Accordo Quadro 2024-2028

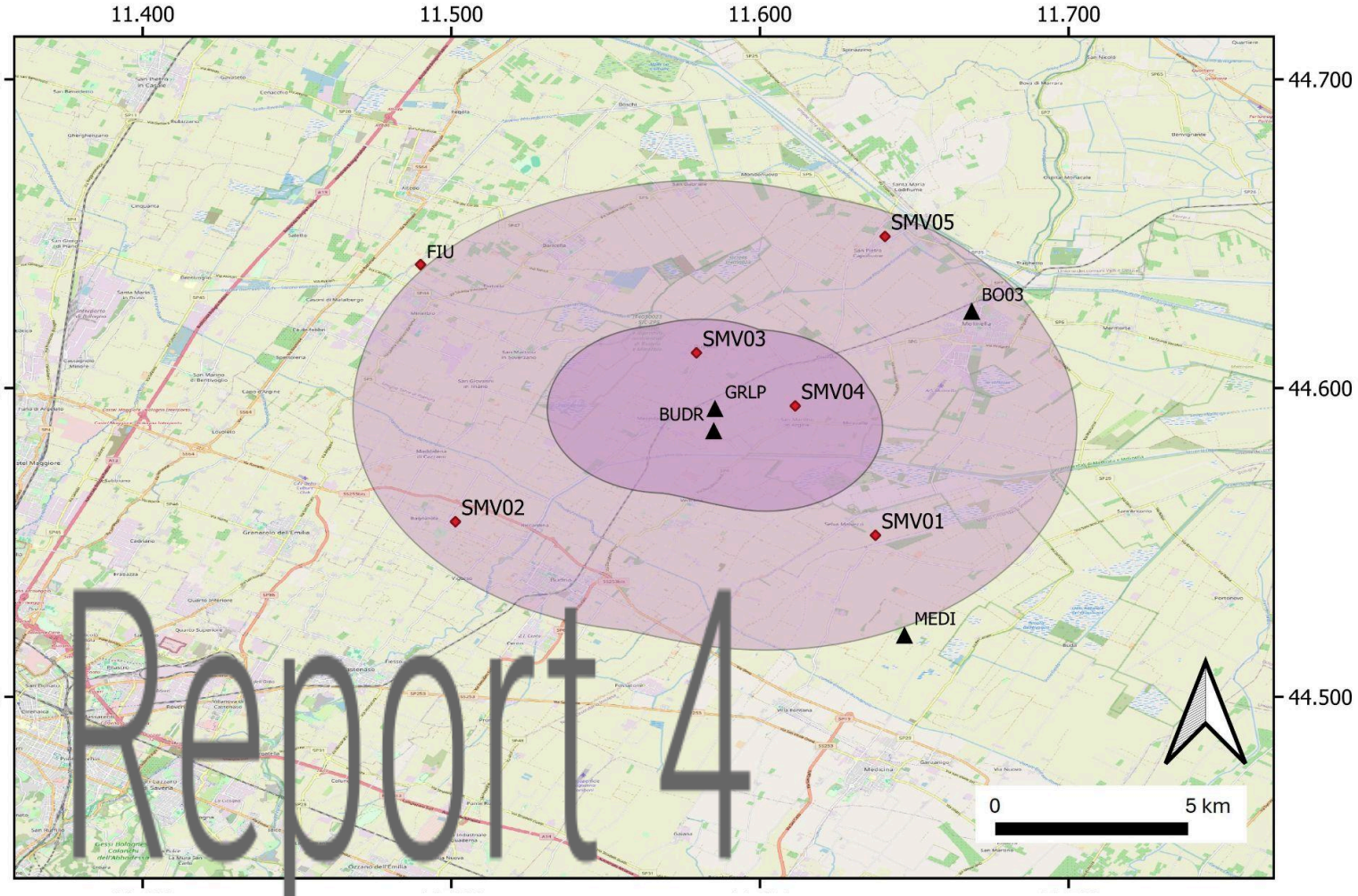
MASE, Regione Emilia Romagna, Comune di Budrio, INGV, Po Valley Operations pty ltd

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, G. Zerbinato e gruppo di lavoro del CMS*



