

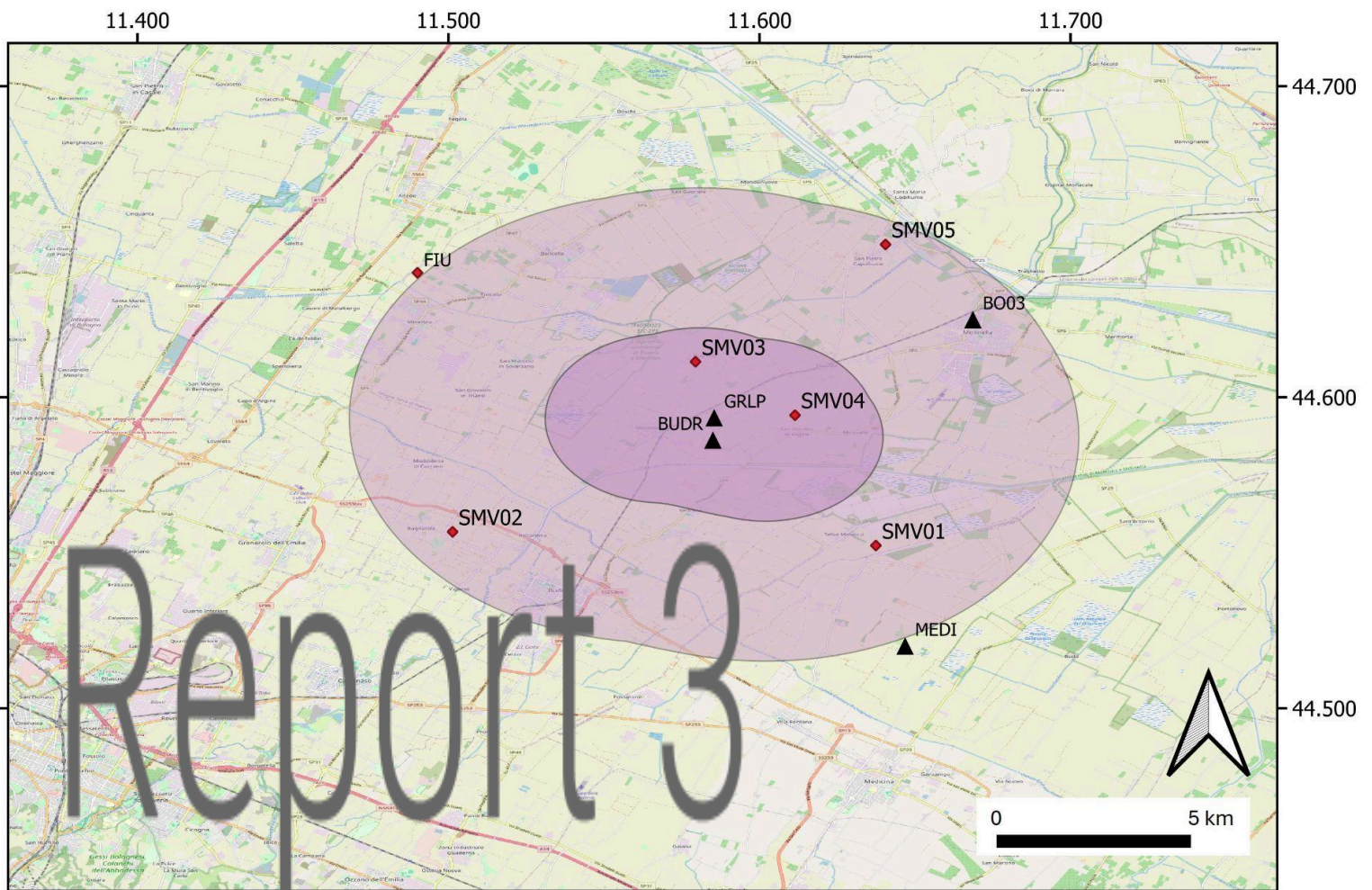
## Accordo Quadro 2024-2028

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, L. Martelli, E. Serpelloni, C. Tolomei, M. Vassallo e G. Zerbinato





PREMESSA	5
1 PARAMETRI DI MONITORAGGIO	7
2 SIMULAZIONI PER IL MIGLIORAMENTO DELLA DETEZIONE DELLA RETE SISMICA	8
3 MONITORAGGIO SISMICO E ANALISI DATI	11
3.1 FUNZIONAMENTO DELLA RETE SISMICA	11
3.2 ANALISI DELLA SISMICITÀ NEI DOMINI DI MONITORAGGIO	13
4 MONITORAGGIO DELLE DEFORMAZIONI DEL SUOLO	13
4.1 DATI GNSS	13
4.2 DATI INSAR	18
4.3 CEDIMENTO DEL TERRENO E LIVELLO DI FALDA	22
4.4 CONFRONTO FRA DATI DI DEFORMAZIONE E DATI DI ALTRA NATURA	24
5 ANALISI DI DATI DI PRESSIONE E PORTATA	28
5.1 PRODUZIONE E PRESSIONI	28
6 CONSIDERAZIONI FINALI	30
6.1 MONITORAGGIO SISMOLOGICO	30
6.2 MONITORAGGIO DELLE DEFORMAZIONI DEL SUOLO	30
6.3 MONITORAGGIO DELLE PRESSIONI DI PORO	31
GLOSSARIO	32
BIBLIOGRAFIA	33

---

## **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.3**

Lucia Zaccarelli<sup>1</sup>, Giuseppe Pezzo<sup>2</sup>, Letizia Anderlini<sup>1</sup>, Eleonora Vitagliano<sup>2</sup>, Maddalena Errico<sup>1</sup>, Leonardo Martelli<sup>1</sup>, Enrico Serpelloni<sup>1</sup>, Cristiano Tolomei<sup>2</sup>, Maurizio Vassallo<sup>3</sup>, Giampaolo Zerbinato<sup>1</sup>

<sup>1</sup> INGV, Sezione di Bologna, Italia;

<sup>2</sup> INGV, Osservatorio Nazionale Terremoti, Roma, Italia

<sup>3</sup> INGV, Sezione di Roma 1, Roma, Italia.

21/01/2026

## 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
01 luglio 2025	Invio seconda Relazione semestrale della SPM a tutto il comitato: analisi dei dati di monitoraggio dal 22 novembre 2024 al 21 maggio 2025

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

In questo terzo rapporto semestrale l'obiettivo principale è quello di presentare i risultati del monitoraggio sismico, di deformazione (GNSS) e delle pressioni di poro degli ultimi sei mesi dal 22/05/2025 al 21/11/2025, unitamente agli andamenti dei dati di piezometri e assestimetri.

Data	Dati trasmessi
20 gennaio 2023	Trasmissione relazioni su studi di subsidenza e installazione reti di monitoraggio <ul style="list-style-type: none"><li>• Ubicazione del pozzo di estrazione</li></ul>

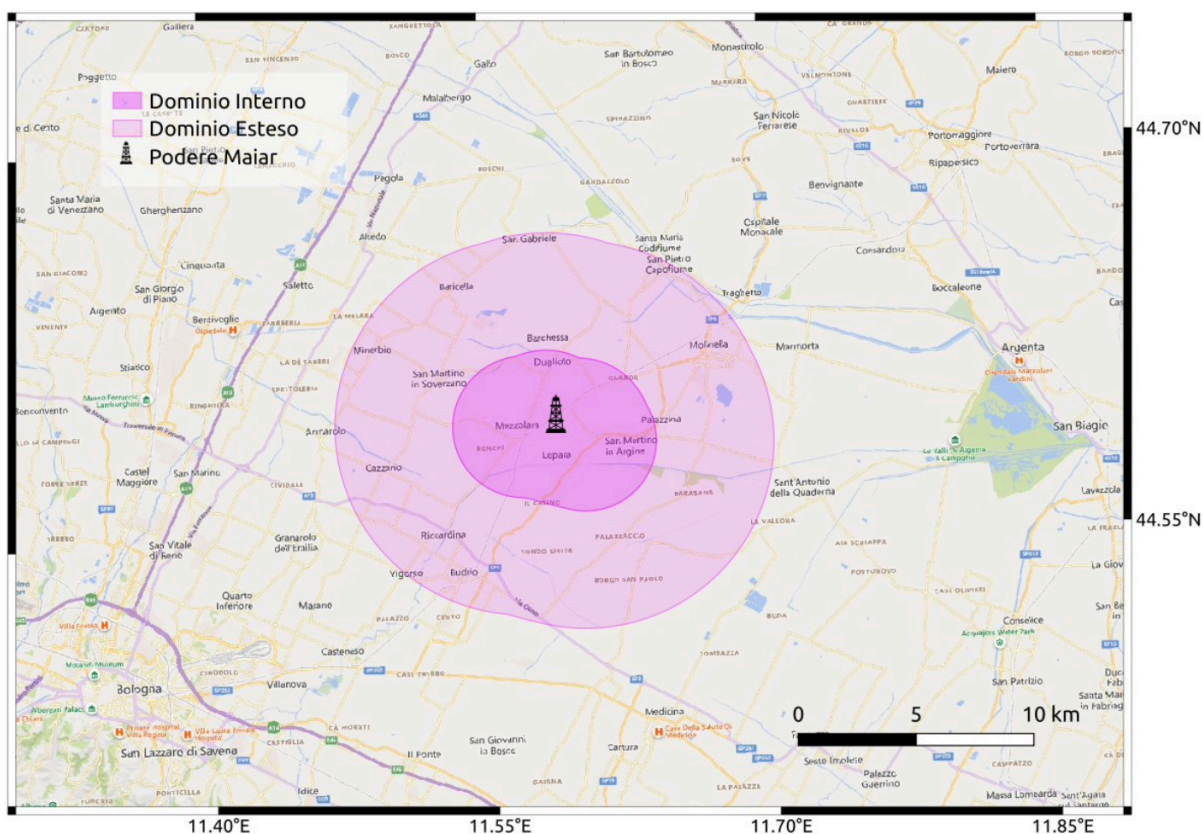
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ubicazione delle stazioni della rete sismica, rapporto di installazione e verifica del dato</li> <li>• Ubicazione delle stazioni della rete geodetica, rapporto di installazione ed elaborazione del dato</li> <li>• Caratteristiche geometriche del giacimento</li> <li>• Figure a supporto</li> </ul>
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	<p>Trasferimento dati:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• GNSS in formato RINEX per il periodo 5 giugno 2020 - 28 luglio 2024</li> <li>• Elaborazioni InSAR dal novembre 2008 a marzo 2024</li> <li>• 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</li> <li>• Dati di produzione e pressione testa pozzo dal 4 luglio 2023 al 30 giugno 2024</li> <li>• Misure di gradiente statico e dinamico di pressione acquisite a gennaio 2018 e tra giugno 2023 e giugno 2024</li> </ul>
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
9 luglio 2025	Vengono caricati sull'FTP i dati degli assestimetri, piezometri, e i dati di produzione aggiornati a tutto giugno 2025
13 agosto 2025	Vengono caricati sull'FTP i dati degli assestimetri, piezometri, e i dati di produzione aggiornati a tutto luglio 2025; vengono fornite anche le informazioni utili per poter interpretare correttamente i dati di temperatura e di conducibilità
15 settembre 2025	Vengono caricati sull'FTP i dati degli assestimetri, piezometri, e i dati di produzione aggiornati a tutto agosto 2025. Vengono forniti i profili 1:000 dei pozzi Selva dal n°1 al n°24 e la produzione storica.
8 ottobre 2025	Vengono caricati sull'FTP i dati degli assestimetri, piezometri, e i dati di produzione aggiornati a tutto settembre 2025, Viene aggiunta una directory con i dati del GNSS per il 2025 fino a tutto settembre (buco dal 26 marzo al 24 maggio)

5 novembre 2025	Vengono caricati sull'FTP i dati degli assestimetri, piezometri, e i dati di produzione aggiornati a tutto ottobre 2025
9 dicembre 2025	Vengono caricati sull'FTP i dati degli assestimetri, piezometri, e i dati di produzione aggiornati a tutto novembre 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.



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

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 circonda 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.

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.

<b>Livello di attivazione</b>	<b>Semaforo</b>	<b><math>M_{max}</math></b>	<b>PGA (% g)</b>	<b>PGV (cm/s )</b>
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

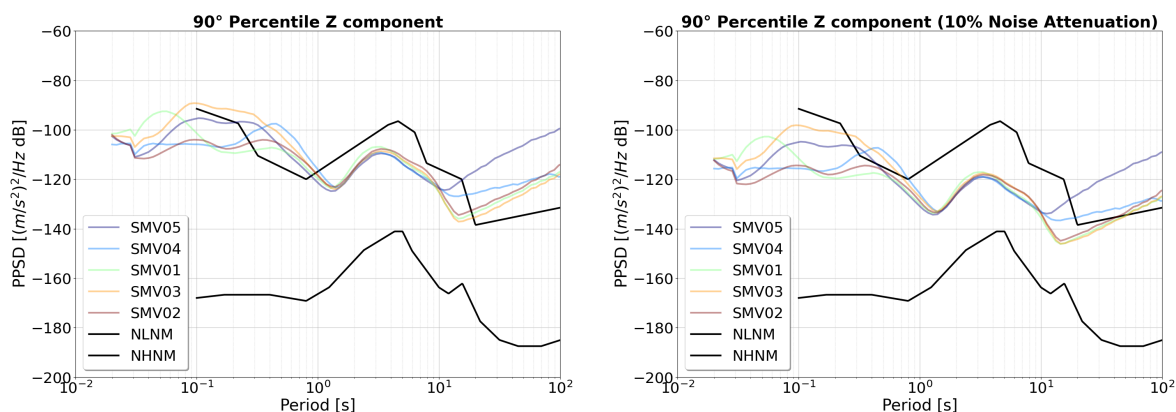
**Figura 1.2:** Livelli di attivazione e valori soglia per i parametri sismici come definiti negli ILG, cap. 9, Tabella 3. Nel documento originale l'unità fisica di PGV è stata erroneamente indicata in cm/s<sup>2</sup>.

