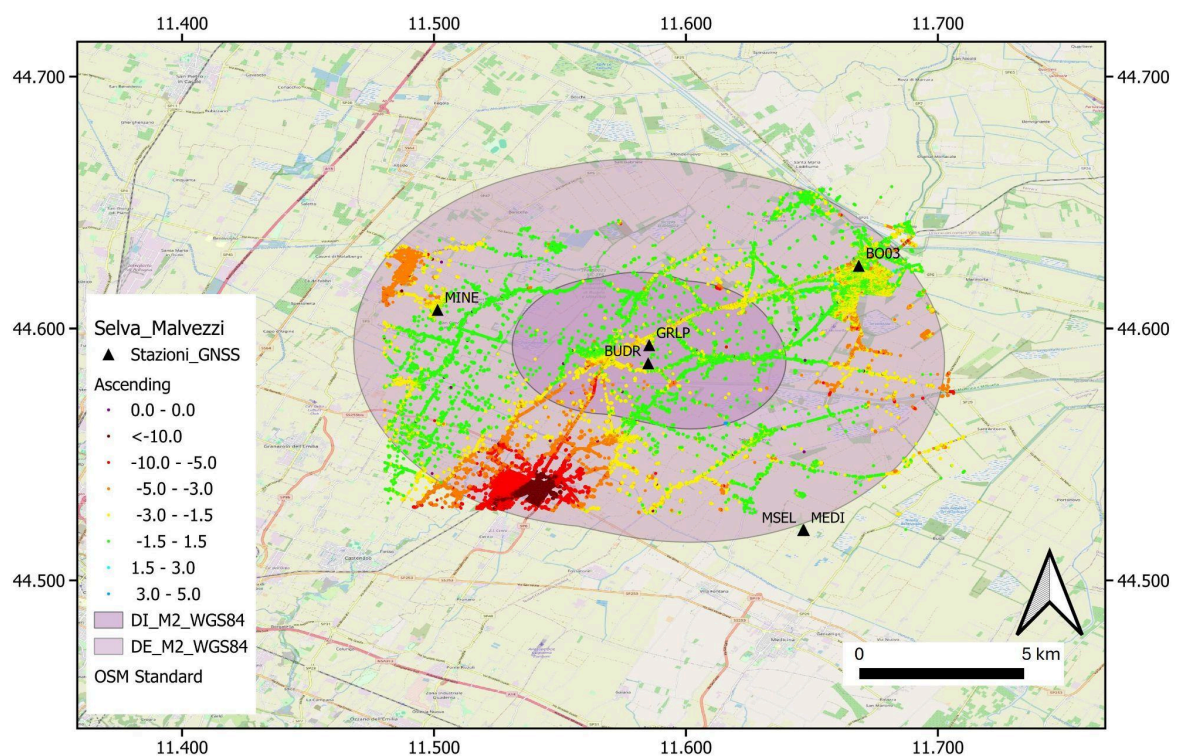


Figura 4.6. Mappa della velocità media (mm/anno) di spostamento del suolo dal novembre 2008 a marzo 2025 lungo la linea di vista del satellite (orbita ascendente) calcolata dai dati SAR acquisiti dai satelliti della costellazione COSMO-SkyMed. Valori negativi indicano allontanamento dal satellite, viceversa per valori positivi. Nella mappa sono riportati anche i domini di rilevazione interno ed esteso (DI e DE) per la concessione Selva Malvezzi e la posizione delle stazioni geodetiche GNSS presenti nell'area (triangoli neri).

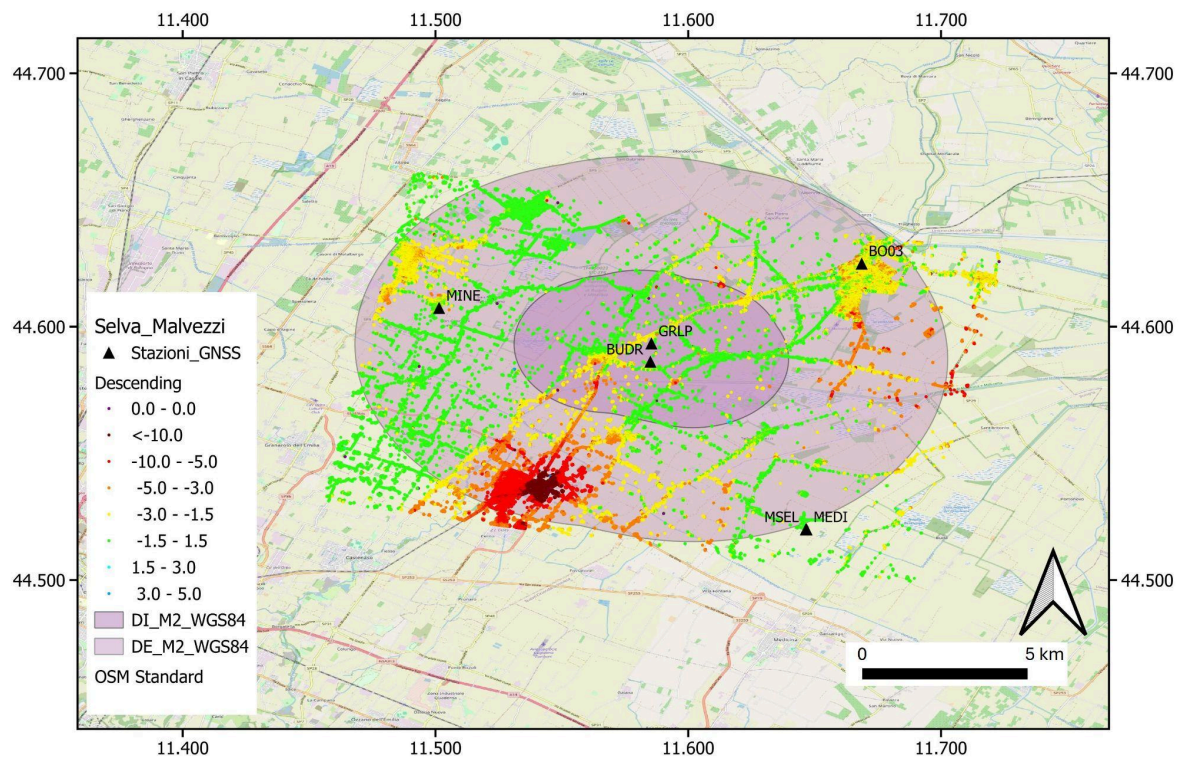


Figura 4.7. Mappa della velocità media di spostamento (mm/anno) del suolo dal novembre 2008 a marzo 2025 lungo la linea di vista del satellite (orbita discendente) calcolata dai dati SAR acquisiti dai satelliti della costellazione COSMO-SkyMed. Valori negativi indicano allontanamento dal satellite, viceversa per valori positivi. Nella mappa sono riportati anche i domini di rilevazione interno ed esteso (DI e DE) per la concessione Selva Malvezzi e la posizione delle stazioni geodetiche GNSS presenti nell'area (triangoli neri).