Report 4

INGV

CMS CENTRO DI MONITORAGGIO DELLE ATTIVITÀ DI SOTTOSUOLO

***Gruppo di Lavoro del CMS**			
Sismologia	***Servizi Informatici e pubblicazione dati***	***Deformazioni del Suolo & Pressioni di Poro***	***Comitato Direttivo***
Sofia Baranello Camilla Bidini Alessandra Borghi Marco Caciagli Simona Carannante Adriano Cavaliere Ezio D'Alema Michele D'Ambrosio Maddalena Errico Daniela Famiani Irene Molinari Luigi Passarelli Francesco Pintori Simone Salimbeni Maurizio Vassallo	Stefano Marino Paolo Perfetti Enrico Rocchetti Gianpaolo Sensale Simone Vecchi Giampaolo Zerbinato	Lisa Beccaro Letizia Elia Leonardo Martelli Marco Polcari Enrico Serpelloni Cristiano Tolomei Eleonora Vitagliano	Letizia Anderlini Mario Anselmi Thomas Braun Alexander Garcia Giuseppe Pezzo Lucia Zaccarelli *coordinatore:* Gilberto Saccorotti

Premessa 5
1 Parametri di monitoraggio 7
2 Monitoraggio sismico e analisi dati 9
2.1 Funzionamento della rete sismica 9
2.2 Analisi della sismicità nei domini di monitoraggio 12
3 Monitoraggio delle deformazioni del suolo 12
3.1 Dati GNSS 12
3.2 Dati InSAR 17
3.3 Cedimento del terreno e livello di falda 22
3.4 Confronto tra dati GNSS e dati di piezometri ed assestimetri 23
4 Analisi di dati di pressione e portata 25
4.1 Produzione e pressioni 25
5 Considerazioni finali 28
5.1 Monitoraggio sismologico 28
5.2 Monitoraggio delle deformazioni del suolo 29
5.3 Monitoraggio delle pressioni di poro 30
Glossario 31
Bibliografia 32

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.4

Lucia Zaccarelli[1], Giuseppe Pezzo[2], Letizia Anderlini[1], Eleonora Vitagliano[2], Maddalena Errico[1], Leonardo Martelli[1], Enrico Serpelloni[1], Cristiano Tolomei[2], Giampaolo Zerbinato[1] e gruppo di lavoro del CMS*

[1] INGV, Sezione di Bologna, Italia;

[2] INGV, Osservatorio Nazionale Terremoti, Roma, Italia

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

22/06/2026

Premessa

La presente relazione descrive le attività svolte dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) in qualità di Struttura Preposta al Monitoraggio (SPM), nell'ambito dell'Accordo Quadro per l'applicazione integrata degli Indirizzi e Linee Guida per il Monitoraggio della sismicità, delle deformazioni del Suolo e delle pressioni di poro (ILG, 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 alla SPM (Tabella P.2).

Data	Documento
12 giugno 2023	Trasmissione Accordo Quadro (AQ) tra il Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MaSE), Regione Emilia Romagna, comune di Budrio e INGV, nel quale l'INGV viene nominato Struttura Preposta al Monitoraggio (SPM) per la concessione di coltivazione idrocarburi denominata Selva Malvezzi.
10 luglio 2023	Riunione di insediamento del comitato
29 settembre 2023	Trasmissione Documento di funzionamento e Protocollo trasmissione dati
22 maggio 2023	Invio protocolli d'Intesa tra Comune-Concessionario e Comune-SPM: inizio 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
10 febbraio 2025	Riunione di comitato per la disamina della prima relazione semestrale
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
01 luglio 2025	Invio bozza di DGOM redatta dalla SPM
22 luglio 2025	Riunione di comitato per la disamina della seconda relazione semestrale e della prima bozza di DGOM
23 gennaio 2026	Invio terza Relazione semestrale della SPM a tutto il comitato: analisi dei dati di monitoraggio dal 22 maggio 2025 al 21 novembre 2025
19 febbraio 2026	Riunione di comitato per la disamina della terza relazione semestrale

30 marzo 2026	Incontro tecnico tra SPM e concessionario sull'implementazione della rete sismica presso i locali del concessionario a Mezzolara

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

In questo quarto rapporto semestrale presentiamo i risultati del monitoraggio sismico, di deformazione (GNSS) e delle pressioni di poro acquisiti durante il quarto semestre, ovvero dal 22/11/2025 al 21/05/2026, 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 ● 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