## 2 Simulazioni per il miglioramento della detezione della rete sismica

Le simulazioni della capacità di detezione della rete sismica integrata, presentate nel secondo rapporto semestrale, hanno mostrato come l'attuale configurazione non consenta una piena rispondenza ai requisiti esposti negli ILG (cap. 5.3), né come magnitudo minima rilevabile nel DI, né per il miglioramento della magnitudo di completezza nel DE di un punto di magnitudo rispetto alle capacità della rete sismica nazionale (punti 1 e 2 delle richieste elencate al cap.5.3 degli ILG).

In questo semestre abbiamo eseguito ulteriori simulazioni teoriche volte a testare nuove configurazioni della rete sismica locale M2, tali da ottenere dei risultati compatibili con le richieste degli ILG. Seguendo lo stesso approccio proposto da Vassallo et al., (2012) e adottato per valutare la capacità di detezione della rete nella seconda relazione semestrale, ci siamo concentrati separatamente su due tipi di test: 1) per diminuire la magnitudo minima rilevabile nel DI abbiamo simulato livelli di rumore più bassi a tutte le stazioni diminuendo i valori delle PPSD calcolate ad ogni stazione di una percentuale sempre maggiore fino all'ottenimento di una capacità di detezione nel DI di eventi con ML compresa tra 0 e 1 (cap 5.3 punto 1, ILG); 2) per allargare l'area di detezione abbiamo simulato il posizionamento di stazioni sismiche aggiuntive in punti strategici che consentissero di estendere la copertura della rete. L'aggiunta di stazioni esterne al DE consentirebbe di diminuire di una unità la magnitudo di completezza al momento raggiunta dalla rete sismica nazionale (cap.5.3 punto 2, ILG).

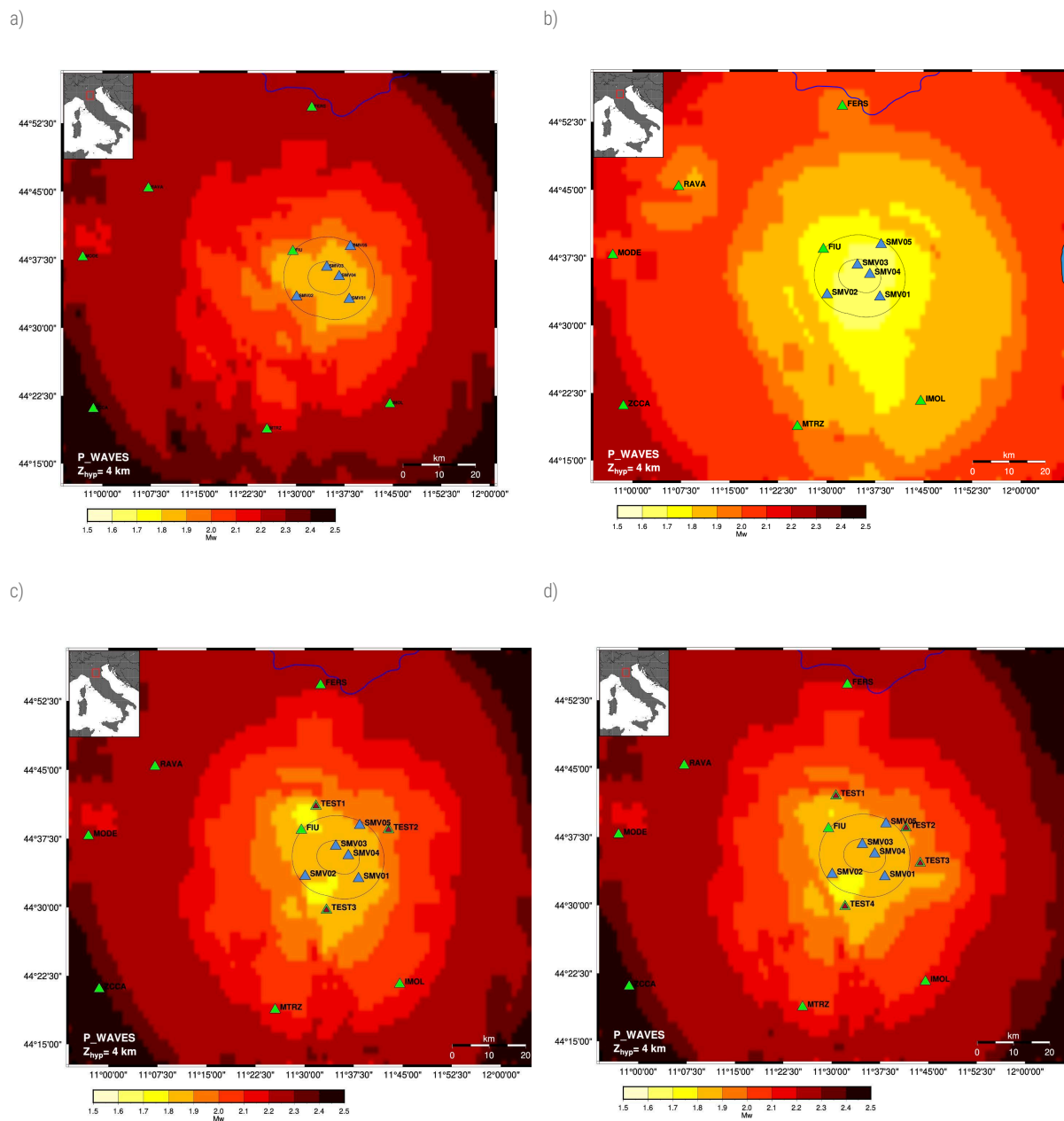
Come primo test abbiamo ripetuto le simulazioni di “capacità di detezione” considerando per ogni stazione della rete M2 una curva di 90° percentile delle PPSD diminuita del 10% rispetto al massimo registrato nella banda di frequenza 1- 10 Hz (periodi tra 0.1 - 1 s, banda utile per la registrazione di terremoti locali). Le nuove curve di rumore sono mostrate in Figura 2.1 e rispetto a quelle originali (pannello di sinistra) mostrano valori che solo sporadicamente superano il livello massimo NHNM definito da Peterson (1993, pannello di destra). Nel secondo caso abbiamo provato a posizionare inizialmente 3 e, in un secondo tempo, 4 ulteriori stazioni, esternamente al DE in diverse configurazioni.



**Figura 2.1.** Andamento del 90° percentile delle PPSD calcolate alle diverse stazioni della rete M2. Per tutte le curve si osserva un picco intorno a -100 dB nell'intervallo [0,1 1] s (corrispondente al rango delle frequenze [1 10] Hz). Le linee nere indicano l'andamento dei valori minimo NLNM e massimo NHNM definiti da Peterson (1993) come riferimento.

I risultati principali di queste simulazioni vengono mostrati in Figura 2.2, dove la prima mappa (Figura 2.2a) mostra il risultato presentato nel secondo rapporto semestrale per confronto con la situazione attuale ( $1.8 < M_w < 1.9$  per il DI e  $1.8 < M_w < 2.0$  nel DE). In Figura 2.2b invece mostriamo gli effetti di una drastica riduzione del rumore registrato a tutte le stazioni che porterebbe ad un abbassamento della soglia di detezione a valori di  $1.6 < M_w < 1.7$  nel DI e  $1.6 < M_w < 1.8$  nel DE. Nelle ultime due mappe mostriamo due ipotetiche configurazioni, la prima, dove alla rete attuale sono state aggiunte 3 stazioni, la seconda, che mostra invece l'aggiunta di 4 stazioni (Figura 2.2c e d rispettivamente). La Figura 2.2c rappresenta uno dei vari test effettuati con analoghe configurazioni a dimostrazione del fatto che l'aggiunta di 3 stazioni non sembra sufficiente, ma sono necessarie un minimo di 4 stazioni per arrivare ad abbassare la magnitudo di completezza a valori  $1.7 < M_w < 1.9$  su tutto il DE (Figura 2.2d). Ricordiamo che le simulazioni considerano l'andamento del 90° percentile delle PPSD calcolate ad ogni stazione, e per questo motivo le stime di “magnitudo minima di detezione” si avvicinano alla magnitudo di completezza. Volendo confrontare i valori ottenuti in  $M_w$ , con quelli in ML prescritti dagli ILG, si utilizza la relazione  $M_w$ -ML di Munafò et al., (2016), come già applicato nel rapporto semestrale n.2. La relazione originale:

$$M_w = \frac{2}{3} ML + 1.15 \quad (1.1)$$



**Figura 2.2.** Mappe della capacità di detezione per le onde P (ottenute considerando il 90° percentile della curva di PPSD calcolata sulla componente verticale di ogni stazione) secondo diverse ipotesi di rete sismica: a) configurazione della rete sismica attuale (stessa mappa presentata nella relazione n.2, Figura 2.3); b) stessa configurazione di rete sismica in termini di posizione e numero delle stazioni, ma livelli di rumore diminuiti del 10% rispetto al picco massimo osservato nella banda [1 10] Hz; c) rete sismica ampliata con l'aggiunta di 3 stazioni esterne al DE: TEST1, TEST2 e TEST3 (ad ogni stazione immaginaria vengono associati i livelli di rumore della stazione reale più prossima); d) rete sismica ampliata con l'aggiunta di 4 stazioni esterne al DE: TEST1, TEST2, TEST3 e TEST4 (ad ogni stazione immaginaria vengono associati i livelli di rumore della stazione reale più prossima).

porta a formulare:

$$ML = \frac{3}{2} (Mw - 1.15) \quad (1.2)$$

e un'equivalenza di valori riportata in Tabella 2.1.

Sottolineiamo che la relazione espressa dalla equazione (1.1) è stata testata su eventi sismici di piccola magnitudo in una zona degli Appennini settentrionali geologicamente e sismicamente molto diversa da quella in cui si trova il giacimento in oggetto, per questo i valori che otteniamo sono da considerarsi come un'indicazione di massima circa l'ordine di grandezza che potremmo aspettarci. In questo modo abbiamo la conferma che le nuove configurazioni di rete ipotizzate (con una diminuzione del 10% del rumore e con l'aggiunta di 4 stazioni, Figura 2.2b e d) portano a una rispondenza dei requisiti degli ILG da parte della rete sismica integrata.

<b>Mw</b>	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
<b>ML</b>	0.7	0.8	1.0	1.1	1.3

**Tabella 2.1.** *Corrispondenza tra valori di Mw e ML secondo la relazione di eq. (1.2) ricavata da Munafò et al. (2016) e valida per terremoti di piccola magnitudo dell'Appennino settentrionale (zona della faglia dell'Alto Tiberina).*

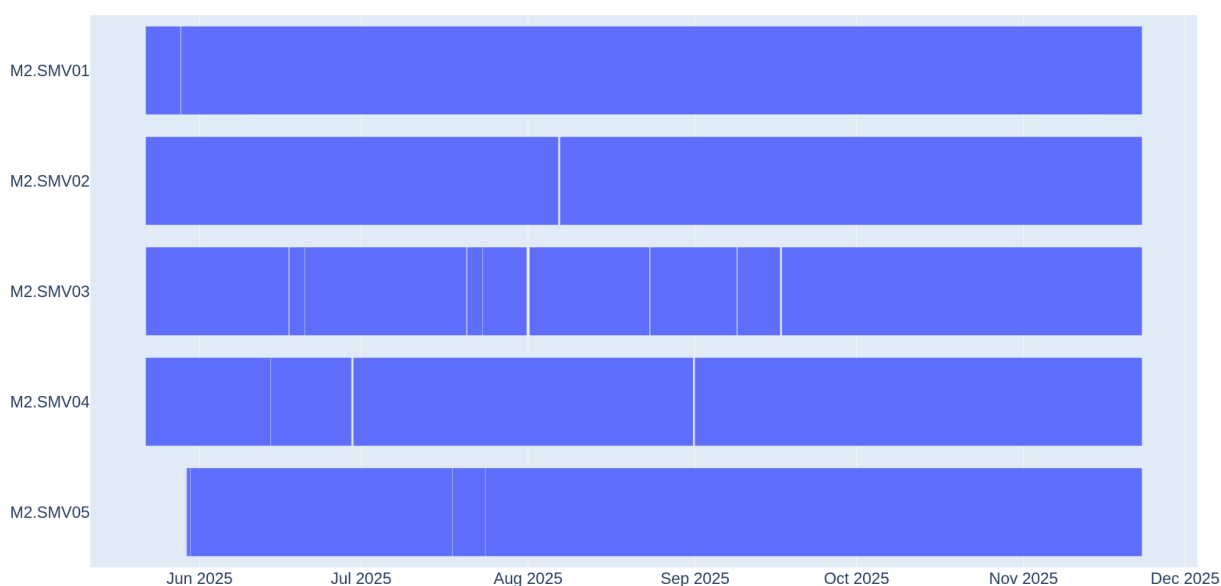
Una diminuzione del rumore sismico si può ottenere con l'installazione di sensori in pozzo. Considerando le curve di 90° percentile delle PPSD (Figura 2.1) si vede che il picco massimo nell'intervallo 1 - 10 Hz raggiunge valori dell'ordine di  $-10^2$  dB, quindi una diminuzione pari al 10% corrisponde a togliere  $\sim 10$  dB. Per stimare la profondità utile a diminuire i livelli di rumore si può prendere come riferimento il recente lavoro di Rossi et al., (2023). Questi autori hanno confrontato i livelli di rumore registrati da sensori posizionati a diverse profondità nella zona di San Potito-Cotignola, in pianura padana: rispetto al rumore registrato in superficie già il primo sismometro posizionato a 35 m di profondità migliora notevolmente la qualità del segnale diminuendo il rumore di un valore tra i 10 e i 20 dB a seconda della frequenza considerata (tra 1 e 10 Hz). Queste misure sono basate su un'area della pianura padana diversa da quella della concessione Selva Malvezzi, per questo i valori riportati sono da considerare per il loro ordine di grandezza e non come misure di riferimento precise, si tratta quindi di interrare di qualche decina di metri di profondità in modo da superare lo strato di sedimenti superficiali.

## 3 Monitoraggio sismico e analisi dati

### 3.1 Funzionamento della rete sismica

Nel semestre in oggetto (22 Maggio 2025 - 21 Novembre 2025), le stazioni della rete M2 hanno funzionato senza interruzioni rilevanti. La stazione SMV05 è stata ripristinata il 28 maggio 2025 con un intervento di manutenzione (spostamento dell'acquisitore volto ad evitare gli allagamenti subiti nei periodi precedenti).