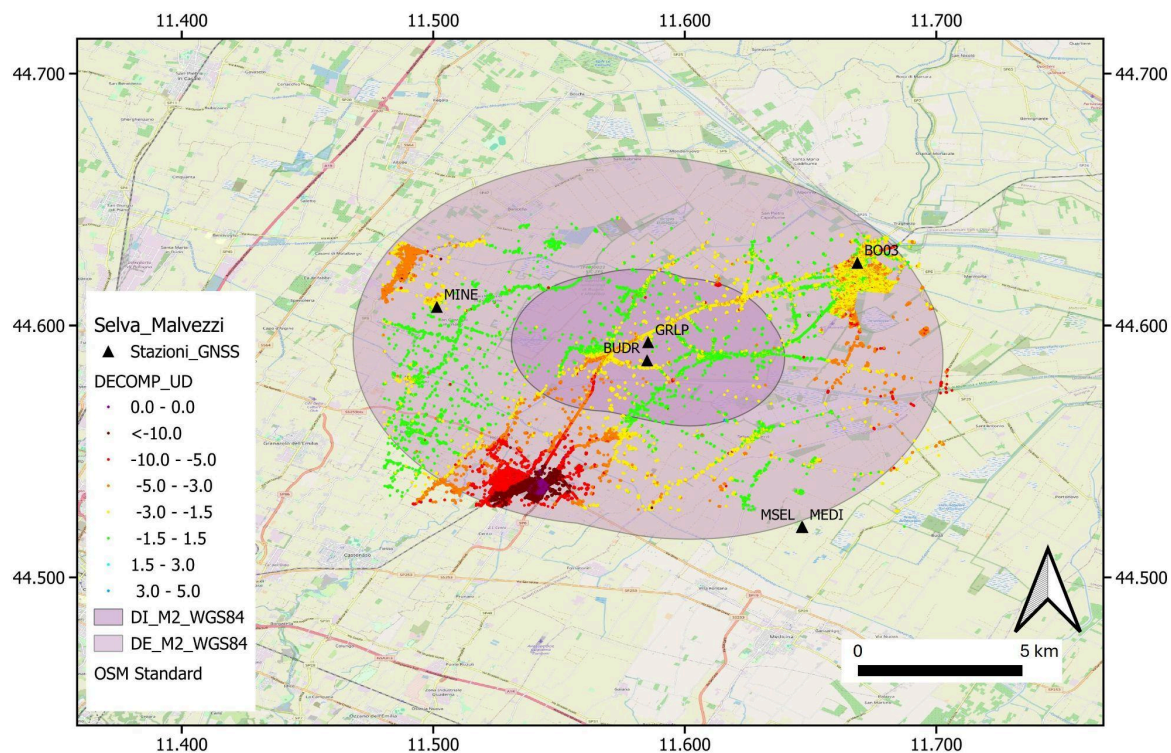


Figura 4.8. Mappa della velocità media di spostamento verticale (mm/anno) del suolo dal novembre 2008 a marzo 2025 calcolata partendo dagli spostamenti misurati lungo le due linee di vista ascendente e discendente dai dati SAR acquisiti dai satelliti della costellazione COSMO-SkyMed. Valori negativi indicano abbassamento del suolo, viceversa per valori positivi. Nella mappa sono riportati anche i domini di rilevazione interno ed esteso (DI e DE) per la concessione Selva Malvezzi e la posizione delle stazioni geodetiche GNSS presenti nell'area (triangoli neri).

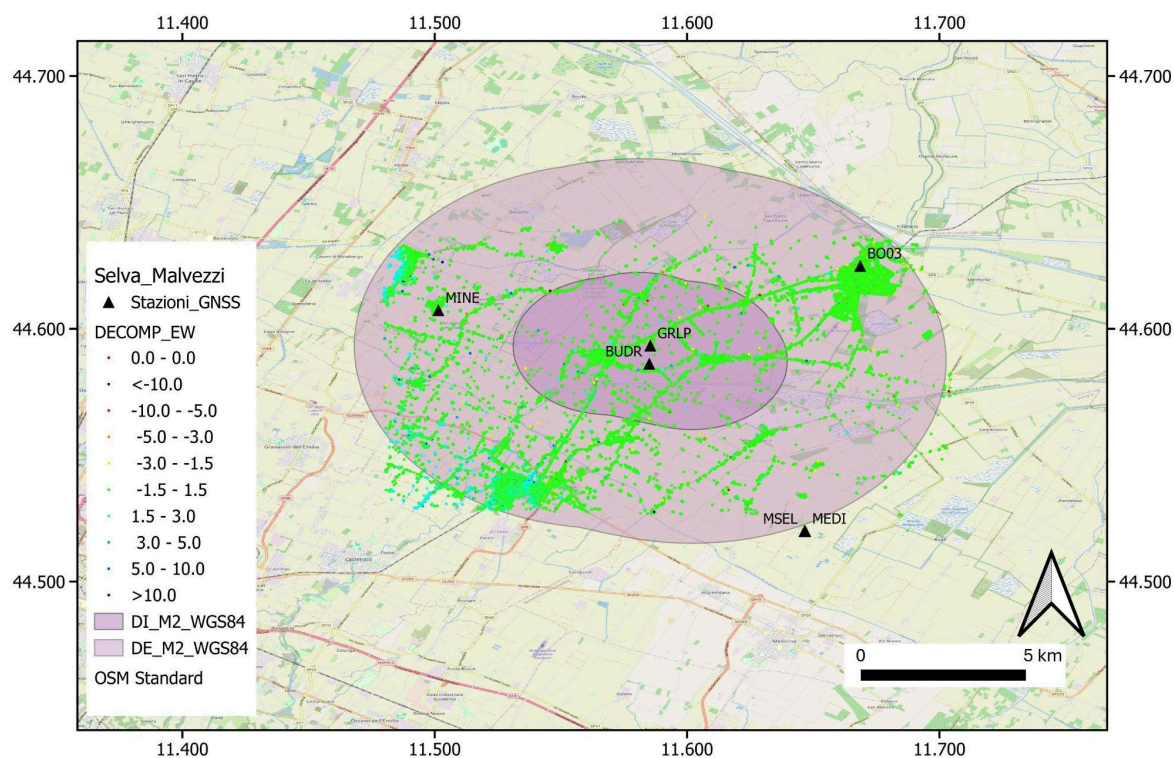


Figura 4.9. Mappa della velocità media di spostamento orizzontale (mm/anno) (componente est-ovest) del suolo dal novembre 2008 a marzo 2025 calcolata partendo dagli spostamenti misurati lungo le due linee di vista ascendente e discendente dai dati SAR acquisiti dai satelliti della costellazione COSMO-SkyMed. Valori negativi indicano spostamenti in direzione ovest, valori positivi indicano spostamenti verso est. Nella mappa sono riportati anche i domini di rilevazione interno ed esteso (DI e DE) per la concessione Selva Malvezzi e la posizione delle stazioni geodetiche GNSS presenti nell'area (triangoli neri).

Nelle Figure 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13 a sono rappresentati alcuni esempi di serie storiche di spostamento del suolo lungo la linea di vista del satellite, ascendente e discendente, calcolate in prossimità delle stazioni GNSS di BUDR e GRLP, quest'ultima orientativamente ubicata al di sopra della culminazione del giacimento. L'andamento degli spostamenti nel tempo evidenzia un generale trend lineare di abbassamento del suolo su cui si sovrappone un trend deformativo stagionale.

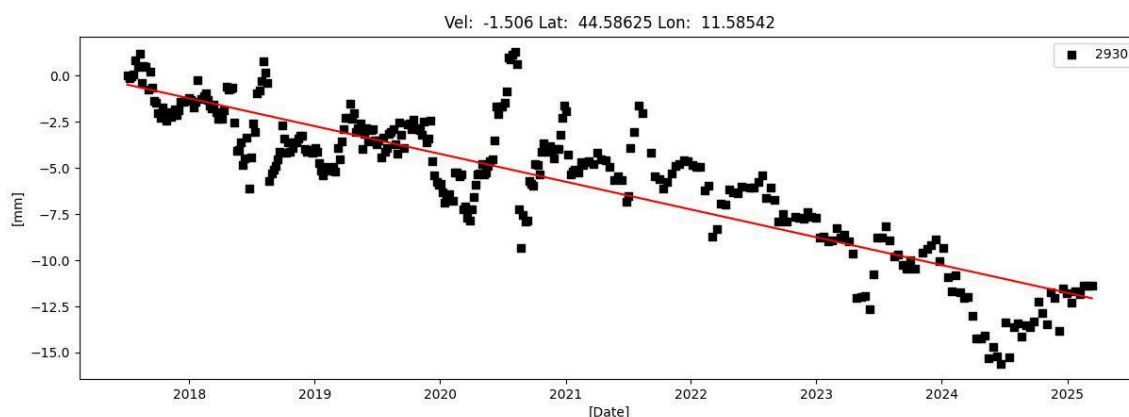


Figura 4.10. Serie storica di spostamento del suolo (mm) in cui sono riportati gli spostamenti del suolo nel tempo lungo la linea di vista ascendente del satellite COSMO-SkyMed, calcolati in prossimità della stazione GNSS BUDR. Valori negativi indicano allontanamento dal satellite, viceversa per valori positivi.