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
14 gennaio 2026	Vengono caricati sull'FTP i dati degli assestimetri, piezometri, e i dati di produzione aggiornati a tutto dicembre 2025
20 febbraio 2026	Vengono caricati sull'FTP i dati degli assestimetri, piezometri, e i dati di produzione aggiornati a tutto gennaio 2026
16 marzo 2026	Vengono caricati sull'FTP i dati degli assestimetri, piezometri, e i dati di produzione aggiornati a tutto febbraio 2026, insieme ad alcuni dati geologici degli anni '50 e '80
20 aprile 2026	Vengono caricati sull'FTP i dati degli assestimetri, piezometri, e i dati di produzione aggiornati a tutto marzo 2026
20 maggio 2026	Vengono caricati sull'FTP i dati degli assestimetri, piezometri, e i dati di produzione aggiornati a tutto aprile 2026
3 giugno 2026	Vengono caricati sull'FTP i dati degli assestimetri, piezometri, e i dati di produzione aggiornati a tutto maggio 2026

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

1 Parametri di monitoraggio

Riportiamo brevemente quanto descritto nella prima relazione semestrale 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 dell'individuazione di valori specifici per quest'area, e si riferiscono a quanto riportato nel Documento di Gestione del Monitoraggio (DGOM) per questa concessione.

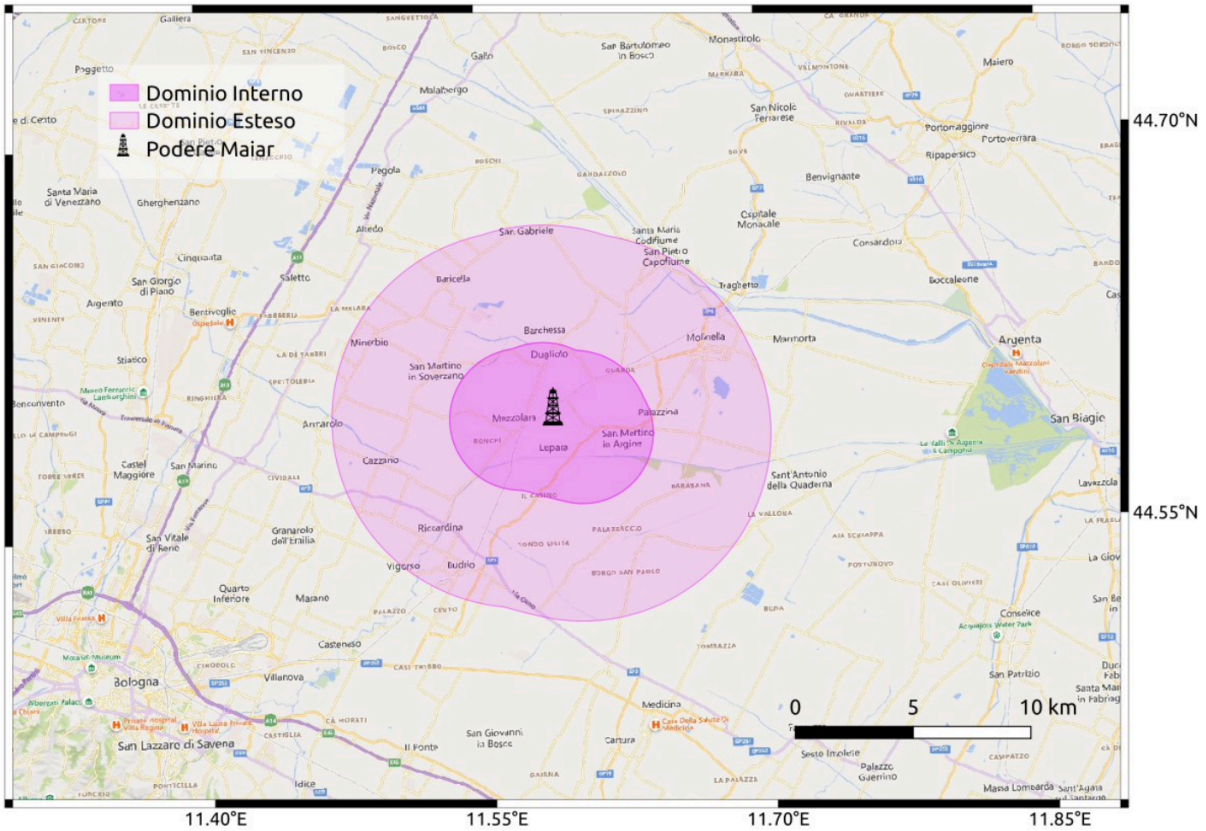


***Figura 1.1**: Estensione dei Domini di monitoraggio: Interno (DI) ed Esteso (DE) provvisori adottati attualmente per l'area della concessione Selva Malvezzi.*

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 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.