La Figura 3.1 mostra la continuità di ricezione del dato (bande blu) e i periodi di fermo dell'acquisizione (spazi grigi) alle singole stazioni nell'ultimo semestre.



**Figura 3.1.** Grafico della disponibilità del dato sismico nel terzo semestre di monitoraggio (22 maggio 2025 - 21 novembre 2025) per ognuna delle cinque stazioni della rete M2 gestita dal concessionario. Le barre blu corrispondono a dati giornalieri correttamente ricevuti mentre gli spazi grigi a dati mancanti.

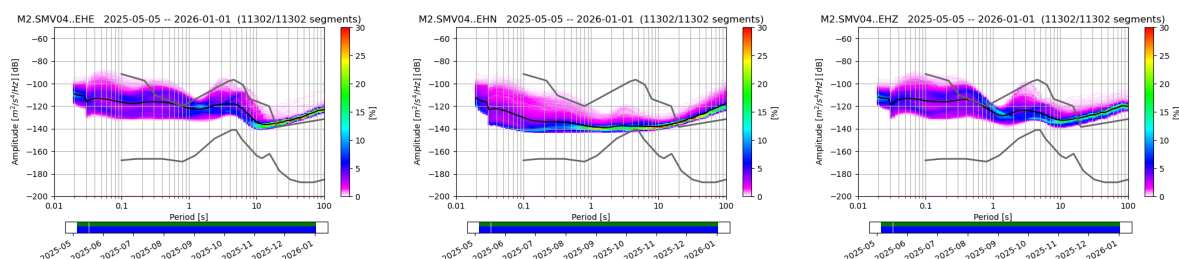
La percentuale di dato acquisito nel terzo semestre è riportata in Tabella 3.1: tutte le stazioni mostrano un funzionamento superiore al limite del 95% richiesto dagli ILG (cap. 5.3 punto f) confermando una buona continuità del dato per il periodo di monitoraggio 22 maggio - 21 novembre 2025.

SMV01	SMV02	SMV03	SMV04	SMV05
100%	99.8%	99.3%	99.6%	96.9%

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

Per valutare la bontà del segnale sismico acquisito sono state calcolate le curve di PPSD su diversi intervalli temporali così da confrontarle per valutare eventuali variazioni nel funzionamento delle stazioni. Non si osservano variazioni nel tempo per nessuna stazione, ma si continua a segnalare un comportamento anomalo per la componente N del velocimetro SMV04, analogamente a quanto già evidenziato nel rapporto semestrale n.2. La Figura 3.2 mostra le curve di PPSD per le tre componenti di questa stazione, calcolate sul dato acquisito dall'inizio del monitoraggio (22 maggio 2024) all'1 gennaio 2026. Si osserva una chiara differenza tra le curve ottenute per la componente N (al centro) e le altre due componenti. In questo pannello centrale infatti, le curve di probabilità spettrale sono 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. Questo andamento potrebbe essere dovuto a problemi del sensore (malfunzionamento del sensore nella componente N), o a un'installazione non perfettamente idonea (inversione delle componenti), o a un errore nella risposta strumentale: sarebbe utile eseguire dei controlli mirati a capire il problema.



**Figura 3.2.** PPSD calcolate per la stazioni SMV04 per tutto il periodo di monitoraggio 22/05/24-1/01/2026, 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.

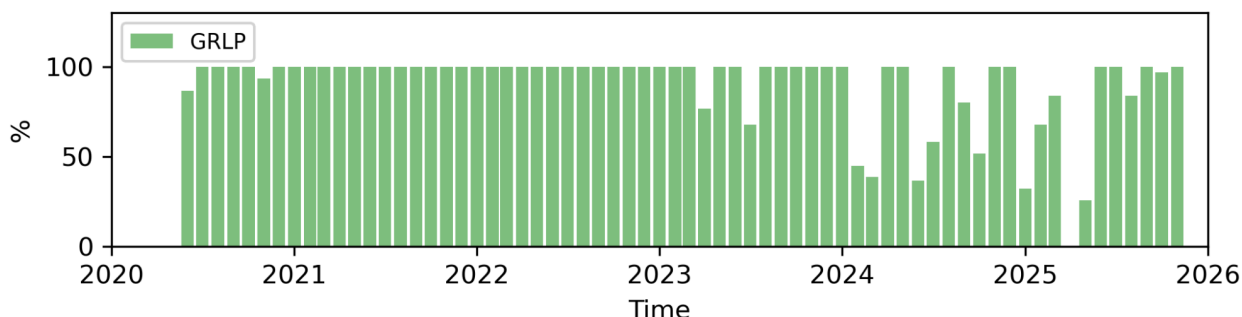
### 3.2 Analisi della sismicità nei domini di monitoraggio

Durante il terzo semestre di monitoraggio: 22 maggio-22 novembre 2025, non sono stati rilevati eventi sismici localizzabili all'interno dei domini di monitoraggio.

## 4 Monitoraggio delle deformazioni del suolo

### 4.1 Dati GNSS

Come mostrato nei precedenti rapporti semestrali, la rete di monitoraggio GNSS per la concessione di Selva Malvezzi consta di una sola stazione permanente a doppia frequenza (GRLP) installata in corrispondenza del pozzo PM1d. Dall'analisi di qualità eseguita nei precedenti report si è osservato che la stazione è equipaggiata con strumentazione di alta precisione e i dati mostrano un'elevata qualità.



**Figura 4.1:** Percentuale di RINEX giornalieri disponibili per ciascun mese di acquisizione della stazione GRLP fino al 30 novembre 2025.

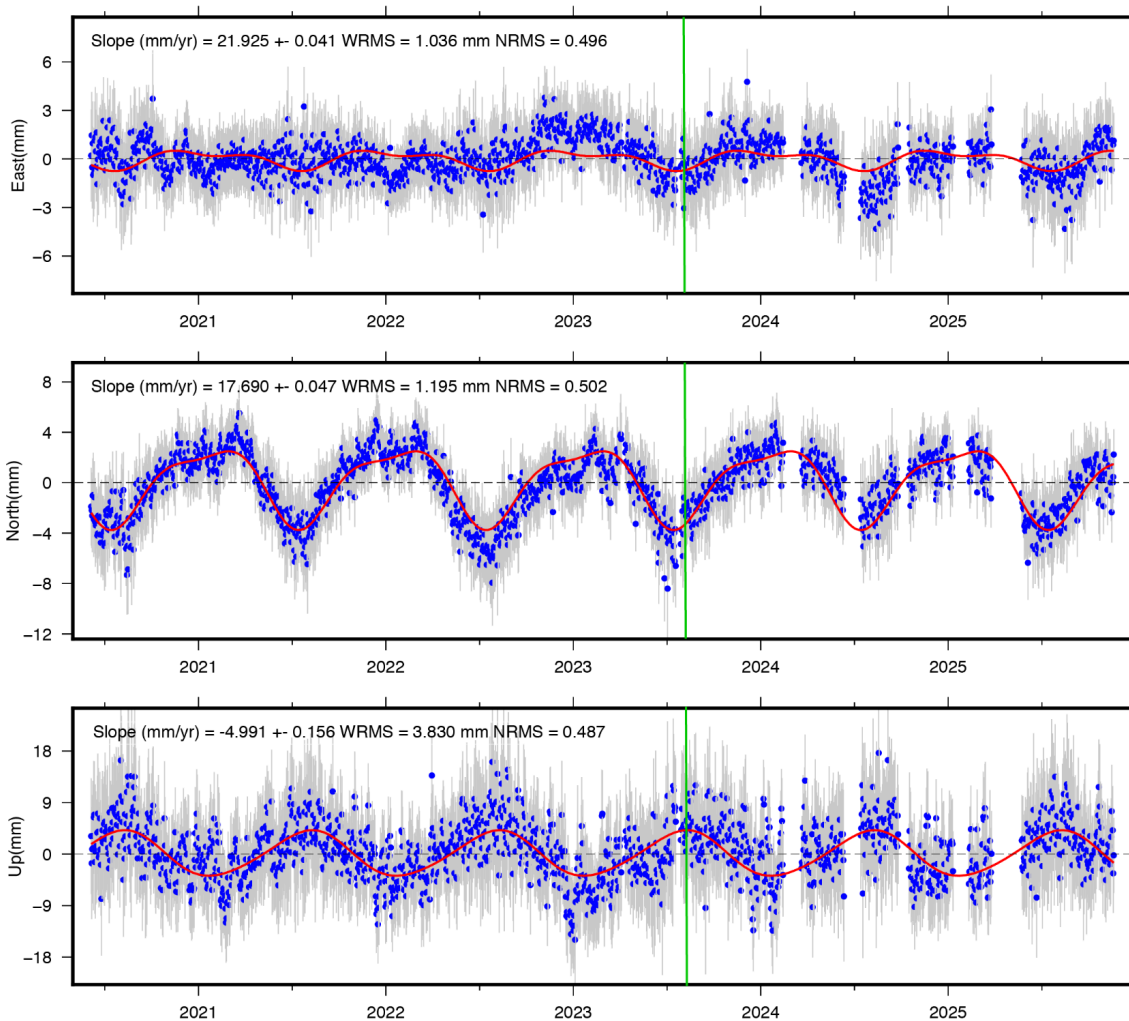
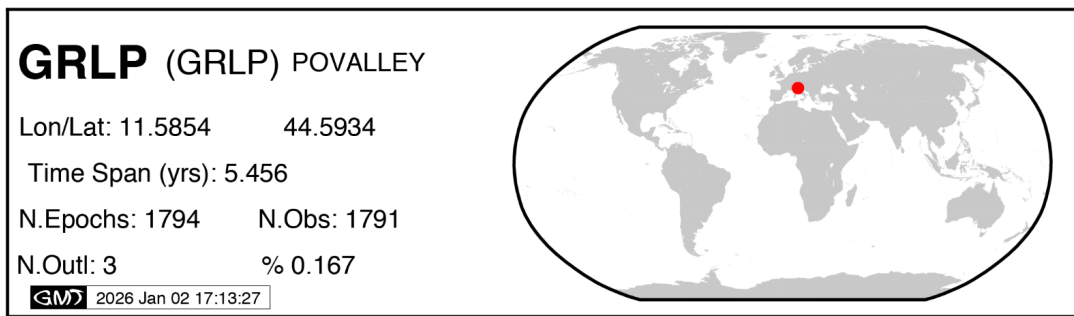
In Figura 4.1 viene mostrata la percentuale mensile dei dati giornalieri GNSS disponibili in formato RINEX acquisiti dalla stazione GRLP a partire dalla data di installazione (4 giugno 2020) fino al 30 novembre 2025. Si può osservare come la stazione mostri una buona continuità del dato, avendo acquisito in media, per tutto il periodo di funzionamento, il 90% dei file RINEX attesi, mostrando alcune interruzioni nel 2024 e 2025 a causa di problemi legati alla connettività che ad oggi dovrebbero essere risolti.

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 ITRF2020 (Altamimi et al., 2023), utilizzando il pacchetto GLOBK del software GAMIT/GLOBK.

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. 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.

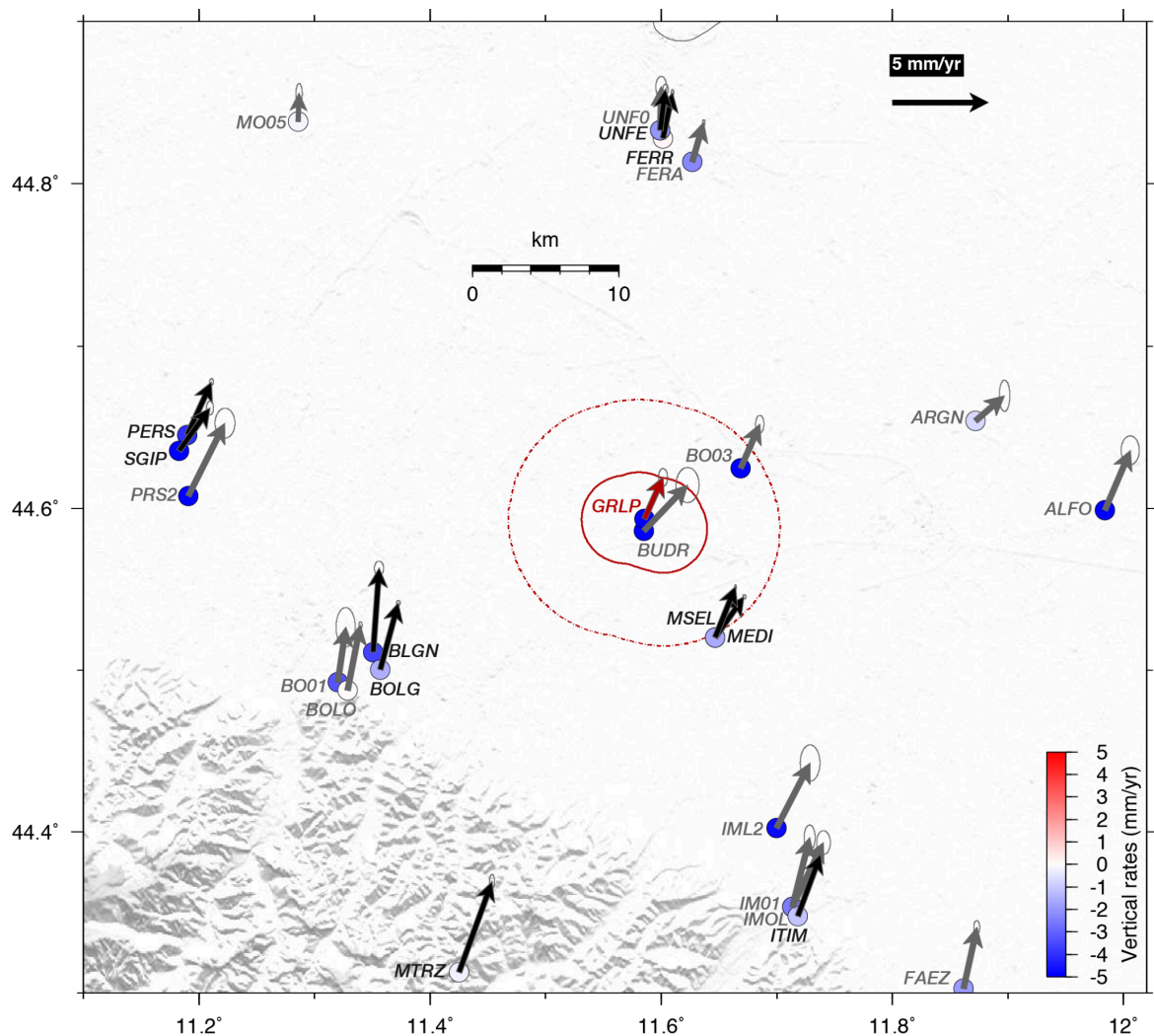
Le serie temporali di spostamento riferite rispetto a un sistema di riferimento globale non ci permettono però di apprezzare le deformazioni a scala locale. Per mettere in evidenza eventuali andamenti negli spostamenti dovuti a possibili sorgenti locali di deformazione, risulta utile rimuovere dalle serie temporali di spostamento il termine lineare ed eventuali salti di posizione. La Figura 4.2 mostra la serie temporale degli spostamenti giornalieri per la stazione GRLP nelle tre componenti Est, Nord e verticale risultanti dalla rimozione del termine lineare di spostamento nel sistema di riferimento globale. Viene riportato anche il modello funzionale atteso sopra descritto (linea rossa) e l'epoca di inizio dell'attività di produzione nella concessione (barra verde). Dal risultato così ottenuto non si osservano particolari anomalie nell'andamento temporale degli spostamenti residui per questa stazione rispetto sia al modello funzionale atteso e sia all'inizio delle attività di estrazione.