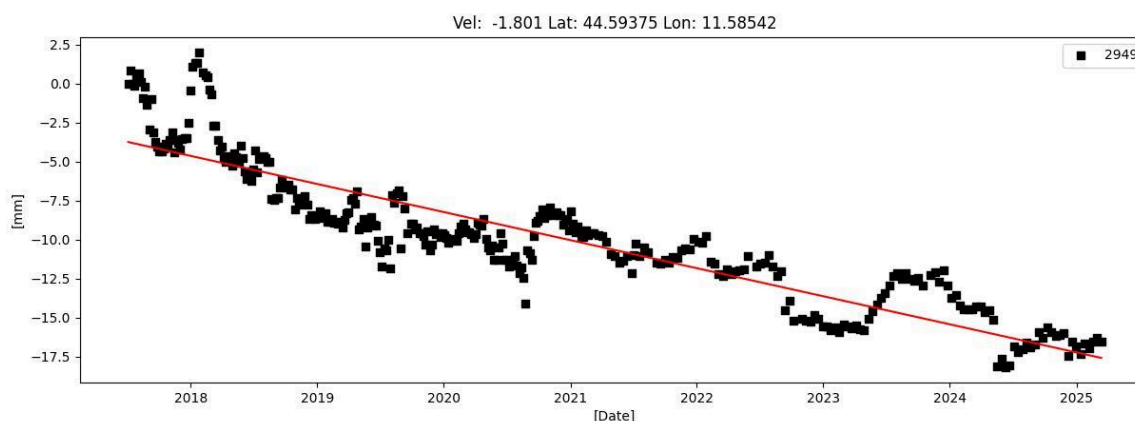


Figura 4.11. Serie storica di spostamento del suolo (mm) in cui sono riportati gli spostamenti del suolo nel tempo lungo la linea di vista ascendente del satellite COSMO-SkyMed, calcolati in prossimità della stazione GNSS GPRL. Valori negativi indicano allontanamento dal satellite, viceversa per valori positivi.

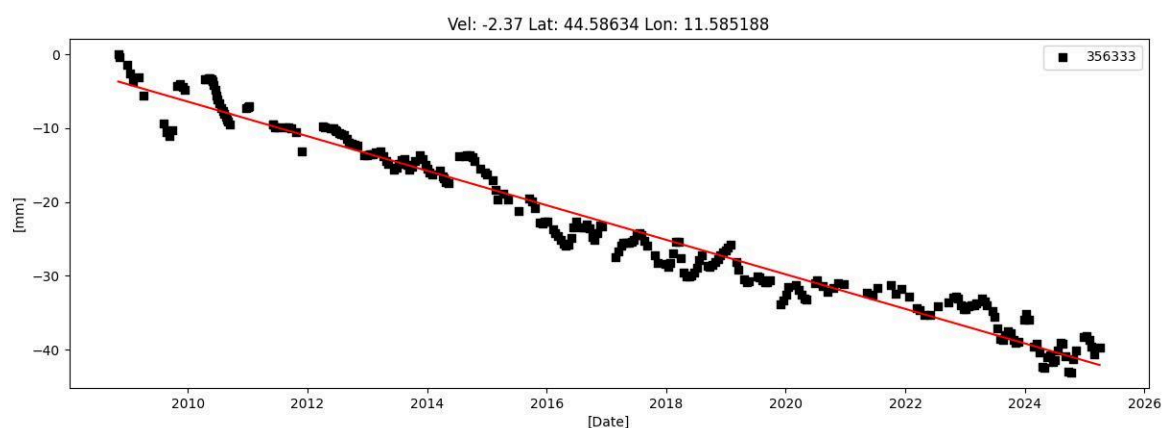


Figura 4.12. Serie storica di spostamento del suolo (mm) in cui sono riportati gli spostamenti del suolo nel tempo lungo la linea di vista discendente del satellite COSMO-SkyMed, calcolati in prossimità della stazione GNSS BUDR. Valori negativi indicano allontanamento dal satellite, viceversa per valori positivi.

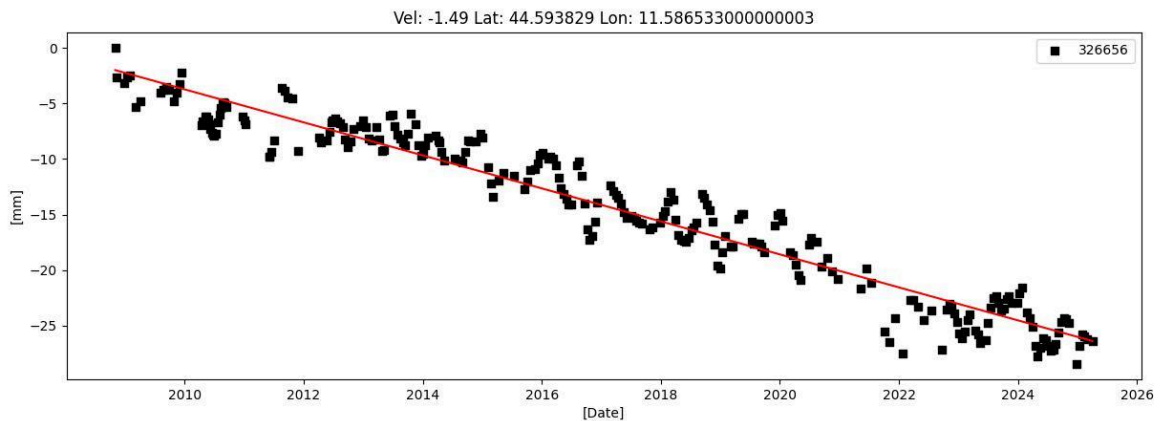


Figura 4.13. Serie storica di spostamento del suolo (mm) in cui sono riportati gli spostamenti del suolo nel tempo lungo la linea di vista discendente del satellite COSMO-SkyMed, calcolati in prossimità della stazione GNSS GRLP. Valori negativi indicano allontanamento dal satellite, viceversa per valori positivi.

Le serie storiche di spostamento nella componente verticale calcolate in prossimità delle stesse stazioni GNSS (Figure 4.14 e 4.15), mostrano trend simili a quelli descritti per gli spostamenti in linea di vista del satellite. Non essendo state misurate deformazioni rilevanti nell'area dei domini nella componente est-ovest, non sono mostrate serie storiche inerenti tale componente dello spostamento.

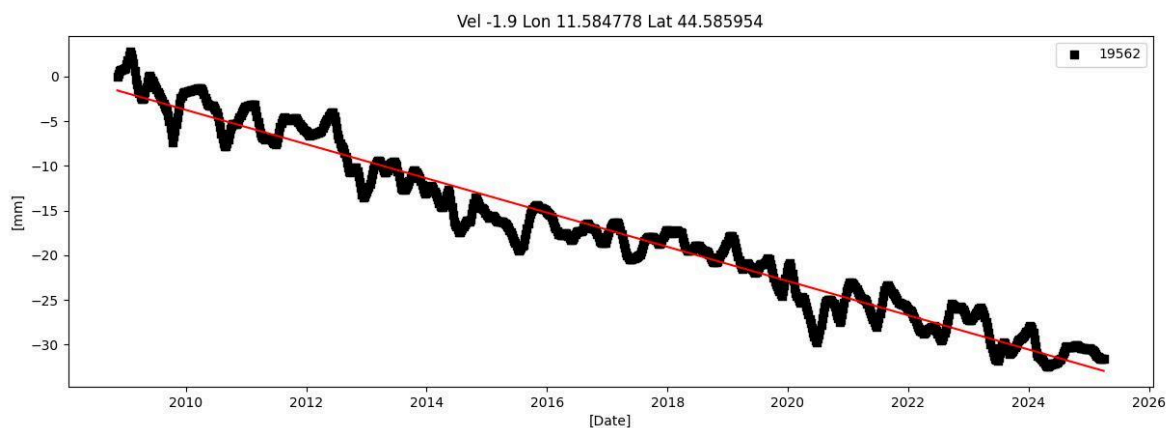


Figura 4.14. Serie storica di spostamento verticale del suolo (mm) in cui sono riportati gli spostamenti del suolo nel tempo (dato COSMO-SkyMed), calcolati in prossimità della stazione GNSS BUDR. Valori negativi indicano abbassamenti del suolo, valori positivi sollevamenti.

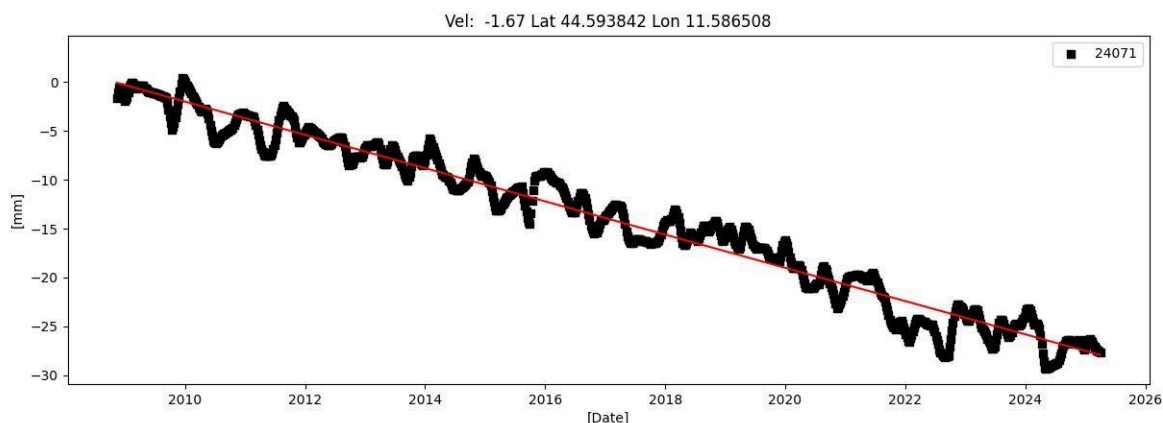


Figura 4.15. Serie storica di spostamento verticale del suolo (mm) in cui sono riportati gli spostamenti del suolo nel tempo (dato COSMO-SkyMed), calcolati in prossimità della stazione GNSS GPRL. Valori negativi indicano abbassamenti del suolo, valori positivi sollevamenti.