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/s^2.*

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.

2 Monitoraggio sismico e analisi dati

2.1 Funzionamento della rete sismica

Nel semestre in oggetto (22 novembre 2025 - 21 maggio 2026), le stazioni della rete M2 hanno funzionato senza interruzioni rilevanti.

La Figura 2.1 mostra la continuità di ricezione del dato (bande blu) e i periodi di fermo dell'acquisizione (spazi grigi) alle singole stazioni nell'ultimo semestre.

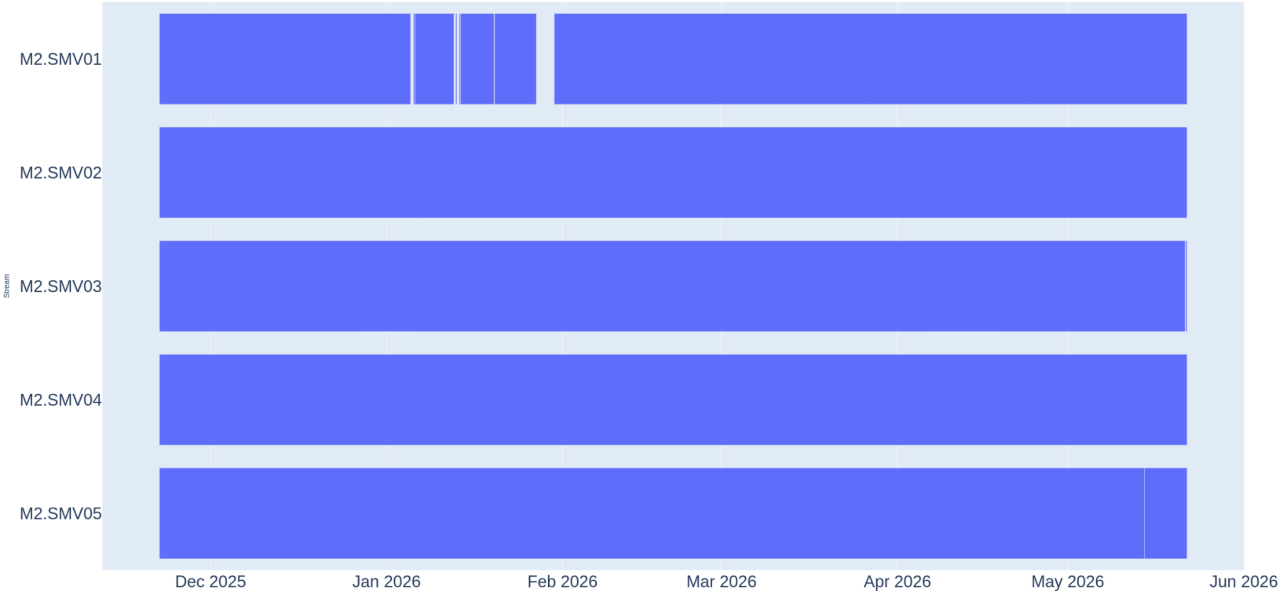


Figura 2.1. *Grafico della disponibilità del dato sismico nel quarto semestre di monitoraggio (22 novembre 2025 - 21 maggio 2026) per ognuna delle cinque stazioni della rete M2 gestita dal concessionario. Le barre blu corrispondono a dati giornalieri correttamente ricevuti mentre gli spazi grigi a dati mancanti.*

La percentuale di dato acquisito nel quarto semestre è riportata in Tabella 2.1: 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 anche per questo periodo.