**Figura 4.2.** Serie temporale di spostamento (punti blu) della stazione GRLP risultate dalla rimozione di un termine lineare stimato nel sistema di riferimento globale ITRF2020 per le componenti Est, Nord e verticale. Le linee grigie indicano le barre d'errore ( $1\sigma$ ) per gli spostamenti, la linea rossa rappresenta il modello analitico atteso e la barra verde indica l'epoca di inizio dell'attività di produzione nella concessione.

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 globale ITRF2020, che però non ci permettono 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 di possibili 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 velocità di spostamento orizzontali GPS (quelle verticali rimangono riferite al sistema di riferimento globale) sono state poste rispetto alla placca Eurasia-fissa, utilizzando come polo di rotazione quello riportato da Altamimi et al. (2023). 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.



**Figura 4.3.** Campo di velocità di spostamento ottenuto dall'analisi dei dati GNSS per le componenti orizzontali (freccie nere per le stazioni pubbliche e freccie grigie per le stazioni private) nel sistema di riferimento locale Eurasia-fissa (con ellissi di errore al 95%), e le corrispondenti componenti verticali (nel sistema di riferimento globale), mostrate dai cerchi colorati secondo la palette in basso a destra. I domini di monitoraggio sono indicati in rosso.

Il risultato di questa analisi è mostrato in Figura 4.3, sia per le componenti orizzontali che verticali, e i valori di velocità sono riportati in Tabella 4.1.

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	1.327	3.094	0.193	0.306	-5.515	2.258	ALFO_GPS
11.8719	44.6540	1.504	1.301	0.113	0.332	-0.747	1.314	ARGN_GPS
11.3506	44.5110	0.311	4.359	0.098	0.153	-3.640	0.535	BLGN_GPS
11.3199	44.4926	0.419	2.844	0.203	0.419	-3.275	1.931	BO01_GPS
11.6686	44.6249	0.994	2.272	0.088	0.189	-5.791	1.196	BO03_GPS
11.3568	44.5002	0.940	3.467	0.040	0.054	-1.495	0.324	BOLG_GPS
11.3288	44.4876	0.656	3.368	0.034	0.077	0.103	0.348	BOLO_GPS
11.5850	44.5862	2.263	2.369	0.245	0.372	-5.088	1.501	BUDR_GPS
11.8613	44.3028	0.695	3.163	0.063	0.145	-1.934	0.810	FAEZ_GPS
11.6270	44.8136	0.583	2.022	0.028	0.056	-2.304	0.358	FERA_GPS
11.6013	44.8279	0.498	2.375	0.028	0.064	0.120	0.405	FERR_GPS
11.5854	44.5934	0.966	2.150	0.096	0.192	-4.991	1.028	GRLP_GPS
11.7135	44.3535	1.607	3.322	0.146	0.252	-0.948	1.604	IM01_GPS
11.6997	44.4024	1.740	3.359	0.209	0.358	-4.766	2.284	IML2_GPS
11.7133	44.3534	0.901	3.587	0.117	0.270	-2.493	1.425	IMOL_GPS
11.7179	44.3475	1.190	3.215	0.038	0.077	-1.111	0.415	ITIM_GPS
11.6468	44.5200	1.505	2.124	0.035	0.048	-1.969	0.205	MEDI_GPS
11.2858	44.8383	0.047	1.454	0.068	0.211	-0.177	0.743	MO05_GPS
11.6465	44.5200	1.062	2.642	0.019	0.041	-1.624	0.285	MSEL_GPS
11.4250	44.3128	1.713	4.694	0.052	0.157	-0.232	0.356	MTRZ_GPS
11.1898	44.6453	1.264	2.753	0.041	0.068	-4.121	0.477	PERS_GPS
11.1910	44.6077	1.890	3.768	0.210	0.317	-14.20	2.197	PRS2_GPS
11.1827	44.6355	1.612	2.226	0.075	0.147	-5.465	0.347	SGIP_GPS
11.5990	44.8330	0.056	2.247	0.115	0.221	-1.922	1.571	UNF0_GPS
11.5592	44.8329	0.265	2.128	0.058	0.108	-1.988	0.630	UNFE_GPS

**Tabella 4.1:** Valori delle velocità di spostamento GPS nelle 3 componenti (con gli errori associati) nel sistema di riferimento Eurasia-fisso per le stazioni analizzate

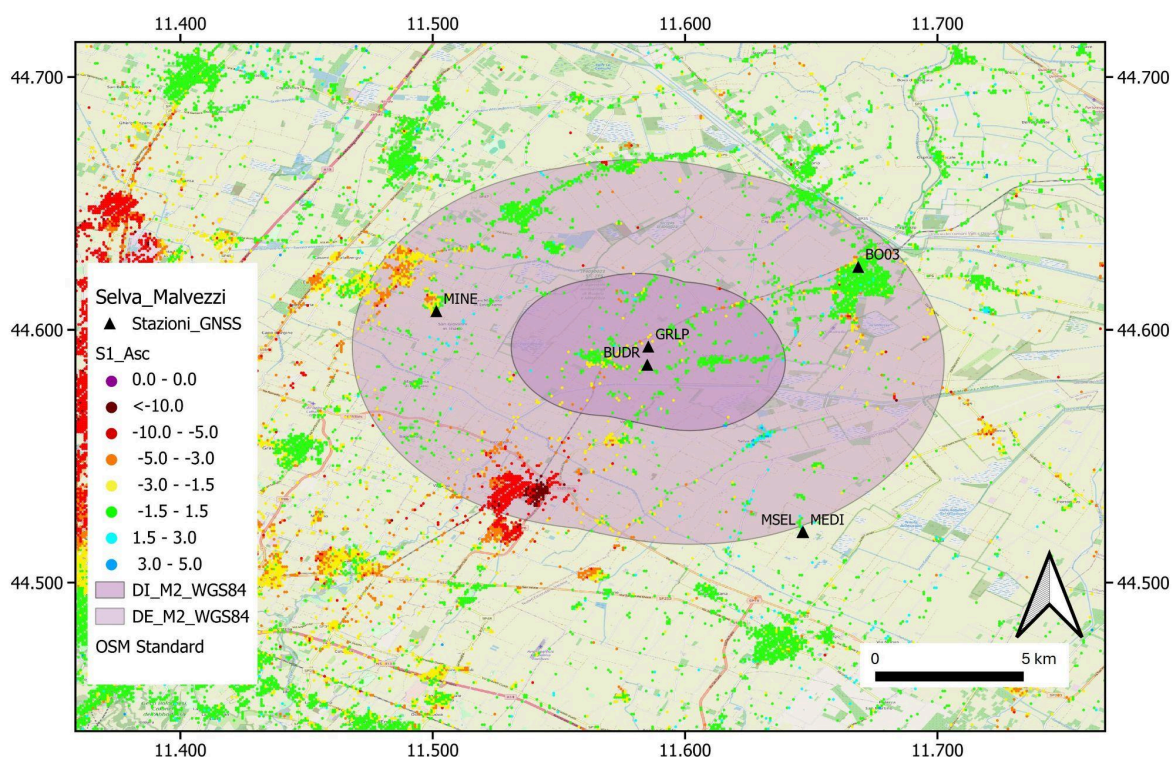
Dal risultato così ottenuto si osserva una generale convergenza in direzione prevalentemente Nord-Sud che va da circa 4-5 mm/anno nell'area del bolognese fino a circa 2-3 mm/anno nella zona di Ferrara, descrivendo la compressione attiva lungo il fronte appenninico settentrionale. All'interno di questo contesto la velocità di GRLP si inserisce in ottimo accordo, dimostrando la buona affidabilità e stabilità della stazione. La leggera discrepanza nella velocità orizzontale rispetto la stazione adiacente BUDR può essere dovuta al fatto che quest'ultima è una stazione molto giovane (installata a metà 2023) con numerosi buchi di acquisizione per cui la stazione

potrebbe necessitare di una maggiore lunghezza temporale di acquisizione per fornire una stima affidabile della velocità a lungo termine (Serpelloni et al., 2022).

Per quanto riguarda infine 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 alcuni casi isolati soprattutto in area pedemontana. 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 e anche possibili effetti di sito. 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.

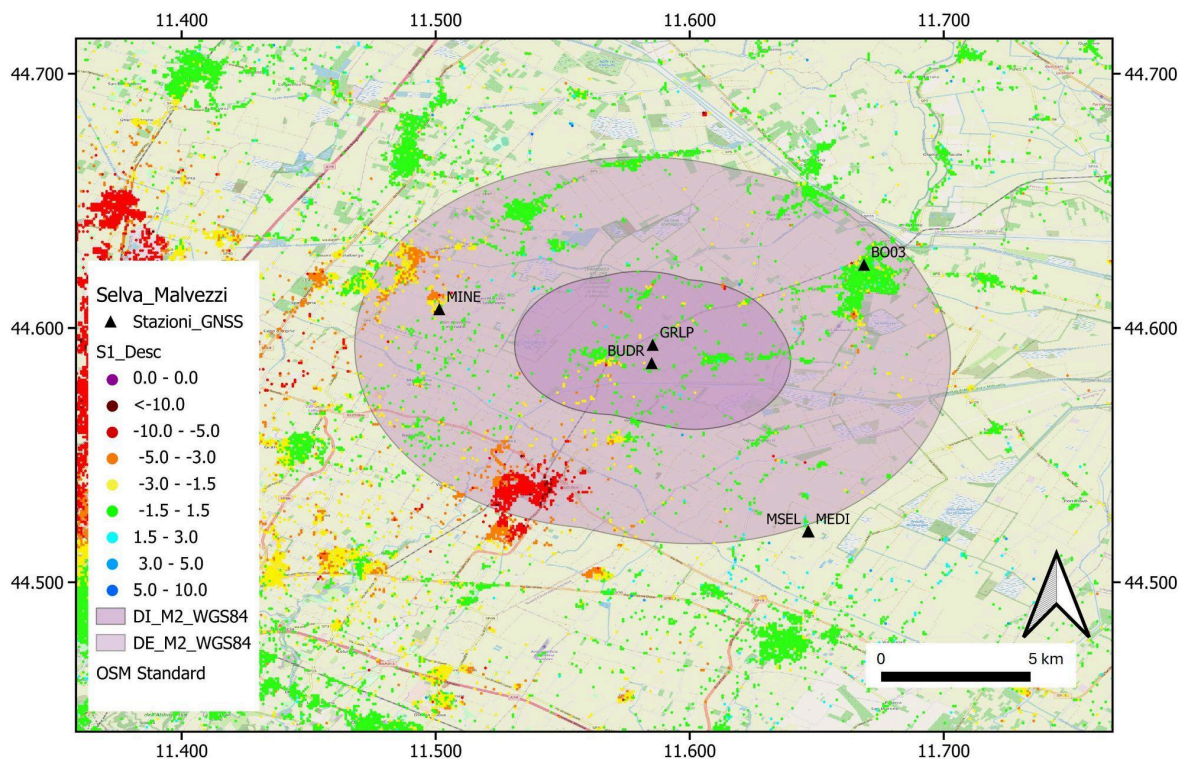
## 4.2 Dati InSAR

Nel terzo semestre, nell'ambito del monitoraggio delle deformazioni del suolo tramite tecniche di interferometria satellitare applicate a dati SAR (*Synthetic Aperture Radar*), 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). Di seguito si riportano le mappe di velocità medie di spostamento del suolo calcolate nelle due geometrie ascendente e discendente (rispettivamente in Figura 4.4 e 4.5). I due dataset Sentinel-1 coprono un intervallo temporale che va da luglio 2017 a settembre 2025.



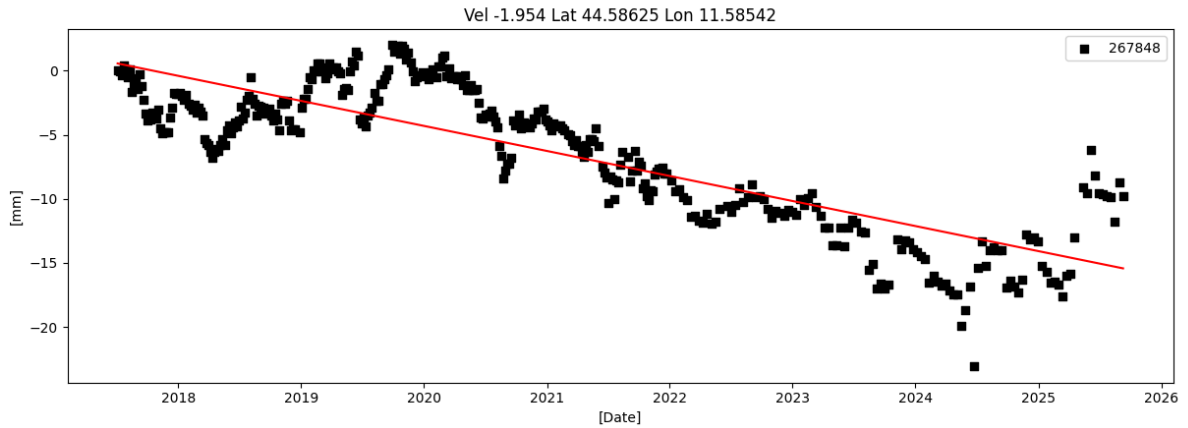
**Figura 4.4.** Mappa della velocità media di spostamento del suolo (mm/anno) dal luglio 2017 a settembre 2025 lungo la linea di vista del satellite (orbita ascendente) calcolata dai dati SAR acquisiti dai satelliti della costellazione Sentinel-1. Valori negativi indicano allontanamento dal satellite, 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).