Oltre all'analisi effettuata dal concessionario con il dato COSMO-SkyMed, la SPM ha effettuato un'analisi delle deformazioni del suolo utilizzando i dati del sensore Sentinel-1, dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA) con un approccio di tipo SBAS (Small Baseline Subset) (Berardino et al., 2002). A differenza dei satelliti della costellazione COSMO-SkyMed, che montano un sensore in banda X, i satelliti della costellazione Sentinel-1 sono equipaggiati con un sensore in banda C e hanno un tempo di rivedita e una copertura temporale diversa dai satelliti COSMO-SkyMed. Tali differenze in termini di sensore, geometrie e tempi di acquisizione possono comportare differenze nelle misure di deformazione effettuate, pur andando ad individuare e misurare in maniera comparabile i principali andamenti deformativi.

Di seguito si riportano le mappe di velocità medie di spostamento del suolo calcolate nelle due geometrie ascendente e discendente (rispettivamente in Figura 4.16 e 4.17). I due dataset Sentinel-1 coprono un intervallo temporale che va da luglio 2017 a marzo 2025.

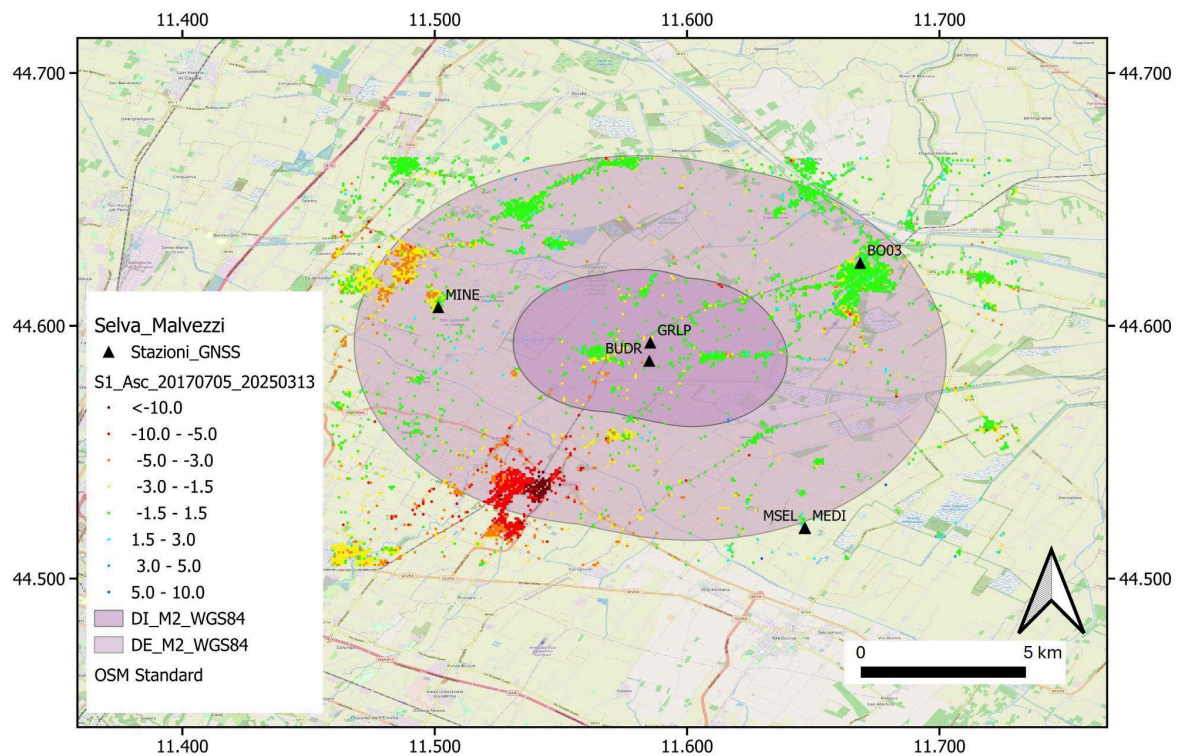


Figura 4.16. Mappa della velocità media di spostamento del suolo (mm/anno) dal luglio 2017 a marzo 2025 lungo la linea di vista del satellite (orbita ascendente) calcolata dai dati SAR acquisiti dai satelliti della costellazione Sentinel-1. Valori negativi indicano allontanamento dal satellite, viceversa per valori positivi. Nella mappa sono riportati anche i domini di rilevazione interno ed esteso (DI e DE) per la concessione Selva Malvezzi e la posizione delle stazioni geodetiche GNSS presenti nell'area (triangoli neri).

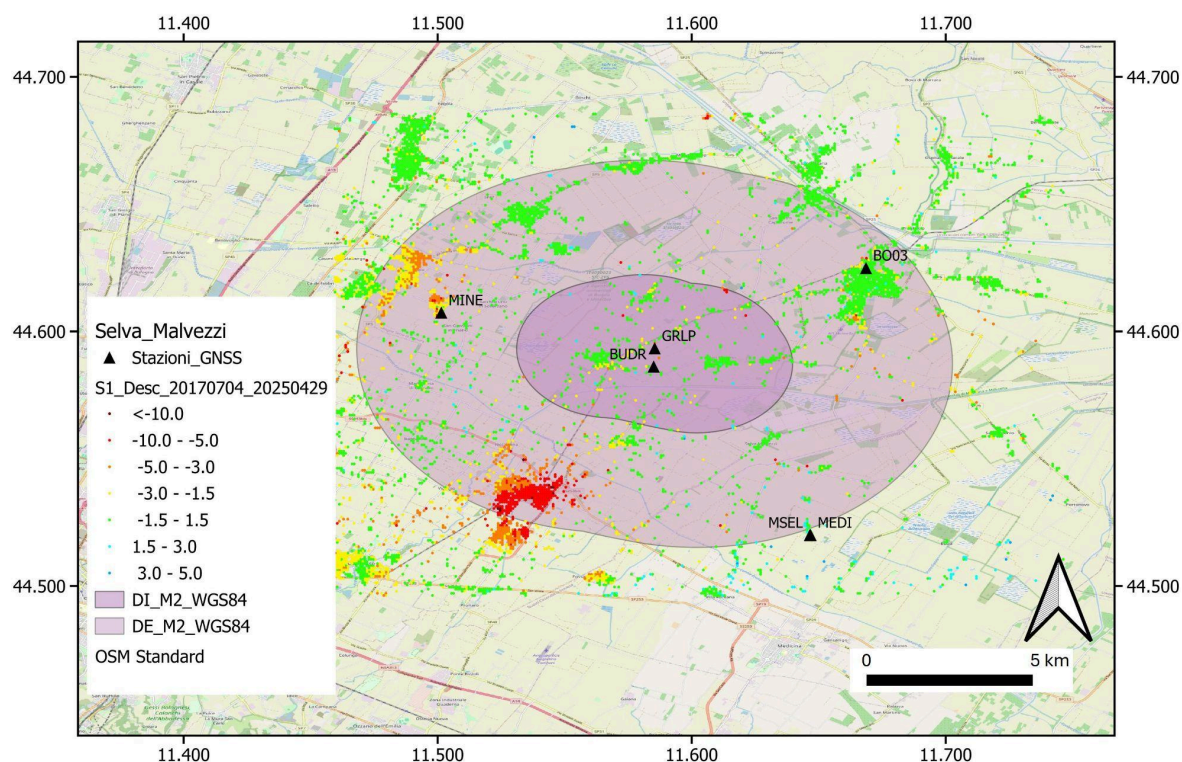


Figura 4.17. Mappa della velocità media di spostamento del suolo (mm/anno) dal novembre 2008 a marzo 2025 lungo la linea di vista del satellite (orbita discendente) calcolata dai dati SAR acquisiti dai satelliti della costellazione Sentinel-1. Valori negativi indicano allontanamento dal satellite, viceversa per valori positivi. Nella mappa sono riportati anche i domini di rilevazione interno ed esteso (DI e DE) per la concessione Selva Malvezzi e la posizione delle stazioni geodetiche GNSS presenti nell'area (triangoli neri).