SMV01	SMV02	SMV03	SMV04	SMV05
97.5%	100%	99.9%	100%	100%

Tabella 2.1. *Percentuali di dato sismico acquisito da ognuna delle cinque stazioni della rete M2 durante l'ultimo semestre di monitoraggio (22 novembre 2025 - 21 maggio 2026).*

Il 14 e 15 maggio 2026 sono stati eseguiti degli interventi straordinari alle stazioni SMV04 e SMV05 (comunicazione del concessionario del 21/05/2026). Ad SMV04 è stato sostituito il

sismometro che aveva mostrato la componente N non correttamente funzionante (come segnalato anche nelle precedenti relazioni semestrali). Mentre al sito di SMV05 il sismometro è stato rimpiazzato con uno strumento impermeabile per evitare interruzioni in caso di allagamento già verificatosi in passato.

Per valutare la bontà del segnale sismico acquisito sono state calcolate le curve di PPSD su diversi intervalli temporali: su tutto il dato acquisito dal 22/5/2024, inizio del monitoraggio, e nell'ultimo mese (successivo all'intervento di manutenzione), così da individuare eventuali variazioni nel funzionamento delle stazioni.

In Figura 2.2 mostriamo la PPSD per la stazione SMV04, componente N, per tutto il periodo di monitoraggio (pannello di sinistra) a confronto con quella calcolata su un mese di dati successivi al 19 maggio 2026 (pannello di destra): la prima mostra un andamento piatto della PPSD tipica di una stazione malfunzionante (come visibile nelle precedenti relazioni), mentre la seconda mostra un andamento conforme a quello atteso per questo tipo di sismometri a conferma che la sostituzione del sismometro è stata risolutiva.

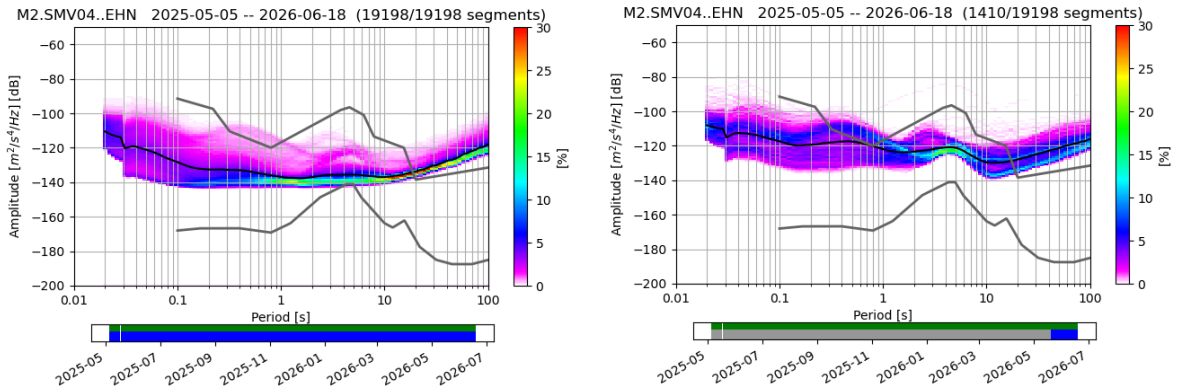


Figura 2.2. *PPSD calcolate per la stazione SMV04, componente N, per tutto il periodo di monitoraggio 22/05/24-21/05/2026 (pannello a sinistra), e per il mese successivo alla sostituzione del sismometro: 19/05/2026-18/06/2026. Le linee continue nere mostrano i livelli di rumore massimo e minimo globali (Peterson, 1993).*

Analizzando le curve PPSD delle altre stazioni si osservano alcune anomalie nei dati recenti per le stazioni SMV02 e SMV03.

In particolare per la stazione SMV02 si osserva un andamento delle PPSD per la componente N che supera il massimo livello di rumore NHNM (Peterson, 1993) già intorno agli 8 s (Figura 2.3), quando invece per le caratteristiche intrinseche degli strumenti installati questo superamento dovrebbe verificarsi dopo i 10 s (come mostrato nelle Figure 2.2 e 2.4 e come riportato anche nella prima relazione semestrale).

Le PPSD della stazione SMV03 invece mostrano un andamento piatto per entrambe le componenti E e Z nel periodo successivo al 19 maggio 2026. In Figura 2.4 riportiamo i grafici delle PPSD per l'intero periodo di monitoraggio (pannelli di sinistra) e per il mese di dati più recenti (pannello di destra) a entrambe le componenti E e Z (rispettivamente in alto e in basso). Si

osserva come questi andamenti siano in tutto simili a quelli che mostrava la stazione SMV04 prima della sostituzione del sismometro (Figura 2.2).