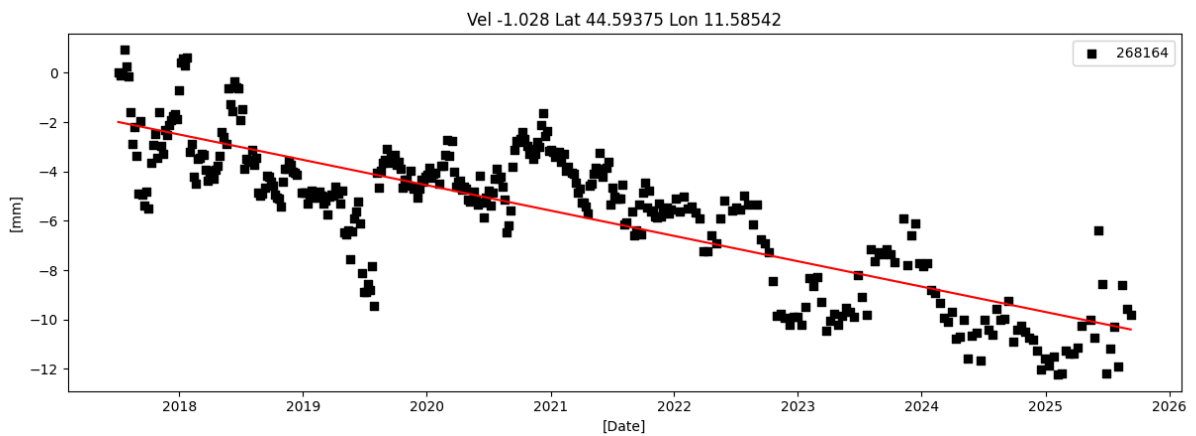


**Figura 4.5.** Mappa della velocità media di spostamento del suolo (mm/anno) dal novembre 2008 a settembre 2025 lungo la linea di vista del satellite (orbita discendente) calcolata dai dati SAR acquisiti dai satelliti della costellazione Sentinel-1. Valori negativi indicano allontanamento dal satellite, 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).

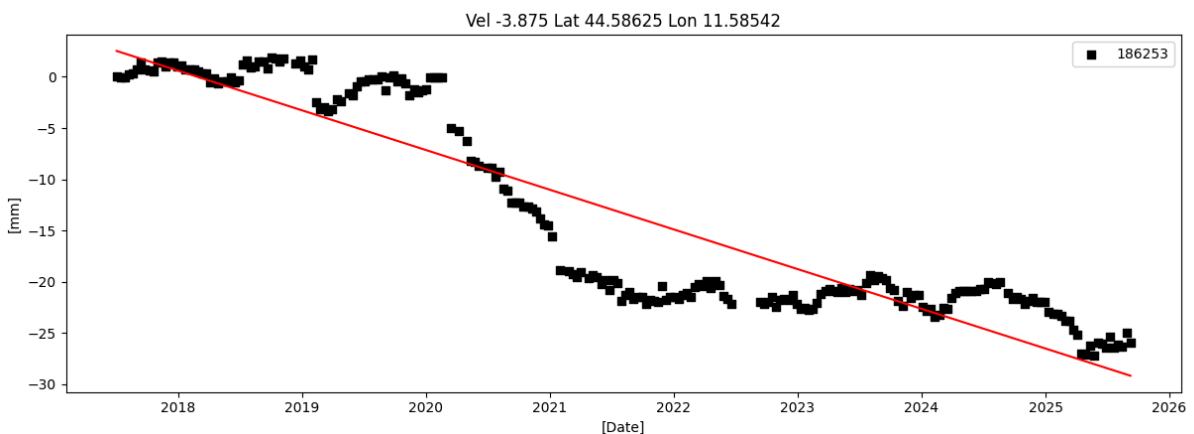
Nelle Figure 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9 sono rappresentati alcuni esempi di serie storiche di spostamento del suolo lungo la linea di vista del satellite, ascendente e discendente, calcolate in prossimità delle stazioni GNSS di BUDR e GRLP, quest'ultima orientativamente ubicata al di sopra della culminazione del giacimento.



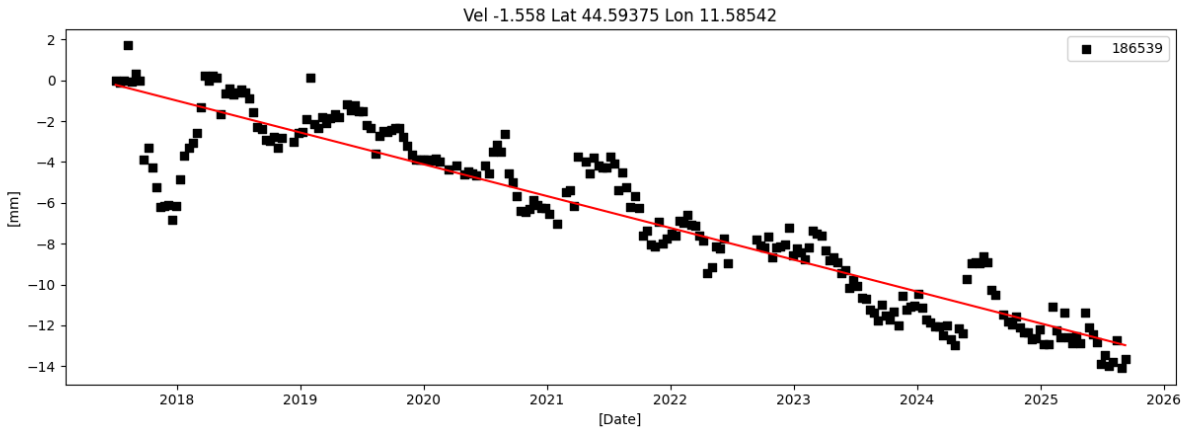
**Figura 4.6.** Serie storica di spostamento del suolo (mm) in cui sono riportati gli spostamenti del suolo nel tempo lungo la linea di vista ascendente del satellite Sentinel-1, calcolati in prossimità della stazione GNSS BUDR. Valori negativi indicano allontanamento dal satellite, viceversa per valori positivi.



**Figura 4.7.** 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.

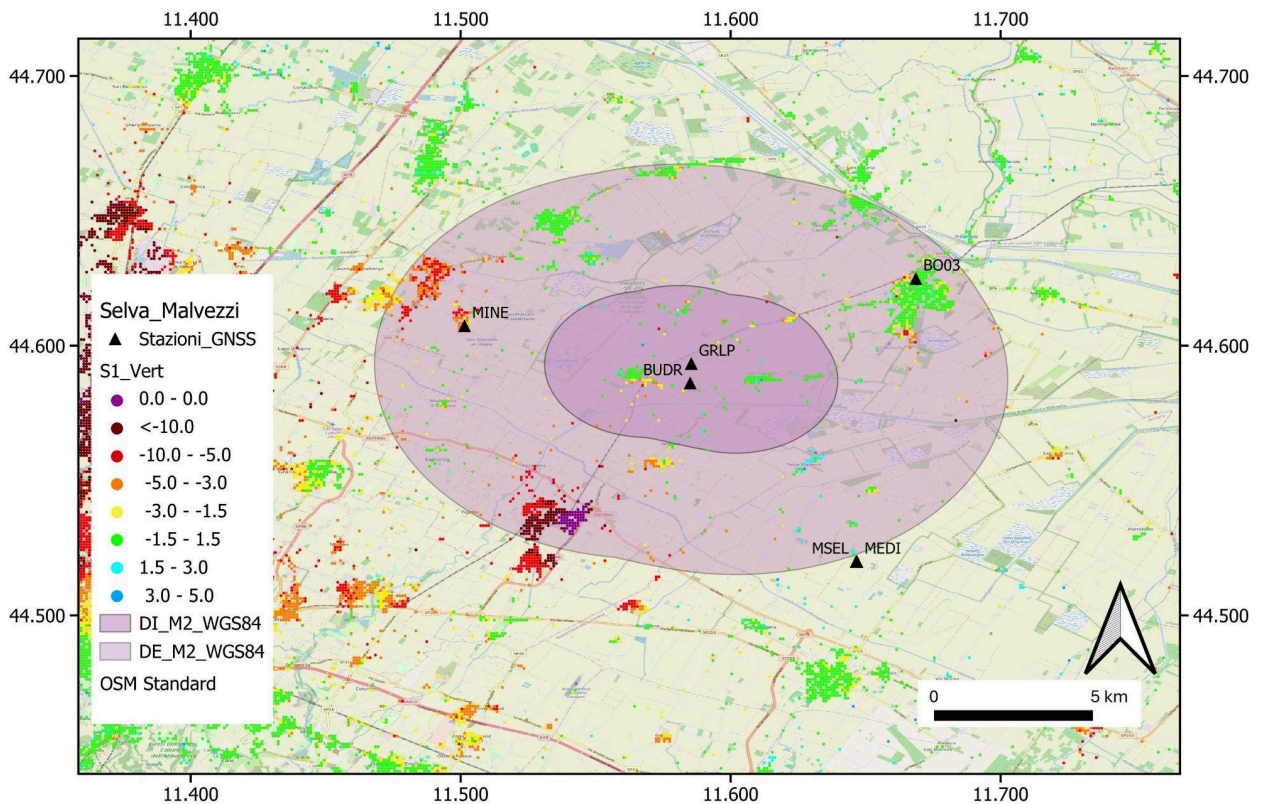


**Figura 4.8.** Serie storica di spostamento del suolo (mm) in cui sono riportati gli spostamenti del suolo nel tempo lungo la linea di vista discendente del satellite Sentinel-1, calcolati in prossimità della stazione GNSS BUDR. Valori negativi indicano allontanamento dal satellite, viceversa per valori positivi.



**Figura 4.9.** 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.

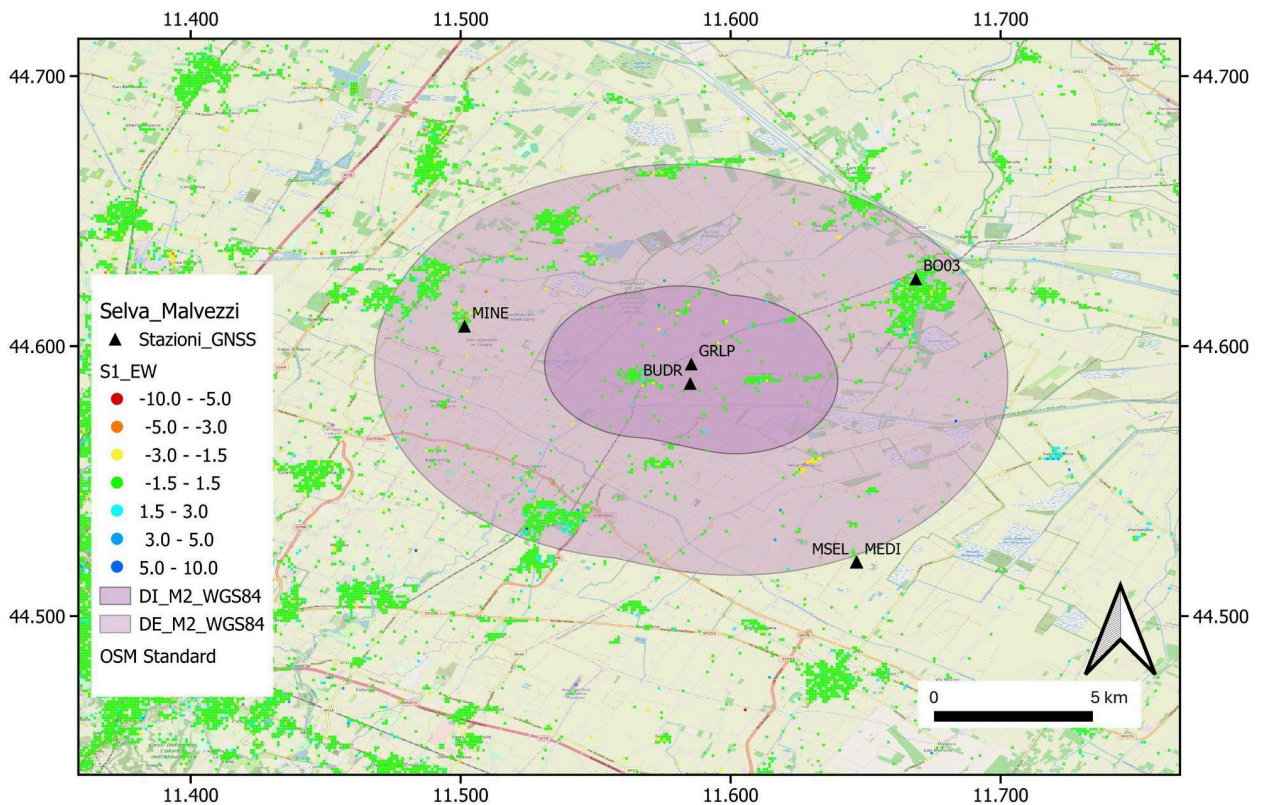
I risultati delle analisi effettuati con i dati Sentinel-1 mostrano spostamenti nell'area di interesse entro circa -3 mm/anno lungo le LOS (*Line of Sight*, linea di vista) per entrambe le geometrie orbitali. Le deformazioni lungo la LOS in prossimità del pozzo PM1d sono inferiori ai 2 mm/anno.