Si riportano, anche per questo dataset, le serie storiche di spostamento del suolo nelle linee di vista ascendente e discendente calcolate in prossimità delle stazioni GNSS di BUDR e GPRL (rispettivamente in Figura 4.18 e 4.19 e Figura 4.20 e 4.21)

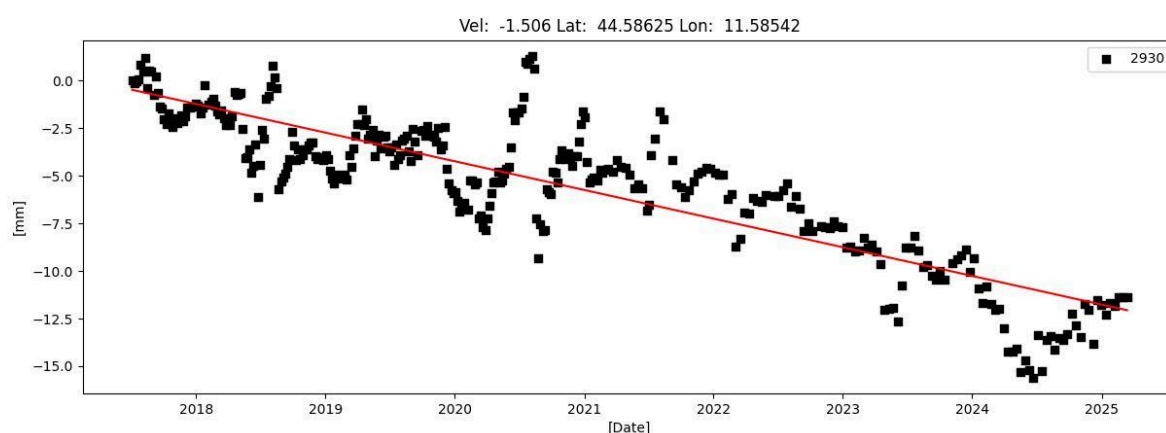


Figura 4.18. Serie storica di spostamento del suolo (mm) in cui sono riportati gli spostamenti del suolo nel tempo lungo la linea di vista ascendente del satellite Sentinel-1, calcolati in prossimità della stazione GNSS BUDR. Valori negativi indicano allontanamento dal satellite, viceversa per valori positivi.

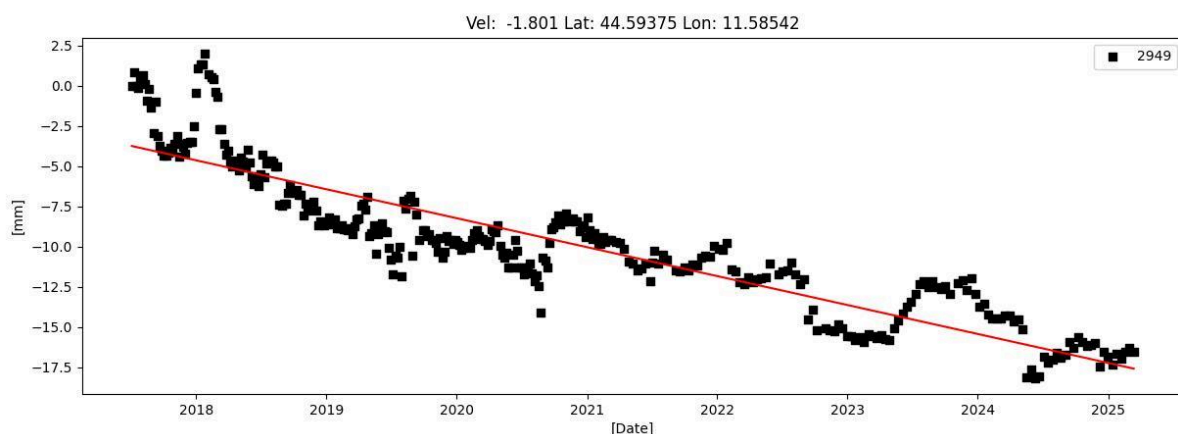


Figura 4.19. Serie storica di spostamento del suolo (mm) in cui sono riportati gli spostamenti del suolo nel tempo lungo la linea di vista ascendente del satellite Sentinel-1, calcolati in prossimità della stazione GNSS GRLP. Valori negativi indicano allontanamento dal satellite, viceversa per valori positivi.

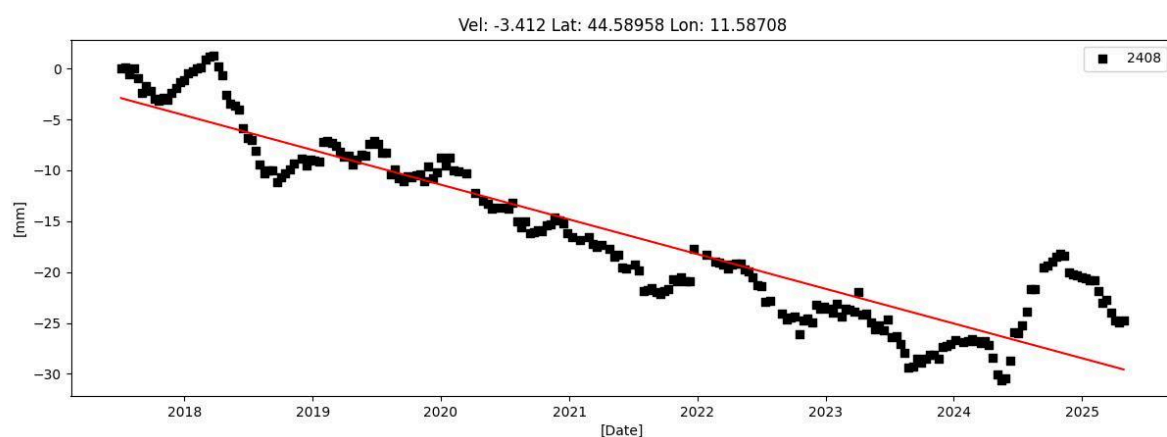


Figura 4.20. Serie storica di spostamento del suolo (mm) in cui sono riportati gli spostamenti del suolo nel tempo lungo la linea di vista discendente del satellite Sentinel-1, calcolati in prossimità della stazione GNSS BUDR. Valori negativi indicano allontanamento dal satellite, viceversa per valori positivi.

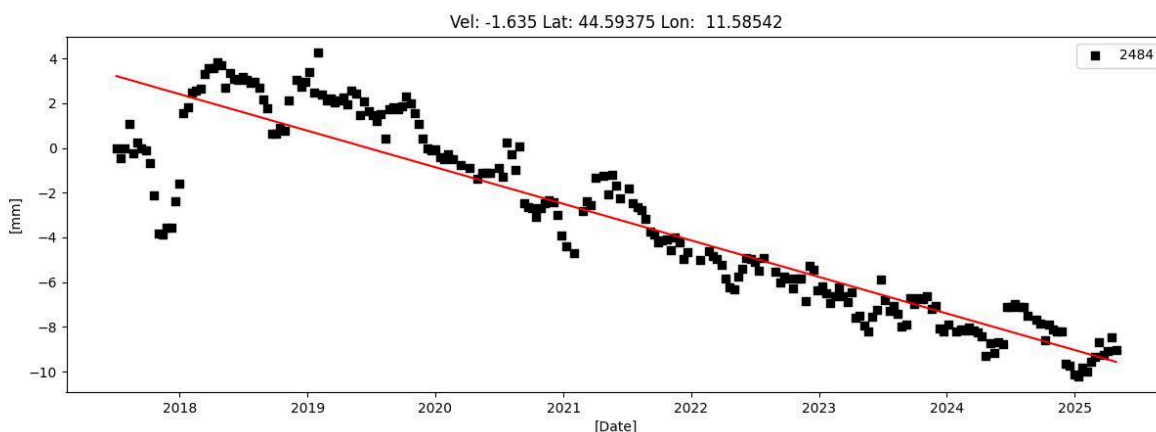


Figura 4.21. Serie storica di spostamento del suolo (mm) in cui sono riportati gli spostamenti del suolo nel tempo lungo la linea di vista discendente del satellite Sentinel-1, calcolati in prossimità della stazione GNSS GRLP. Valori negativi indicano allontanamento dal satellite, viceversa per valori positivi.