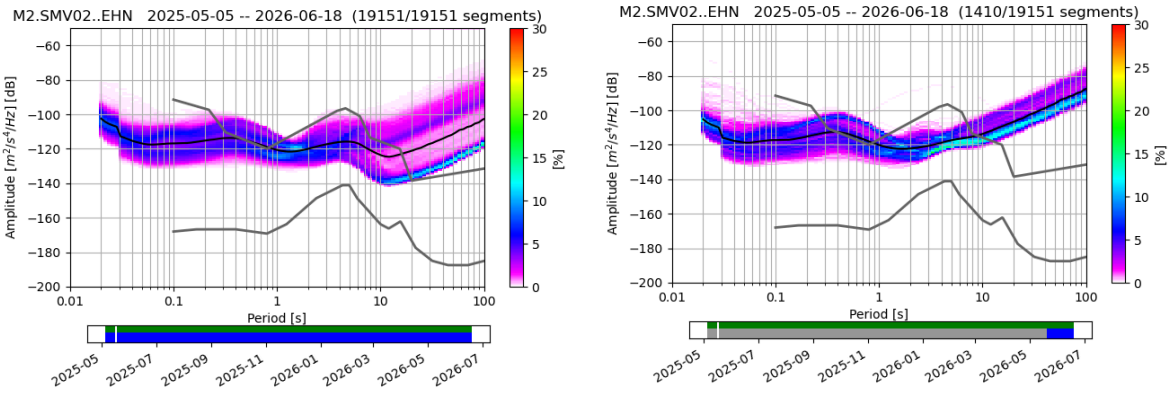


Figura 2.3. *PPSD calcolate per la stazione SMV02, componente N, per tutto il periodo di monitoraggio 22/05/24-21/05/2026 (pannello a sinistra), e per il mese successivo all'intervento di manutenzione: 19/05/2026-18/06/2026. Le linee continue nere mostrano i livelli di rumore massimo e minimo globali (Peterson, 1993).*