**Figura 4.10.** Mappa della velocità media di spostamento del suolo (mm/anno) dal novembre 2008 a settembre 2025 lungo la componente verticale calcolata dai dati SAR acquisiti dai satelliti della costellazione Sentinel-1. Valori negativi indicano subsidenza, 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).

Le serie storiche mostrano un generale trend lineare di abbassamento del suolo sovrapposto a oscillazioni stagionali. In prossimità della stazione BUDR, lungo la linea di vista discendente si evidenzia un'accelerazione del trend di allontanamento del suolo nel periodo 2020-2021.

Nelle Figure 4.10 e 4.11 si mostrano rispettivamente le componenti verticale e orizzontale (est-ovest) della velocità di spostamento del suolo.



**Figura 4.11.** *Mappa della velocità media di spostamento del suolo (mm/anno) dal novembre 2008 a settembre 2025 lungo la componente orizzontale (est-ovest) calcolata dai dati SAR acquisiti dai satelliti della costellazione Sentinel-1. Valori negativi indicano spostamenti verso ovest, 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).*

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.

### 4.3 Cedimento del terreno e livello di falda

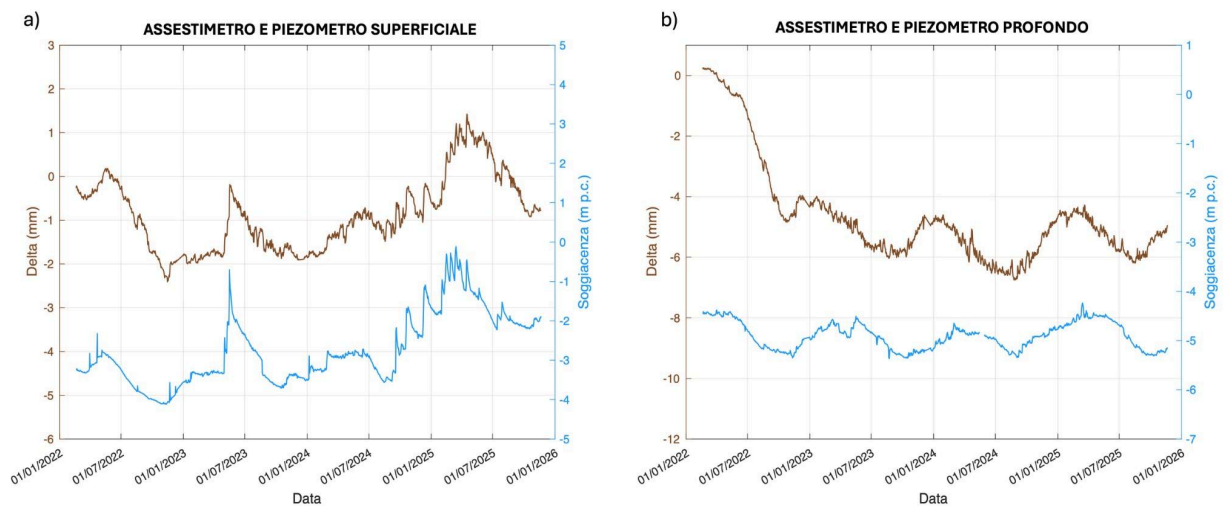
Presentiamo le analisi dei dati acquisiti dai due assestimetri e due piezometri ubicati nella piazzola di perforazione, in prossimità del pozzo PM1d (Tabella 4.2), che forniscono anche temperatura e conducibilità dell'acqua e temperatura del terreno.

Per effettuare le analisi comparative fra abbassamento e sollevamento del piano campagna (delta) e variazioni del livello di falda rispetto al piano campagna (soggiacenza), i dati orari ricevuti sono stati filtrati attraverso un metodo statistico standard per eliminare i valori fuori scala, i valori mancanti sono stati calcolati attraverso interpolazione lineare, ed infine sono state valutate le medie giornaliere (Figura 4.12). In aggiunta, il delta relativo all'assestometro profondo (Figura 4.12b) è stato corretto eliminando le variazioni di spessore della parte più superficiale del terreno, ottenendo il delta residuale (differenza fra delta misurato dall'assestometro profondo e delta misurato dall'assestometro superficiale).

Strumento	Profondità (m dal p.c.)	Dato	Periodo
Assestometro	10 (AS) / 140 (AP)	Delta (mm)	17/02/2022 - 9/12/2025
Piezometro	9 (PS) / 90 (PP)	Soggiacenza (m)	18/02/2022 - 9/12/2025

**Tabella 4.2.** Informazioni relative ai dati di cedimento del terreno e andamento della falda acquifera. Acronimi: AS: Assestometro Superficiale; AP: Assestometro Profondo; PS: Piezometro Superficiale; PP: Piezometro Profondo.

La Figura 4.12a mostra che l'abbassamento e l'innalzamento del piano campagna misurato nella parte superficiale del terreno (10 m di spessore) variano in concomitanza alle oscillazioni della falda superficiale: quando il livello della falda si alza, il terreno si dilata e si solleva, mentre quando il livello di falda si abbassa, il terreno si comprime e si abbassa. Il terreno risponde alle variazioni della quantità d'acqua di infiltrazione come un mezzo poroso ed elastico.



**Figura 4.12.** Serie temporali dei dati acquisiti dall'assestometro (delta) e dal piezometro (soggiacenza) nelle porzioni superficiali (a) e profonde (b) del terreno. L'intervallo temporale dei dati va dal 19/02/2022 al 21/11/2025. L'abbreviazione p.c. indica il piano campagna.

La Figura 4.12b mostra che il delta residuale e la falda profonda oscillano con periodicità annuale e che i picchi delle oscillazioni non coincidono perfettamente, ma sono sfasati tra di loro. L'oscillazione annuale della falda è in linea con la stagionalità degli acquiferi della pianura, che si

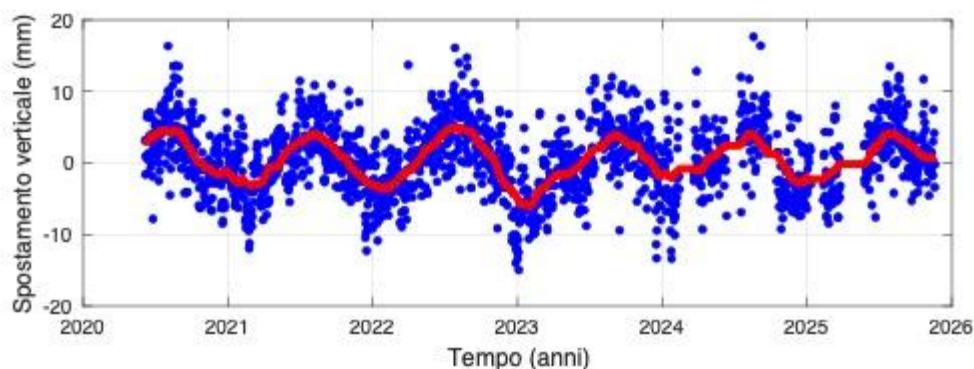
ricaricano in inverno/primavera per effetto delle piogge e si riducono in estate anche per effetto dell'irrigazione. Invece, non è chiara al momento la causa dello sfasamento fra i segnali.

Le serie temporali ottenute dai due strumenti sono molto simili tra loro e mostrano coefficienti di correlazione molto alti: 0,85 e 0,95 rispettivamente per sensori superficiali e profondi (dove valori prossimi allo 0 indicano poca somiglianza, valori prossimi a 1/-1 caratterizzano segnali simili e correlati/anti-correlati). Attraverso il calcolo della cross-correlazione tra le due coppie di segnali non otteniamo una stima affidabile di un possibile sfasamento tra nessuna delle due coppie, risultato imputabile alla variabilità delle quattro serie nel tempo che rende necessaria l'esecuzione di analisi più approfondite.

#### 4.4 Confronto fra dati di deformazione e dati di altra natura

Al fine di identificare correlazioni significative fra dati di natura diversa e risalire ai possibili processi fisici agenti, la componente verticale della serie temporale di spostamento della stazione GRLP risultata dalla rimozione di un termine lineare (cfr. Par. 4.1) è stata utilizzata nel confronto con altri parametri (e.g., meteorologici e idrogeologici), seguendo una metodologia *data-driven* (priva cioè di modelli concettuali definiti a priori ma basandosi solamente sull'analisi del dato misurato) già utilizzata in altre zone della pianura padana (Vitagliano et al., 2020; 2022).

Il termine periodico della componente verticale dello spostamento, da qui in avanti indicata come segnale geodetico o serie geodetica, è caratterizzato da una oscillazione di periodo annuale che raggiunge il picco massimo in corrispondenza del mese di agosto (Figura 4.15).

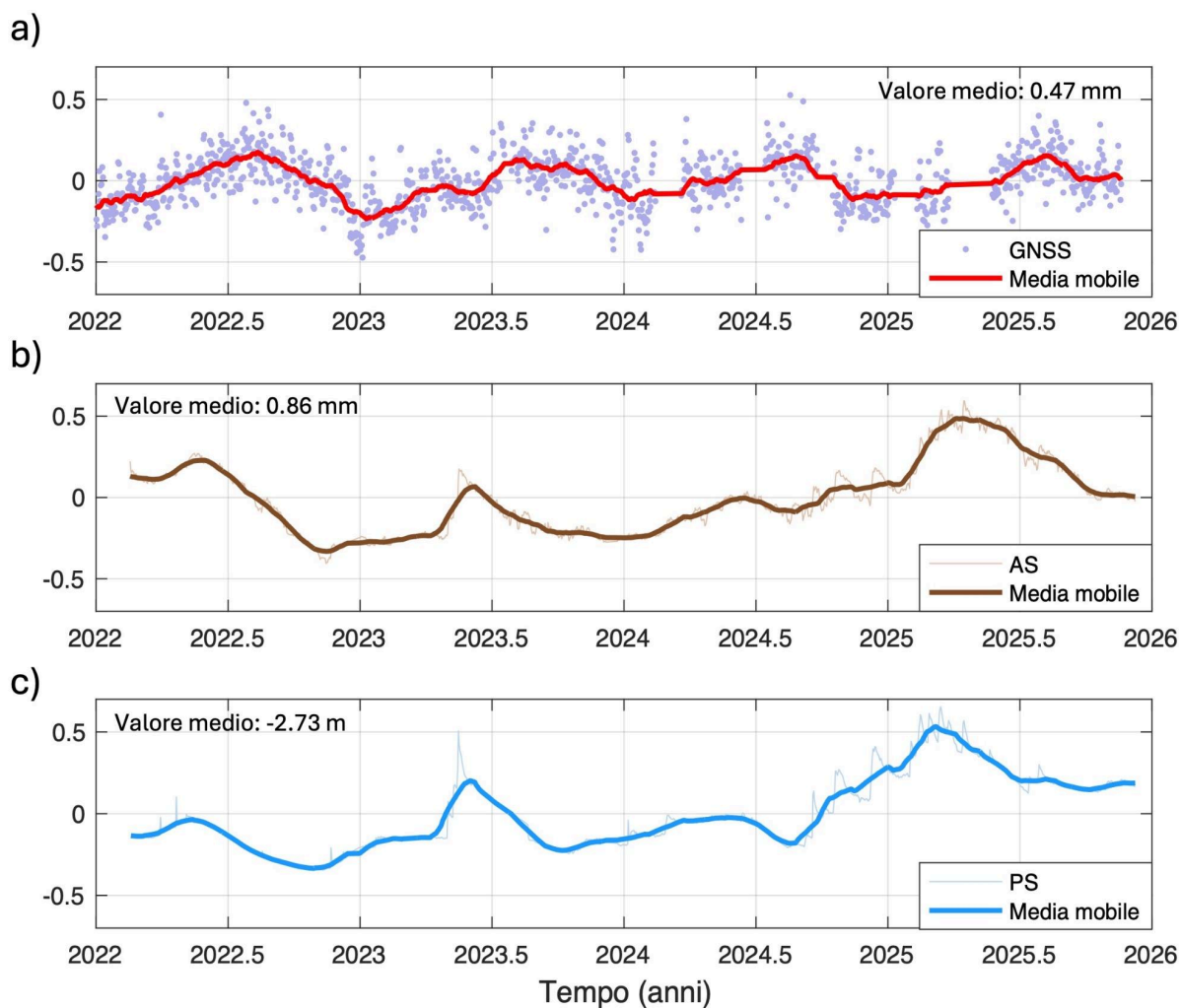


**Figura 4.15.** Termine periodico della componente verticale dello spostamento riferito alla stazione GRLP (cerchi blu). Il termine periodico è stato ottenuto rimuovendo il termine lineare dai dati originali (cfr. Par. 4.1). La linea rossa rappresenta la media mobile centrata con finestra mobile pari a 3 mesi.