I risultati delle analisi effettuati con i dati COSMO-SkyMed e Sentinel-1 sono comparabili evidenziando lo stesso quadro deformativo. Come descritto nella reportistica fornita dal concessionario e come confermato dalle analisi effettuate dalla SPM non si evidenziano variazioni rilevanti delle deformazioni in atto rispetto a quanto riportato nell'analisi storica, confermando spostamenti di compresi tra -1,50 e -3,00 mm/anno lungo le LOS per entrambe le geometrie orbitali nell'area prossima al pozzo PM1d.

Mettendo a confronto questi risultati con le misure GNSS si conferma la generale subsidenza dell'area di monitoraggio, dove piccole differenze in termini di intensità di segnale possono essere dovute al fatto che le misure InSAR sono, per loro natura, relative ad un punto di riferimento locale, mentre le velocità GNSS sono riferite ad un sistema di riferimento globale.

4.6 Cedimento del terreno e livello di falda

Al fine di discriminare i vari processi naturali capaci di generare lo spostamento del suolo, il Concessionario ha fornito dati orari di differenti parametri acquisiti attraverso due assestimetri e due piezometri ubicati nella piazzola di perforazione, in prossimità del pozzo PM1d. Le informazioni trasmesse sono sintetizzate nella Tabella 4.6.

Dato	Strumentazione	Intervallo temporale di riferimento	Profondità dei pozzetti (m sotto il piano campagna)
Delta (mm)	Estensimetro	17/02/2022-16/06/2025	AS: 10 AP: 140
Soggiacenza (m)	Piezometro	18/02/2022-16/06/2025	PS: 9 PP: 140

Tabella 4.6. Misure trasmesse dal Concessionario alla SPM e acquisite tramite due assestimetri e due piezometri ubicati in prossimità del pozzo PM1d. Acronimi: AS, Assestimetro Superficiale; AP, Assestimetro Profondo; PS, Piezometro Superficiale; PP, Piezometro Profondo.

Le variazioni verticali del suolo dovute a compattazione e dilatazione del terreno (delta) e la soggiacenza della falda sono state trasmesse in modo completo, cioè includendo le leggi di conversione e le unità di misura.

I dati orari ricevuti sono stati elaborati in medie giornaliere e rapportati ad intervalli temporali comuni. In particolare, l'analisi comparativa fra cedimenti e livelli di falda ha mostrato che le variazioni verticali del terreno nei primi 10 m di profondità sono principalmente correlate alle oscillazioni della falda superficiale (Figura 4.22). In prossimità del suolo, il terreno si comporta quindi come un mezzo poroso ed elastico: si dilata quando il livello della falda si alza e si comprime quando il livello di falda si abbassa. Invece, il cedimento osservato lungo una colonna di terreno spessa 140 m non correla direttamente con l'andamento della falda profonda. La falda

profonda oscilla con una periodicità annuale (Figura 4.23), mentre i cedimenti residui, cioè il cedimento profondo corretto della componente superficiale, sono da considerarsi ancora poco indicativi dei processi fisici che li generano e possono essere influenzati da un assestamento strumentale. Conseguentemente l'interpretazione di tale segnale è da verificarsi nel lungo periodo.

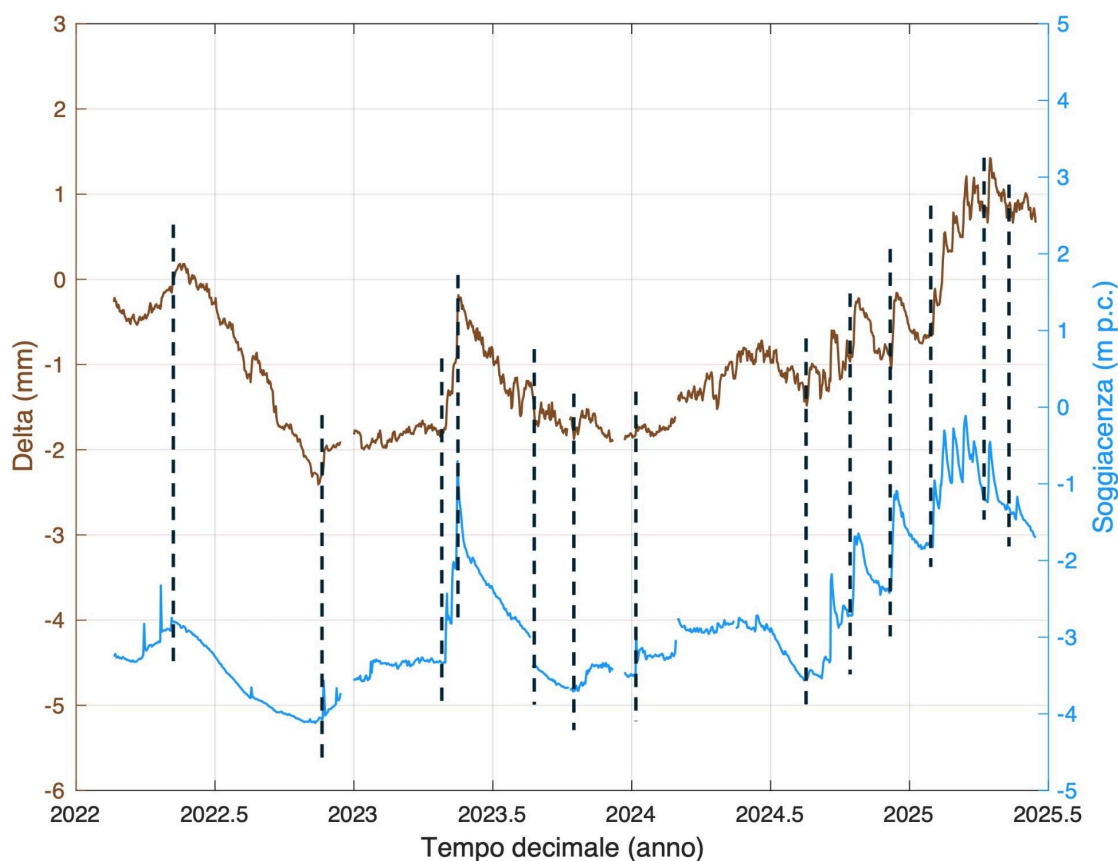


Figura 4.22. Confronto tra andamento del cedimento superficiale (delta) e soggiacenza della falda superficiale. Le linee grigie tratteggiate corrispondono a linee tempo e sono di supporto al confronto dei dati. L'abbreviazione p.c. indica il piano campagna.