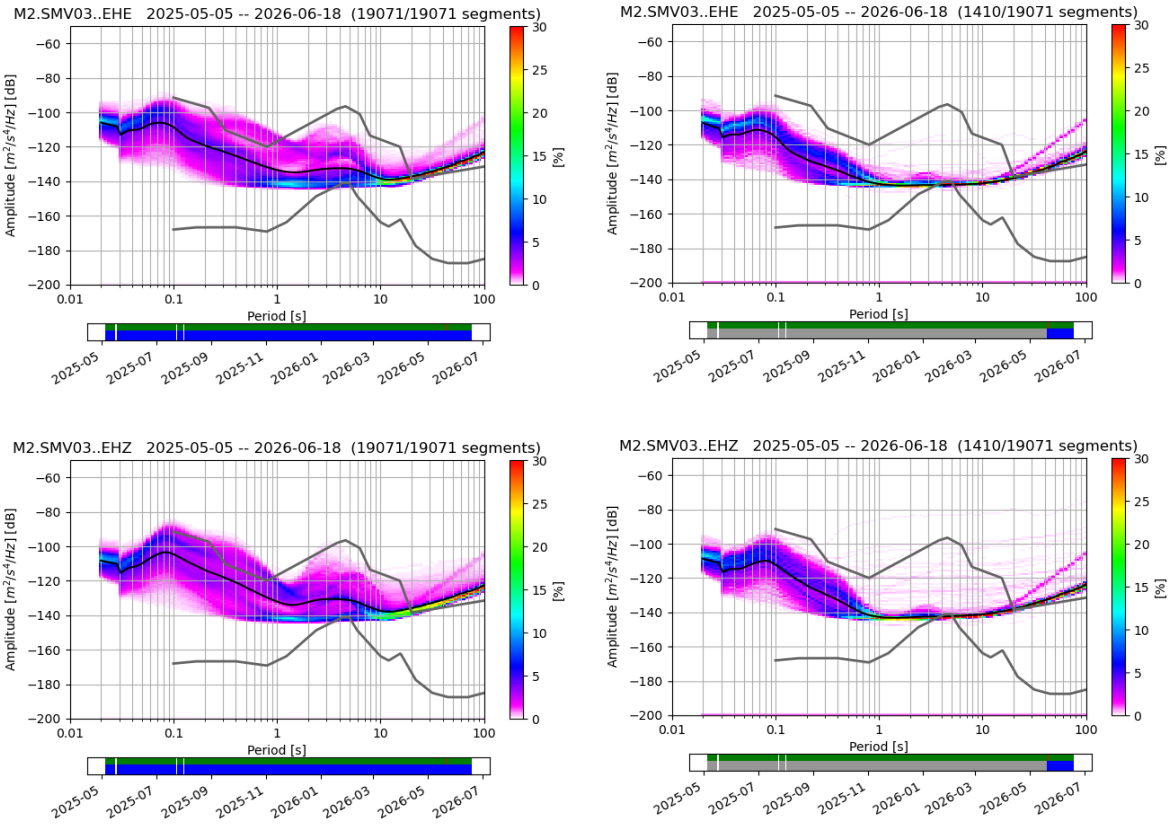


Figura 2.4. *PPSD calcolate per la stazioni SMV03, componenti E (sopra) e Z (sotto), per tutto il periodo di monitoraggio 22/05/24-21/05/2026 (pannello a sinistra), e per il mese successivo alla manutenzione: 19/05/2026-18/06/2026. Le linee continue nere mostrano i livelli di rumore massimo e minimo globali (Peterson, 1993).*

2.2 Analisi della sismicità nei domini di monitoraggio

Durante il quarto semestre di monitoraggio: 22 novembre 2025 - 21 maggio 2026, non sono stati rilevati eventi sismici localizzabili all'interno dei domini di monitoraggio.

3 Monitoraggio delle deformazioni del suolo

3.1 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.

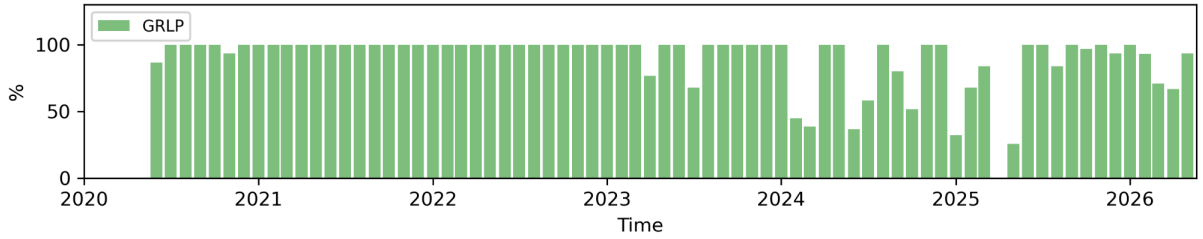


***Figura 3.1**: Percentuale di RINEX giornalieri disponibili per ciascun mese di acquisizione della stazione GRLP fino al 31 maggio 2026.*

In Figura 3.1 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 31 maggio 2026. Si può osservare come la stazione mostri una discreta continuità del dato, avendo acquisito in media, per tutto il periodo di funzionamento, circa il 90% dei file RINEX attesi, mostrando alcune interruzioni nel 2024 e 2025 a causa di problemi legati alla connettività, mentre negli ultimi 6 mesi la percentuale di dati trasmessi è del 86%.

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 IGS20 (Altamimi et al., 2023), utilizzando il pacchetto GLOBK del software GAMIT/GLOBK.