Inizialmente, la serie geodetica è stata confrontata con i dati ricevuti dal Concessionario e, in particolare, con la serie giornaliera della soggiacenza riferita al piezometro superficiale e con quella del delta del terreno riferito all'assestometro superficiale (cfr. Par. 4.3 per ulteriori dettagli). Per le tre serie, sono stati calcolati i valori normalizzati rispetto al valor medio e le medie mobili centrate ottenute con finestra mobile pari a 1.5 mesi (Figura 4.16). I risultati del confronto qualitativo mostrano che l'andamento del delta (Figura 4.16b) e della soggiacenza (Figura 4.16c)

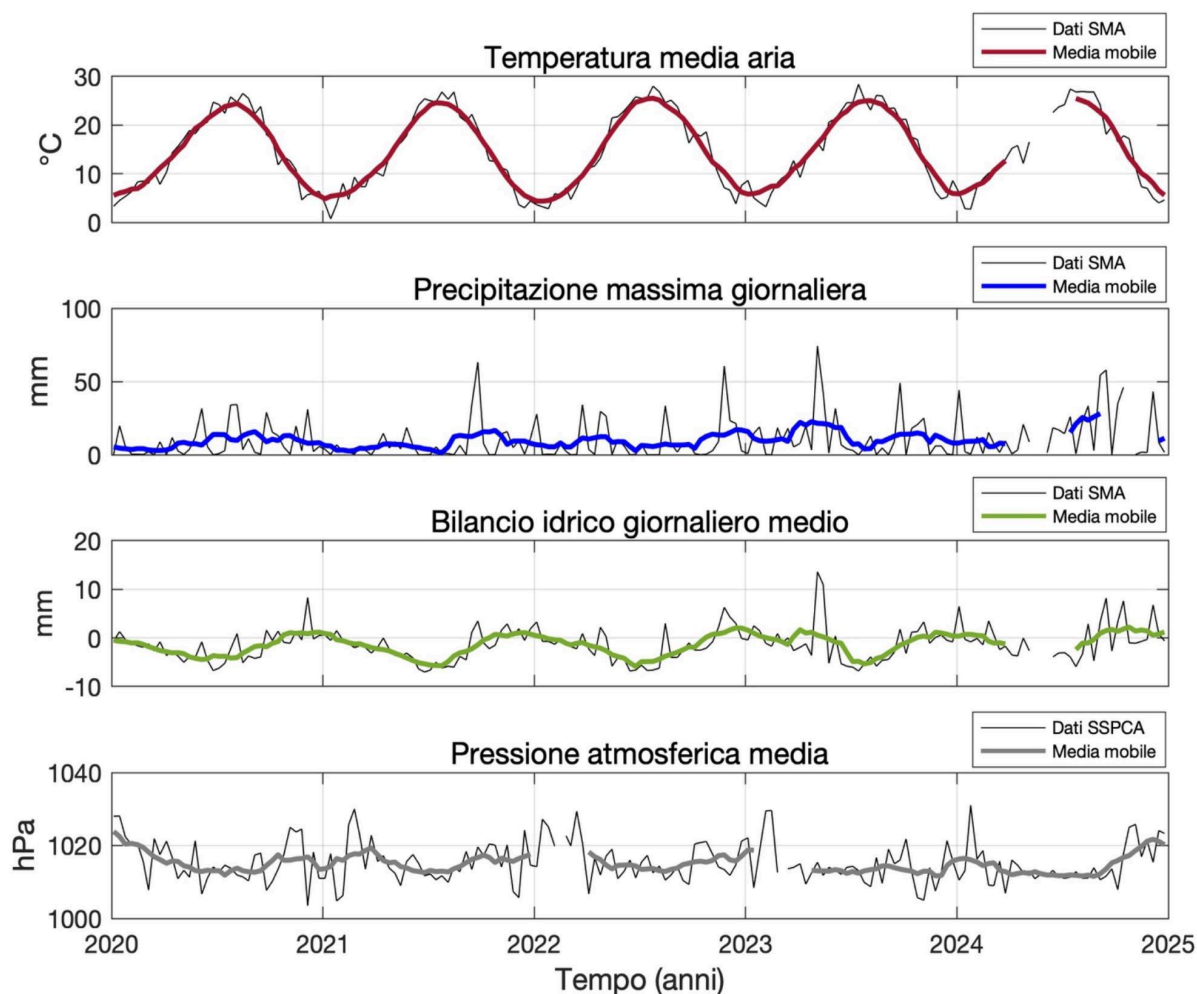
sono ben correlati tra di loro (come già evidenziato nel Par. 4.3), mentre non correlano in modo significativo con la serie geodetica (Figura 4.16a).

Successivamente, la serie geodetica è stata confrontata con parametri di natura climatica acquisiti dalle stazioni meteo-climatiche di Mezzolara Agro, Comune di Budrio, e S. Pietro Capofiume Agro, Comune di Molinella, disponibili nel portale del sistema nazionale per l'elaborazione e la diffusione dei dati climatici (Portale Ispra-Scia).



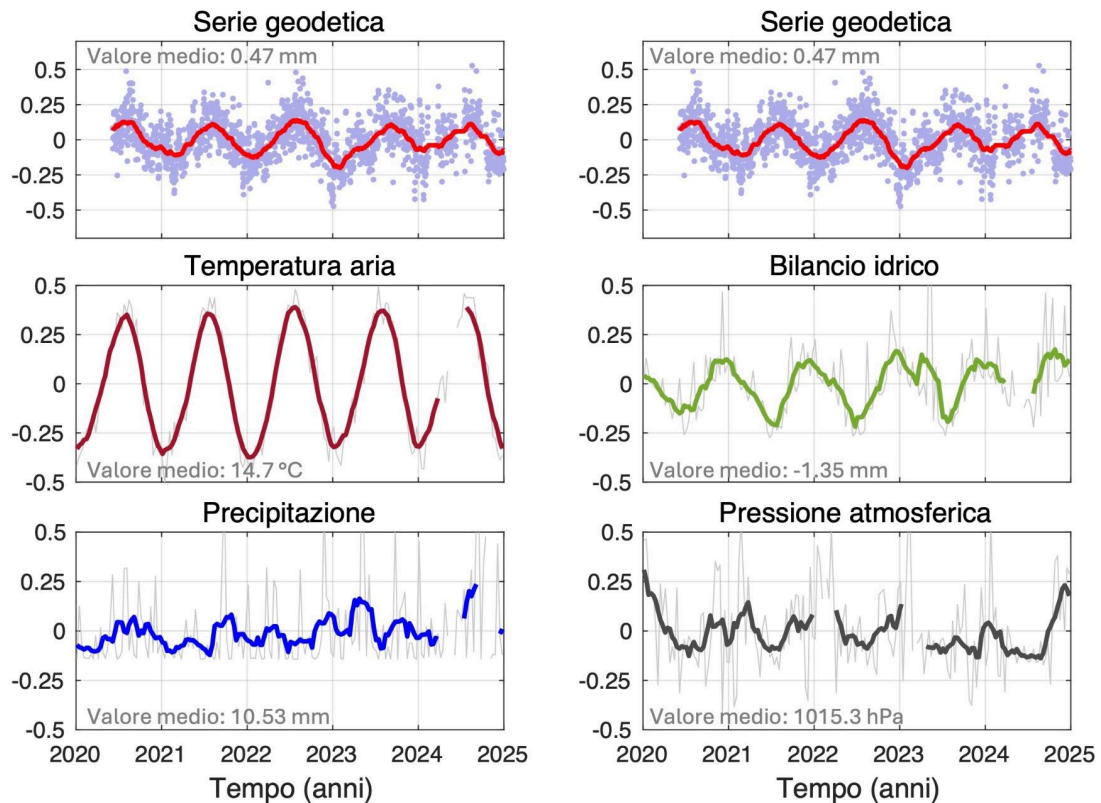
**Figura 4.16.** Confronto tra le serie normalizzate: a) geodetica (GNSS), b) geotecnica (AS) e c) idrogeologica (PS), con anche le relative medie mobili centrate. Le serie sono state normalizzate rispetto al valore medio (indicato in figura), mentre le medie mobili sono state ottenute utilizzando una finestra mobile di 1.5 mesi. Acronimi: GNSS, dato geodetico della stazione GRLP; AS, delta riferito all'assestimento superficiale; PS, soggiacenza riferita al piezometro superficiale.

I dati vanno da gennaio 2020 a dicembre 2024, hanno cadenza decadale e si riferiscono a temperatura media dell'aria, bilancio idrico giornaliero medio, precipitazione massima giornaliera e pressione atmosferica media (Figura 4.17).



**Figura 4.17.** Serie temporali climatiche utilizzate nell'analisi comparativa con la serie geodetica. I dati (linee nere) sono disponibili online (Portale Ispra-Scia) e hanno una frequenza decadale. Le linee colorate corrispondono alle medie mobili centrate, calcolate con finestra mobile di 3 mesi. Acronimi: SMA, stazione di Mezzolara Agro; SSPCA, stazione di S. Pietro Capofiume Agro.

Analogamente a quanto fatto con i parametri precedenti, le serie climatiche sono state normalizzate rispetto al valore medio e sono state confrontate con il segnale geodetico. La Figura 4.18 mostra che le oscillazioni del segnale geodetico: 1) sono in fase con le variazioni dell'andamento della temperatura dell'aria registrata a 2 metri dal suolo; 2) sono in opposizione di fase con il bilancio idrico; 3) non correlano in modo chiaro con le piogge; 4) sebbene la disomogenea distribuzione del dato, sembrano avere un andamento in opposizione di fase con la pressione atmosferica.



**Figura 4.18.** Confronto tra segnale geodetico, temperatura media dell'aria, bilancio idrico giornaliero medio, precipitazione massima giornaliera e pressione atmosferica media. I dati climatici, disponibili online (Portale Ispra-Scia), sono stati normalizzati rispetto alla media (indicata in figura). Le linee colorate rappresentano la media mobile centrata, ottenuta con finestra mobile di 3 mesi.

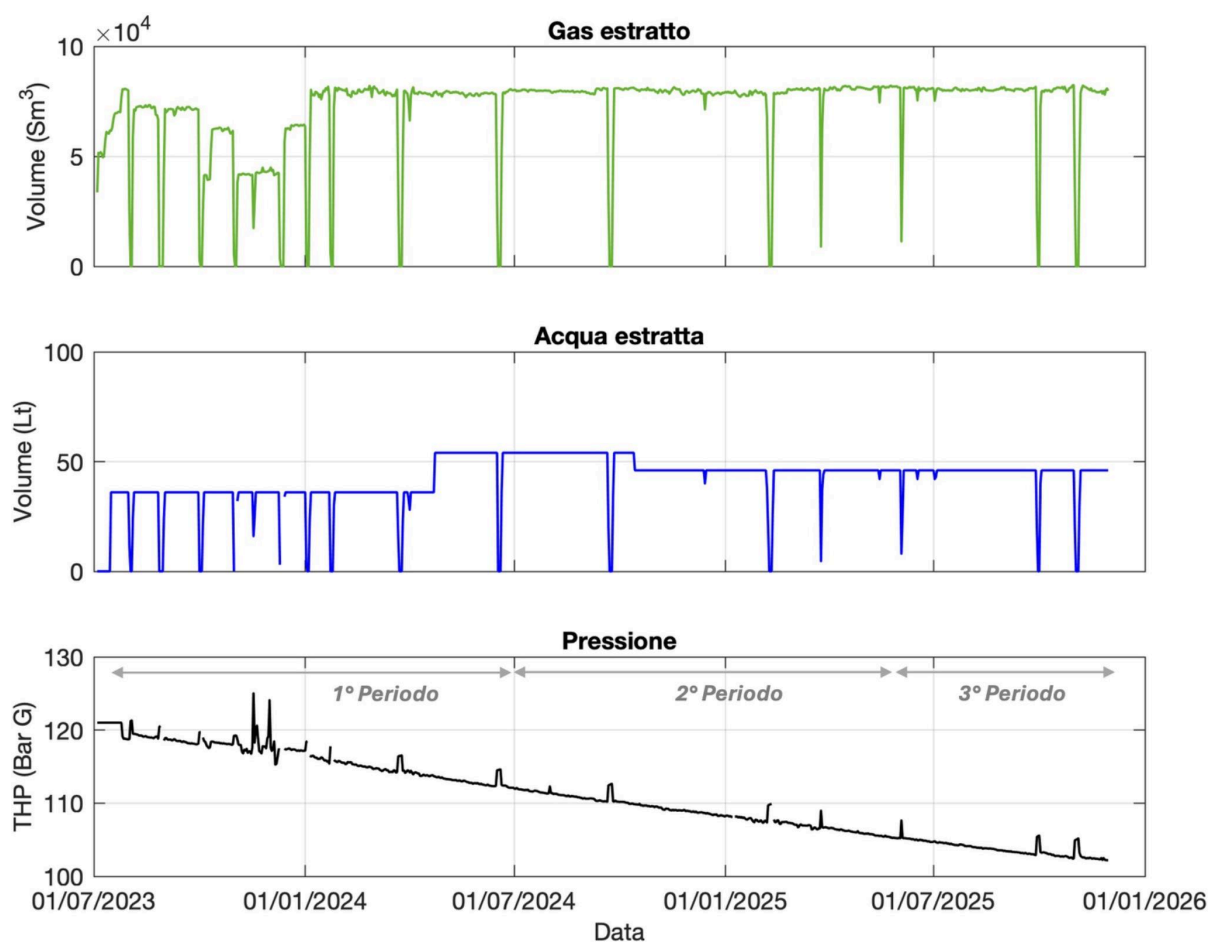
Rispetto ai processi che possono aver causato la deformazione geodetica osservata, in relazione ai dati esaminati e ai risultati ottenuti dall'analisi comparativa si può risalire a due possibili meccanismi fisici: il primo di espansione/contrazione termica e il secondo di carico idrologico. Infatti, la buona correlazione tra serie geodetica e temperatura dell'aria mostrata in Figura 4.18 consente di ipotizzare un processo di espansione e contrazione termica della monumentazione e del terreno sottostante (e.g., Romagnoli et al., 2003; Yan et al., 2009). Inoltre, l'anti-correlazione con il bilancio idrico evidenziata nella stessa figura permette di ipotizzare un processo di carico idrologico che agisce nei primi decimetri di suolo, specialmente in presenza di suoli ricchi in sedimenti a granulometria fine, come nel caso dell'area del giacimento. La quantità d'acqua piovana che rimane immagazzinata nella parte più superficiale del terreno e che non subisce evapotraspirazione costituisce un carico che spinge il suolo verso il basso durante i periodi umidi. Rimosso questo carico durante i periodi secchi, il suolo si muove verso l'alto. Il bilancio idrico esprime proprio la relazione tra precipitazioni ed evapotraspirazione, un parametro che a sua volta è controllato direttamente dalla temperatura. Rispetto all'entità dell'oscillazione, l'ampiezza dell'oscillazione, riferita a entrambi i contributi e calcolata utilizzando modelli fisicamente basati in aree limitrofe della pianura e del delta del fiume Po, è compatibile con quanto osservato nel segnale geodetico della stazione GRLP (e.g., Romagnoli et al., 2003; Vitagliano et al. 2022). La

serie geodetica potrebbe tuttavia essere influenzata da altri fenomeni di minore rilevanza, quali ad esempio il carico atmosferico, come indicato dalla tenue anti-correlazione con l'andamento della pressione atmosferica (Figura 4.18) o dalla compattazione di livelli torbosi, che non sono stati al momento trattati.

## 5 Analisi di dati di pressione e portata

### 5.1 Produzione e pressioni

Il Concessionario ha fornito alla SPM i volumi giornalieri e mensili di gas ed acqua prodotti dai livelli C1 e C2 del pozzo PM1d e i relativi dati di pressioni fino al 30/11/2025 (Figura 5.1).