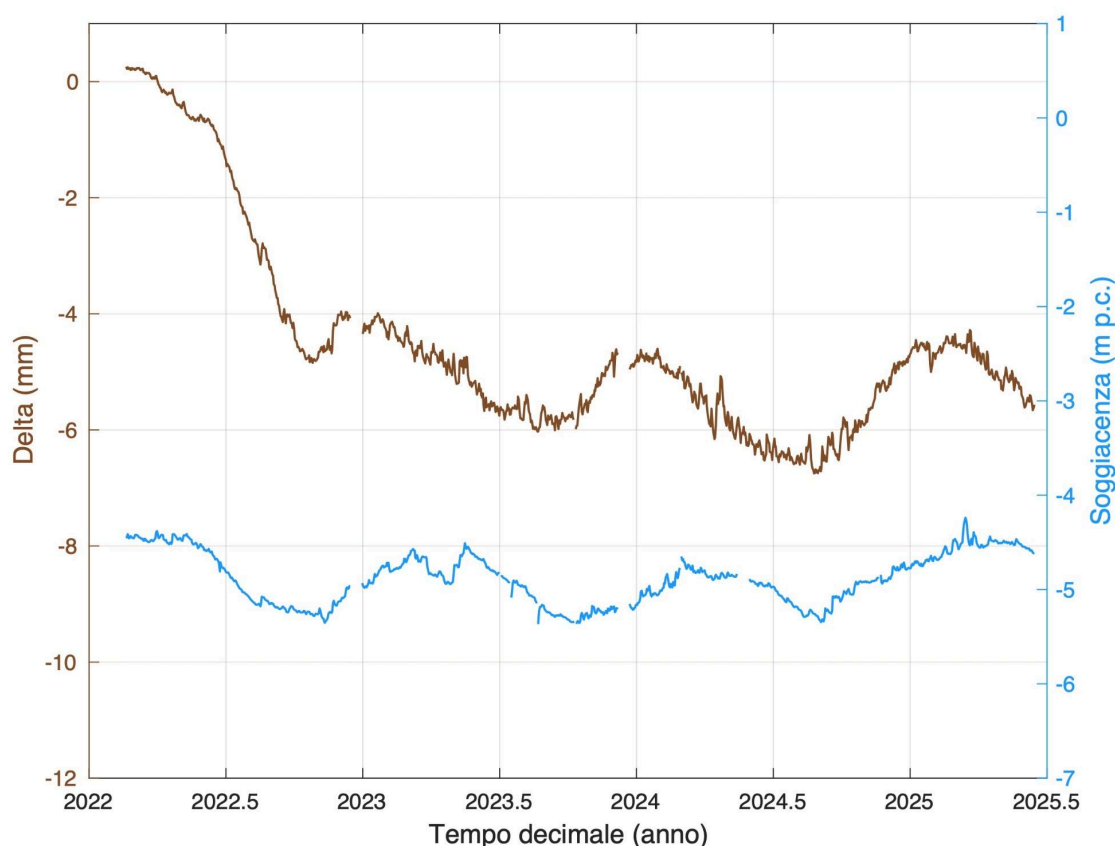


Figura 4.23. Confronto tra andamento del cedimento residuo profondo (delta) e soggiacenza della falda profonda. Le linee grigie tratteggiate corrispondono a linee tempo e sono di supporto al confronto dei dati. L'abbreviazione p.c. indica il piano campagna.

5 Analisi di dati di pressione e portata

5.1 Produzione e pressioni

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 Podere Maiar 1 dir (PM1d) e i relativi dati di pressioni (Fig. 5.1). Gli ultimi dati trasmessi fanno riferimento al periodo luglio 2024-maggio 2025 (2° periodo) e sono generalmente in linea con i valori trasmessi in precedenza (1° periodo: luglio 2023–giugno 2024). In particolare, il decremento o tasso di pressione annuale, ottenuto utilizzando una funzione di interpolazione lineare nei due periodi di ricezione dei dati, risulta pari a -8.3 ± 0.3 bar/anno nel 1° periodo e a -7.3 ± 0.2 bar/anno nel 2° periodo. Anche se non si registrano variazioni nel volume di gas estratto ($\sim 80000 \text{ Sm}^3$), il decremento di pressione nel 2° periodo è leggermente minore rispetto a quello del 1° periodo.

Inoltre, a differenza di quanto fatto per il 1° periodo, il Concessionario non ha fornito per il 2° periodo i valori di portata oraria e giornaliera del livello C2.

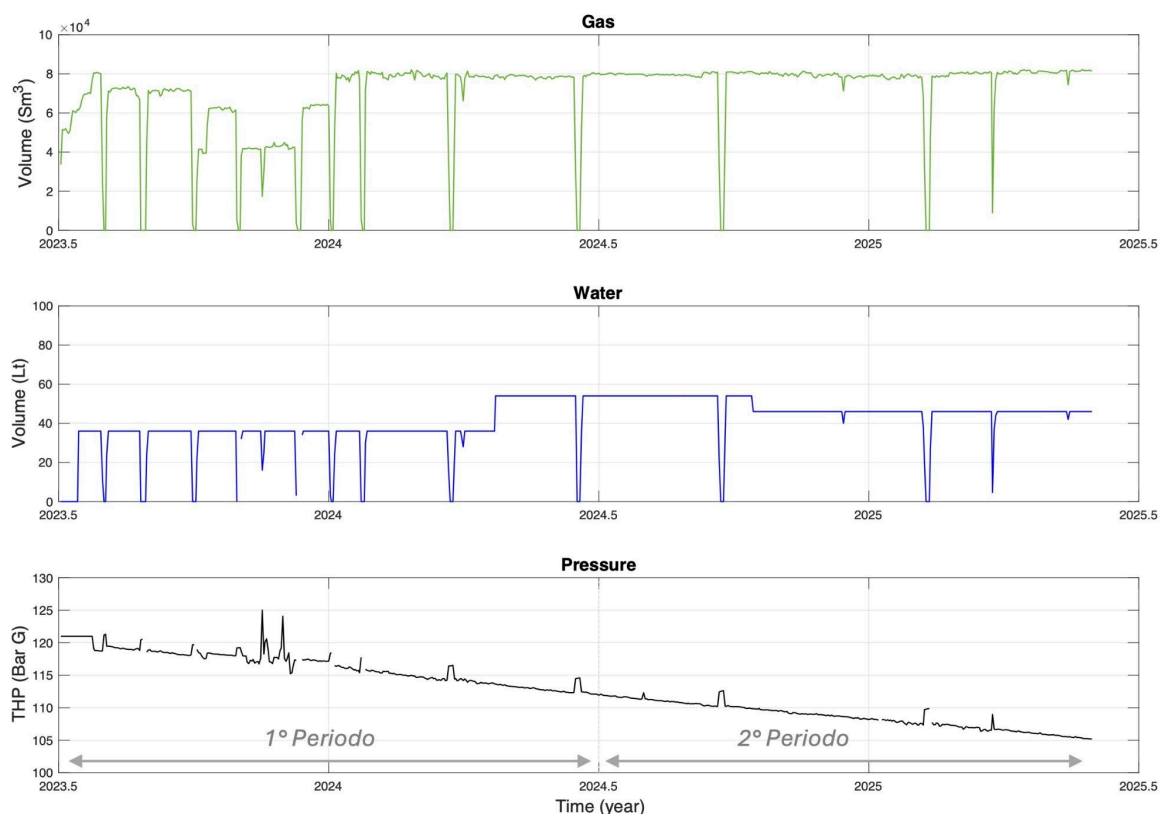


Figura 5.1. Volumi di gas e di acqua prodotti dal livello C2 del pozzo Podere Maiar 1 dir e relativi valori di pressione (THP). Il periodo dei dati va dal 1/7/2023 al 31/5/2025. Il livello C1 ha valori nulli nello stesso periodo.

Per quanto riguarda il profilo statico e dinamico della pressione e della temperatura di PM1d, sono state fornite 3 misure di THP, acquisite tra settembre 2024 e maggio 2025. In particolare, le misure di testa tubing ottenute in condizioni di assenza di flusso (STHP), sono in linea con le misure precedenti, acquisite tra giugno 2023 e giugno 2024. Il decremento di pressione calcolato sull'intero periodo giugno 2023-maggio 2025 risulta anche in linea con le misure THP mostrate in Figura 5.1 e risulta pari a -7.1 ± 1.0 bar/anno.

6 Considerazioni finali

6.1 Monitoraggio sismologico

La rete sismica locale M2 integrata con le stazioni della rete sismica nazionale IV non sembra completamente rispondente ai requisiti degli ILG (cap. 5.3) in quanto le stime teoriche di capacità di detezione indicano dei valori di magnitudo minima tra $1.8 \leq M_w \leq 1.9$ nel DI, mentre da ILG si richiede una magnitudo $0 \leq M_L \leq 1$. Trattandosi di scale di magnitudo differenti abbiamo cercato un modo per confrontarle operando la conversione ML-Mw per terremoti di bassa energia stimata da Munafò et al., 2016 (per la zona appenninica, completamente diversa dall'area di pianura in

esame), questa porterebbe a richieste degli ILG equivalenti a $1.2 \leq M_w \leq 1.8$, intervallo che si estende oltre il limite inferiore di quanto stimato come detezione teorica della rete.

Il miglioramento teorico della capacità di detezione nel DE della rete integrata M2 e IV, rispetto alla sola rete sismica nazionale è confermato anche se non corrisponde a 1 unità di magnitudo come richiesto da ILG, ma a 0.4 (da M_w 2.3-2.4 a 1.9-2.0).

Le stazioni della rete sismica locale mostrano una buona qualità e continuità del dato confermando quanto già osservato nella prima relazione semestrale. Si evidenzia solo un comportamento anomalo per la componente N del sensore SMV04 e l'accelerometro in SMV03.

In questo secondo semestre non sono stati registrati eventi sismici nei domini di monitoraggio, e anche considerando il primo semestre non si è rilevato nessun evento sismico all'interno del DI. Questo rende impossibile la verifica su base prestazionale sia delle simulazioni teoriche mostrate nella presente relazione che degli altri requisiti della rete sismica riportati negli ILG.

6.2 Monitoraggio delle deformazioni del suolo

L'analisi della serie storiche di spostamento nelle tre componenti della stazione GRLP mostra un andamento principalmente caratterizzato da un segnale stagionale sovrapposto ad un trend lineare, in direzione N-NO per le componenti orizzontali e di leggera subsidenza, per quella verticale. L'analisi delle velocità orizzontali mostra un andamento in accordo con il contesto regionale, dimostrando la buona affidabilità della stazione. Allo stesso modo la velocità di abbassamento del suolo mostra valori molto simili alle stazioni adiacenti, dimostrandosi un sito stabile e affidabile ai fini del monitoraggio.

Per quanto concerne la rete di monitoraggio delle deformazioni del suolo tramite GNSS integrata con le stazioni disponibili per l'area, si rimanda alle analisi e considerazioni riportate nella relazione semestrale inerente il primo semestre di monitoraggio.

I risultati del monitoraggio svolto tramite tecniche di interferometria satellitare effettuato con i dati COSMO-SkyMed e Sentinel-1 evidenziano un quadro deformativo caratterizzato da spostamenti compresi tra -1,50 e -3,00 mm/anno lungo le LOS per entrambe le geometrie orbitali e per entrambi i sensori, nell'area prossima al pozzo PM1d. Tali valori non evidenziano variazioni rilevanti delle deformazioni in atto rispetto a quanto riportato nell'analisi storica e sono in accordo con quanto ottenuto dall'analisi del dato GNSS.

L'analisi comparativa fra cedimenti e livelli di falda ha mostrato come le variazioni verticali del terreno nei primi 10 m di profondità siano prevalentemente correlate alle oscillazioni della falda superficiale: il terreno si dilata quando il livello della falda si alza e si comprime quando il livello di falda si abbassa. Per i dati riferiti ai primi 140 m di terreno, sebbene sia riconoscibile una periodicità annuale nella falda profonda, non è chiara la correlazione con il cedimento. I valori del cedimento possono essere influenzati da un assestamento strumentale e sono pertanto da considerarsi ancora poco indicativi dei processi che li generano. Occorre attendere serie temporali più lunghe per ulteriori interpretazioni.

6.3 Monitoraggio delle pressioni di poro

Le misure di pressione di poro riferite al periodo luglio 2024 - maggio 2025 non presentano particolari anomalie e sono in linea con le misure del periodo precedente (luglio 2023 - giugno 2024).

6.4 Conclusioni

Le simulazioni teoriche della capacità di detezione della rete sismica integrata ci hanno permesso di stimare come magnitudo minima rilevabile nel DI un valore in Mw appena superiore a quanto richiesto dagli ILG, e un miglioramento della capacità di detezione nel DE, rispetto alla sola rete sismica nazionale, inferiore a quanto richiesto dagli ILG. Si fa notare come queste stime risentano della mancanza di una verifica effettiva dato il basso tasso di sismicità della zona, oltre che di una conversione ML-Mw probabilmente non completamente adatta per l'area. In ogni caso, le magnitudo minime stimate sono comunque da considerarsi un buon risultato per una zona di pianura che risente sia delle amplificazioni dei sedimenti che di numerose attività industriali (si veda per cfr Zaccarelli et al. 2021).

La SPM, di concerto con il concessionario, esaminerà le possibili strategie di miglioramento della rete sismica volte a renderla rispondente alle prescrizioni degli ILG, attraverso ulteriori simulazioni teoriche e considerazioni pratiche, anche tenendo conto della valorizzazione dell'esistente. I risultati di queste valutazioni saranno inclusi nelle future relazioni semestrali.

Per quel che riguarda l'analisi della rete GNSS, trattata nella prima relazione semestrale, la SPM e il concessionario stanno lavorando congiuntamente per l'individuazione di siti idonei all'installazione di nuove stazioni geodetiche e all'implementazione della rete stessa volta ad un miglioramento delle capacità di detezione delle deformazioni del suolo. E' importante sottolineare come l'installazione e la disponibilità di dati derivanti da strumenti come assestimetri e piezometri possa rappresentare un'importante possibilità di confronto di dati indipendenti di deformazione del suolo. Tuttavia, il confronto, l'analisi e l'interpretazione degli andamenti nel tempo di questi parametri necessitano di serie temporali lunghe e saranno conseguentemente oggetto di studio nelle future relazioni.

Glossario

AQ:	Accordo Quadro
ASI:	<i>Agenzia Spaziale Italiana</i>
CMS:	Centro di Monitoraggio per le attività di Sottosuolo
DE:	Dominio Esteso
DI:	Dominio Interno
ESA:	<i>Agenzia Spaziale Europea</i>
GNSS:	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS:	<i>Global Positioning System</i>
IGS:	<i>International GNSS Service</i>
ILG:	Indirizzi e Linee Guida per il Monitoraggio della sismicità delle Deformazioni del Suolo e delle pressioni di poro nell'ambito delle attività antropiche
InSAR:	<i>Interferometric SAR</i>
INGV:	Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
IV:	Sigla rete (NW-Code) RSN (INGV)
LOS:	Line of Sight - Linea di vista
M2:	Sigla rete (NW-Code) concessione Selva Malvezzi
MASE:	Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica
ML:	Magnitudo Locale
MP1:	<i>Multipath portante L1 GPS</i>
MP2:	<i>Multipath portante L2 GPS</i>
NW:	<i>Network</i>
PGA:	<i>Peak Ground Acceleration</i>
PGV:	<i>Peak Ground Velocity</i>
PM1d:	<i>Pozzo Podere Maiar 1 dir</i>
PPSD:	<i>Probability Power Spectral Density</i>
RINEX:	<i>Receiver INdependent EXchange</i>
RING:	Rete Nazionale Integrata GPS
RMS:	<i>Root Mean Square</i>
RSN:	Rete Sismica Nazionale (INGV)
SAR:	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
SBAS:	<i>Small BAseline Subset</i>
SPM:	Struttura Preposta al Monitoraggio
THP:	<i>Tubing Head Pressure</i> - pressione a testa pozzo
TLS:	<i>Traffic Light System</i> - sistema a semaforo

Bibliografia

- Altamimi, Z., Métivier, L., Rebischung, P., Rouby, H., Collilieux, X. (2017). ITRF2014 plate motion model. *Geophys. J. Int.* 209, 1906–1912. doi:10.1093/gji/ggx136.
- Bennett, R. A., et al. (2012), Syn-convergent extension observed using the RETREAT GPS network, northern Apennines, Italy, *J. Geophys. Res.*, 117, B04408, doi:10.1029/2011JB008744
- Berardino P, Fornaro G, Lanari R, Sansosti E (2002) A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Trans GeosciRemote Sens* 40(11):2375–2383
- Bevis, M., & Brown, A. (2014). Trajectory models and reference frames for crustal motion geodesy. *Journal of Geodesy*, 88(3), 283–311. <https://doi.org/10.1007/s00190-013-0685-5>.
- Brune J. N., (1970). Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *J. Geophys. Res.* 75, 4997-5009.
- Brune J. N., (1971). (Correction) Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *J. Geophys. Res.* 76, 5002.
- Devoti, R., A. Esposito, G. Pietrantonio, A.R. Pisani and F. Riguzzi (2011). Evidence of large-scale deformation patterns from GPS data in the Italian subduction boundary, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 311, 1-12; doi:10.1016/j.epsl.2011.09.034.
- 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. <https://unmig.mase.gov.it/geomonitoraggi/linee-guida-per-i-monitoraggi/> (ultimo accesso giugno 2025).
- Munafò I., Malagnini L., Chiaraluce L. (2016). On the Relationship between Mw and ML for Small Earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106, 5, 2402–2408, doi: 10.1785/0120160130.
- Peterson, J.R. (1993), Observations and modeling of seismic background noise, Open-File Report, 93-322, <https://doi.org/10.3133/ofr93322>
- 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.
- Rebischung, P., Altamimi, Z., Ray, J., Garayt B. (2016) The IGS contribution to ITRF2014. *J Geod* 90, 611–630. <https://doi.org/10.1007/s00190-016-0897-6>
- Serpelloni E., Cavaliere A., Martelli L., Pintori F., Anderlini L., Borghi A., Randazzo D., Bruni S., Devoti R., Perfetti P. and Cacciaguerra S. (2022) Surface Velocities and Strain-Rates in the Euro-Mediterranean Region From Massive GPS Data Processing. *Front. Earth Sci.* 10:907897. doi: 10.3389/feart.2022.907897
- Vassallo, M., Festa, G., and Bobbio, A. (2012). Seismic Ambient Noise Analysis in Southern Italy. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 102, 574–586. doi:10.1785/0120110018.
- 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.