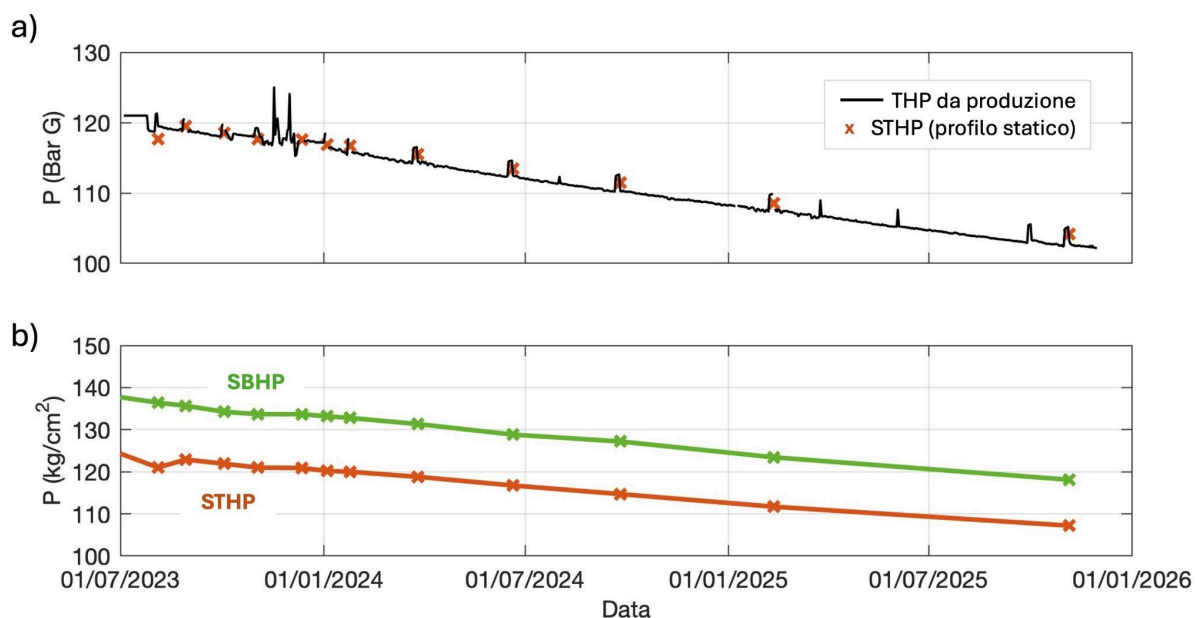


**Figura 5.1.** Volumi di gas e di acqua prodotti dal livello C2 del pozzo Podere Maiar 1 dir e relativi valori di pressione (THP). Il periodo dei dati va dal 1/7/2023 al 30/11/2025. Il livello C1 ha valori nulli nello stesso periodo. La pressione è espressa in bar relativi.

Gli ultimi dati trasmessi fanno riferimento al periodo giugno 2025 - novembre 2025 (3° periodo) e sono generalmente in linea con i valori trasmessi in precedenza (1° periodo: luglio 2023 – giugno 2024; 2° periodo: luglio 2024 - maggio 2025). In particolare, il decremento o tasso di pressione annuale, ottenuto con interpolazione lineare nei tre periodi di ricezione dei dati, risulta pari a

-8.3±0.3 bar/anno nel 1° periodo, -7.3±0.2 bar/anno nel 2° periodo e -5.7±0.5 bar/anno nel 3° periodo. La marcata diminuzione del decremento di pressione nel 3° periodo rispetto ai periodi precedenti è ascrivibile alle due fasi di fermo produzione avvenute tra fine settembre - inizio ottobre 2025 e a inizio novembre 2025 e alla conseguente risalita di pressioni.

Per quanto riguarda il profilo statico e dinamico della pressione e della temperatura di PM1d, è stata fornita una ulteriore misura statica di pressione acquisita a novembre 2025. Quest'ultima misura e, più in generale, tutte le misure statiche acquisite anche nei periodi precedenti e riferite alla testa del tubaggio (STHP) sono in linea con i valori di pressione riferiti alla testa del tubaggio (THP) misurati durante la produzione del gas (Figura 5.2a). In aggiunta, il decremento di pressione calcolato utilizzando le misure STHP sull'intero periodo (giugno 2023 - novembre 2025) è pari a -6.9±0.7 bar/anno e risulta confrontabile con quello relativo al periodo precedente di -7.1±1.0 bar/anno (giugno 2023 - maggio 2025). Infine, l'andamento delle misure statiche di pressione riferite alla testa del tubaggio (STHP) è in linea con quello delle pressioni statiche riferite ad una profondità media di 1269.9 metri (TVD) a fondo pozzo (SBHP).



**Figura 5.2.** Misure di pressione ottenute dai gradienti statici: a) confronto tra i valori statici di pressione (STHP) e i valori di pressione (THP) misurati durante la produzione del gas; b) confronto tra i valori statici di pressione riferiti alla testa del tubaggio (STHP) e ad una profondità media di 1269.9 metri (TVD) a fondo pozzo (SBHP). Il periodo dei dati va dal 1/7/2023 al 30/11/2025. Nei grafici a) e b), la pressione è espressa rispettivamente in bar relativi e in kilogrammi/cm<sup>2</sup>.

Infine, ulteriori analisi, in linea con quanto indicato nel Cap. 2 degli ILG e finalizzate alla valutazione dell'evoluzione delle pressioni di poro nello spazio e nel tempo, nonché alla comprensione di eventuali fenomeni di interferenza con pozzi limitrofi, sono rinviate a una fase successiva delle attività. Tale fase si baserà sull'integrazione delle informazioni già trasmesse dal Concessionario (ad es. dati P1000 relativi ai pozzi pregressi) e di ulteriori dati da acquisire con riferimento alla geologia del sottosuolo. Allo stato attuale, sebbene siano disponibili dati puntuali

di pressione, temperatura e chimismo dei fluidi forniti dal Concessionario, l'assenza di un modello geologico del sottosuolo nell'area del giacimento e, più in generale, dell'intera concessione non consente una ricostruzione coerente del campo delle pressioni di poro nei corpi geologici sepolti e delle relative anomalie. Considerata la sismicità dell'area, tale ricostruzione rappresenta un aspetto rilevante nell'ambito del monitoraggio delle pressioni.

## 6 Considerazioni finali

### 6.1 Monitoraggio sismologico

Sono state eseguite diverse simulazioni volte a testare la capacità di detezione della rete sismica integrata con piccole modifiche mirate per renderla rispondente ai requisiti degli ILG (cap. 5.3, punti 1 e 2). Dai test effettuati sembra che un'installazione in pozzi profondi qualche decina di metri dei sensori (la profondità effettiva deve essere valutata sulla base di esperimenti sul campo) potrebbe portare ad una riduzione del rumore registrato tale da permettere la detezione di eventi sismici con  $0 \leq ML \leq 1$  (cap. 5.3 punto 1, ILG). Inoltre l'aggiunta di 4 stazioni posizionate esternamente al DE in punti non troppo distanti da quelli mostrati nella mappa di Figura 2.2d, consentirebbe di estendere la zona di detezione degli eventi sismici di minima magnitudo a tutto il DE (cap. 5.3 punto 2, ILG)

Le stazioni della rete sismica locale mostrano una buona qualità e continuità del dato confermando quanto già osservato nelle precedenti relazioni semestrali. Si evidenzia solo un comportamento anomalo per la componente N del sensore SMV04, per la quale riteniamo opportuno indagare su quali possano essere le cause.

In questo terzo semestre non sono stati registrati eventi sismici nei domini di monitoraggio, e anche considerando i periodi precedenti, dall'inizio del monitoraggio 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, come proposto 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.

I risultati del monitoraggio svolto tramite tecniche di interferometria satellitare effettuato con i dati Sentinel-1 evidenziano un quadro deformativo caratterizzato da spostamenti entro 2

mm/anno lungo le LOS per entrambe le geometrie orbitali, nell'area prossima al pozzo PM1d. Tali valori non evidenziano variazioni rilevanti delle deformazioni in atto rispetto a quanto riportato nell'analisi presentata nel precedente rapporto semestrale 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 la dilatazione/contrazione del terreno.

Inoltre, come richiesto dal MASE durante la riunione di comitato del 22 luglio 2025 (cfr. verbale relativo), il dato di deformazione del suolo è stato integrato per confronto con i dati assestimetrici e piezometrici forniti dal Concessionario. I risultati di una analisi comparativa semi-quantitativa ha evidenziato che, nel periodo 2022-2025, non si osserva una buona correlazione tra la serie geodetica della stazione GRLP, il delta del terreno misurato dall'assestometro superficiale e la soggiacenza misurata dal piezometro superficiale. Nell'ottica di comprendere la natura dei processi che influenzano l'oscillazione geodetica, è stata condotta anche un'analisi comparativa utilizzando parametri climatici disponibili sul web (Portale Ispra-Scia). Tale analisi ha mostrato che, tra il 2020 e il 2024, il segnale geodetico correla con la temperatura dell'aria e anti-correla con il bilancio idrico. Questo risultato, anche se preliminare, consente di ipotizzare un processo di espansione e contrazione termica della monumentazione e del terreno sottostante assieme ad un processo di carico idrologico che agisce in prossimità del suolo. Entrambi i fenomeni sono stati riscontrati in altre aree limitrofe della pianura padana e in parte verificati con modelli fisicamente basati.

### 6.3 Monitoraggio delle pressioni di poro

Le misure di pressione di poro riferite al periodo giugno 2025 - novembre 2025 non presentano particolari anomalie e sono in linea con le misure del periodo precedente (luglio 2024 - maggio 2025). Inoltre, le due fasi di fermo produzione avvenute tra fine settembre - inizio ottobre 2025 e a inizio novembre 2025 possono aver influenzato la variazione di pressione nel tempo (tasso annuale) come dimostra la diminuzione del tasso di pressione nell'ultimo periodo, rispetto ai periodi precedenti.

# Glossario

<b>AQ:</b>	Accordo Quadro
<b>ASI:</b>	<i>Agenzia Spaziale Italiana</i>
<b>CMS:</b>	Centro di Monitoraggio per le attività di Sottosuolo
<b>DE:</b>	Dominio Esteso
<b>DI:</b>	Dominio Interno
<b>ESA:</b>	<i>Agenzia Spaziale Europea</i>
<b>GNSS:</b>	<i>Global Navigation Satellite System</i>
<b>GPS:</b>	<i>Global Positioning System</i>
<b>IGS:</b>	<i>International GNSS Service</i>
<b>ILG:</b>	Indirizzi e Linee Guida per il Monitoraggio della sismicità delle Deformazioni del Suolo e delle pressioni di poro nell'ambito delle attività antropiche (Dialuce et al., 2014)
<b>InSAR:</b>	<i>Interferometric SAR</i>
<b>INGV:</b>	Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
<b>IV:</b>	Sigla rete (NW-Code) RSN (INGV)
<b>LOS:</b>	Line of Sight - Linea di vista
<b>M2:</b>	Sigla rete (NW-Code) concessione Selva Malvezzi
<b>MASE:</b>	Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica
<b>ML:</b>	Magnitudo Locale
<b>MP1:</b>	<i>Multipath portante L1 GPS</i>
<b>MP2:</b>	<i>Multipath portante L2 GPS</i>
<b>NW:</b>	<i>Network</i>
<b>PGA:</b>	<i>Peak Ground Acceleration</i>
<b>PGV:</b>	<i>Peak Ground Velocity</i>
<b>PM1d:</b>	<i>Pozzo Podere Maiar 1 dir</i>
<b>PPSD:</b>	<i>Probability Power Spectral Density</i>
<b>RINEX:</b>	<i>Receiver INdependent EXchange</i>
<b>RING:</b>	Rete Nazionale Integrata GPS
<b>RMS:</b>	<i>Root Mean Square</i>
<b>RSN:</b>	Rete Sismica Nazionale (INGV)
<b>SAR:</b>	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
<b>SBAS:</b>	<i>Small BAseline Subset</i>
<b>SBHP:</b>	<i>Static Bottom Hole Pressure</i> - pressione a fondo pozzo
<b>SPM:</b>	Struttura Preposta al Monitoraggio
<b>STHP:</b>	<i>Static Tubing Head Pressure</i> - pressione a testa pozzo
<b>THP:</b>	<i>Tubing Head Pressure</i> - pressione a testa pozzo
<b>TLS:</b>	<i>Traffic Light System</i> - sistema a semaforo
<b>TVD:</b>	<i>Total Vertical Depth</i>

# Bibliografia

- 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>.
- 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.mise.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>
- Portale Ispra-Scia, disponibile al link: <https://scia.isprambiente.it/>. (ultimo accesso: Dicembre 2025)
- 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.
- Romagnoli, C., Zerbini, S., Lago, L., Richter, B., Simon, D., Domenichini, F., Elmi, C., Ghirotti, M., (2003). Influence of soil consolidation and thermal expansion effects on height and gravity variations. *J. Geodyn.*, 35, 521–539.
- Rossi C., Grigoli F., Gasperini P., Gandolfi S., Cocorullo C., Gukov T., and Macini P., (2023). Seismic Noise Reduction as a Function of Depth Recorded by a Vertical Array Installed in a 285-m-Deep Borehole at a Gas Storage Field in Northern Italy. *Seismol. Res. Lett.*, 94, 1925-1935, doi: 10.1785/0220220337.
- 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.
- Vitagliano, E., Riccardi, U., Piegari, E., Boy, J.-P., Di Maio, R., (2020). Multi-Component and Multi-Source Approach for Studying Land Subsidence in Deltas. *Remote Sens.*, 12, 1465.
- Vitagliano, E., Vitale, E., Russo, G., Piccinini, L., Fabris, M., Calcaterra, D., Di Maio, R., (2022). Analysis of the Periodic Component of Vertical Land Motion in the Po Delta (Northern Italy) by GNSS and Hydrological Data. *Remote Sens.*, 14, 1126.
- Yan, H., Chen, W., Zhu, Y., Zhang, W., Zhong, M. (2009). Contributions of thermal expansion of monuments and nearby bedrock to observed GPS height changes. *Geophys. Res. Lett.*, 36, L13301.