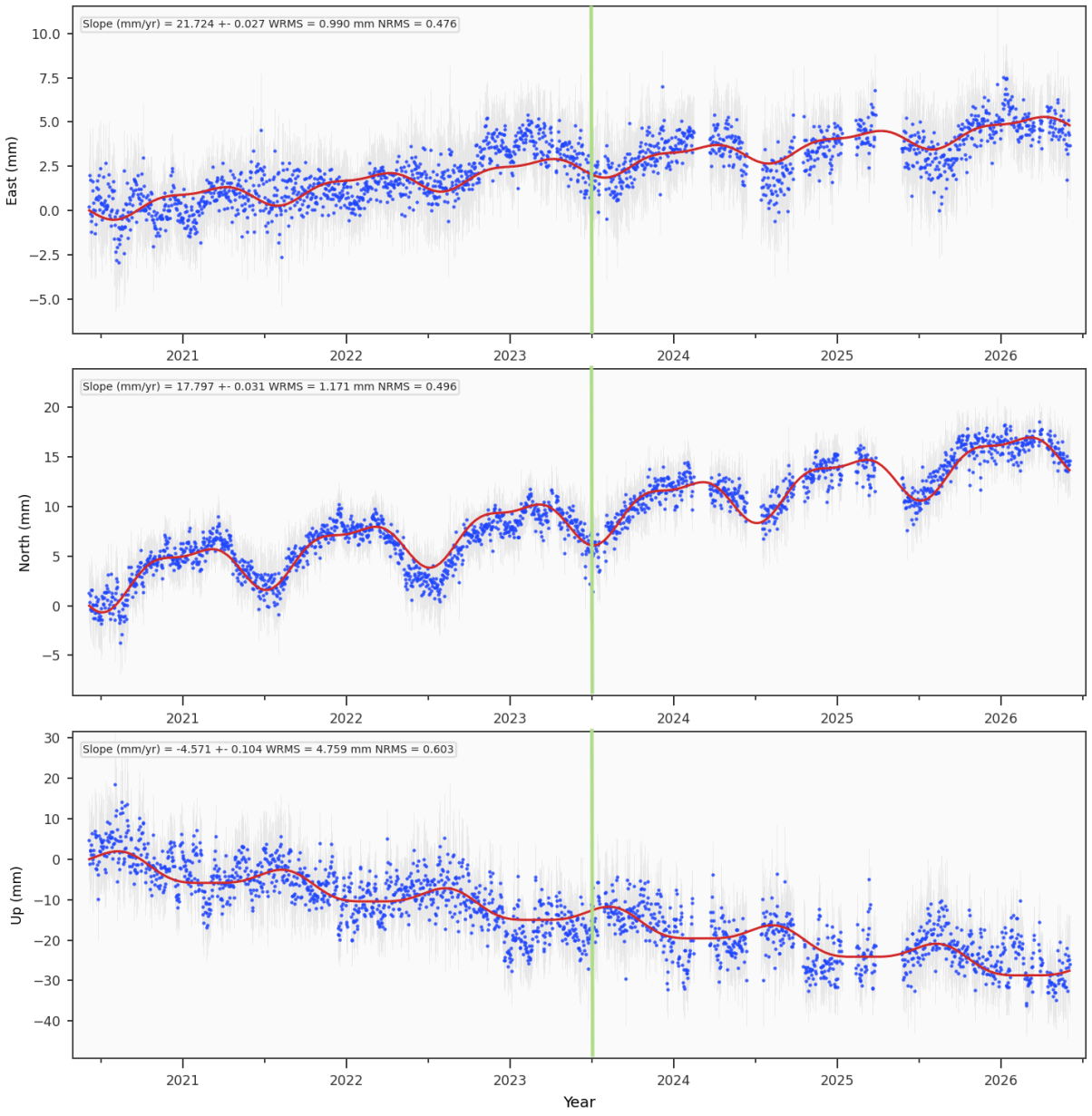


***Figura 3.2**. Serie temporale di spostamento (punti blu) della stazione GRLP nel sistema di riferimento Eurasia-fisso per le componenti Est e Nord e nel sistema di riferimento globale IGS20 per quella verticale (dall'alto verso il basso rispettivamente). Le linee grigie indicano le barre d'errore (1σ) 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.*

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 riferite al sistema di riferimento globale 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) sono state poste rispetto alla placca Eurasia-fissa, utilizzando come polo di rotazione quello riportato da Altamimi et al. (2023). Per fare ciò vengono rimosse dalle serie di spostamento orizzontali assolute 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 3.2 mostra la serie temporale degli spostamenti giornalieri (epoche, punti blu) nelle tre componenti così ottenute per la stazione GRLP, dove ad ogni epoca è associata un'incertezza corrispondente ad una deviazione standard (1σ). Nei grafici 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 giornalieri per questa stazione sia rispetto al modello funzionale atteso (ottenendo residui bassi rispetto al modello), sia rispetto all'inizio delle attività di estrazione.

Dall'analisi delle serie temporali di spostamento di tutte le stazioni utilizzate nei dintorni dell'area di monitoraggio viene stimato il termine lineare, generando un campo di velocità di spostamento rispetto al sistema di riferimento locale Eurasia-fisso per le componenti orizzontali. 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 3.3, sia per le componenti orizzontali che verticali, e i valori di velocità sono riportati in Tabella 3.1. Come già mostrato nei precedenti rapporti, dall'elaborazione ottenuta 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, confermando 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).

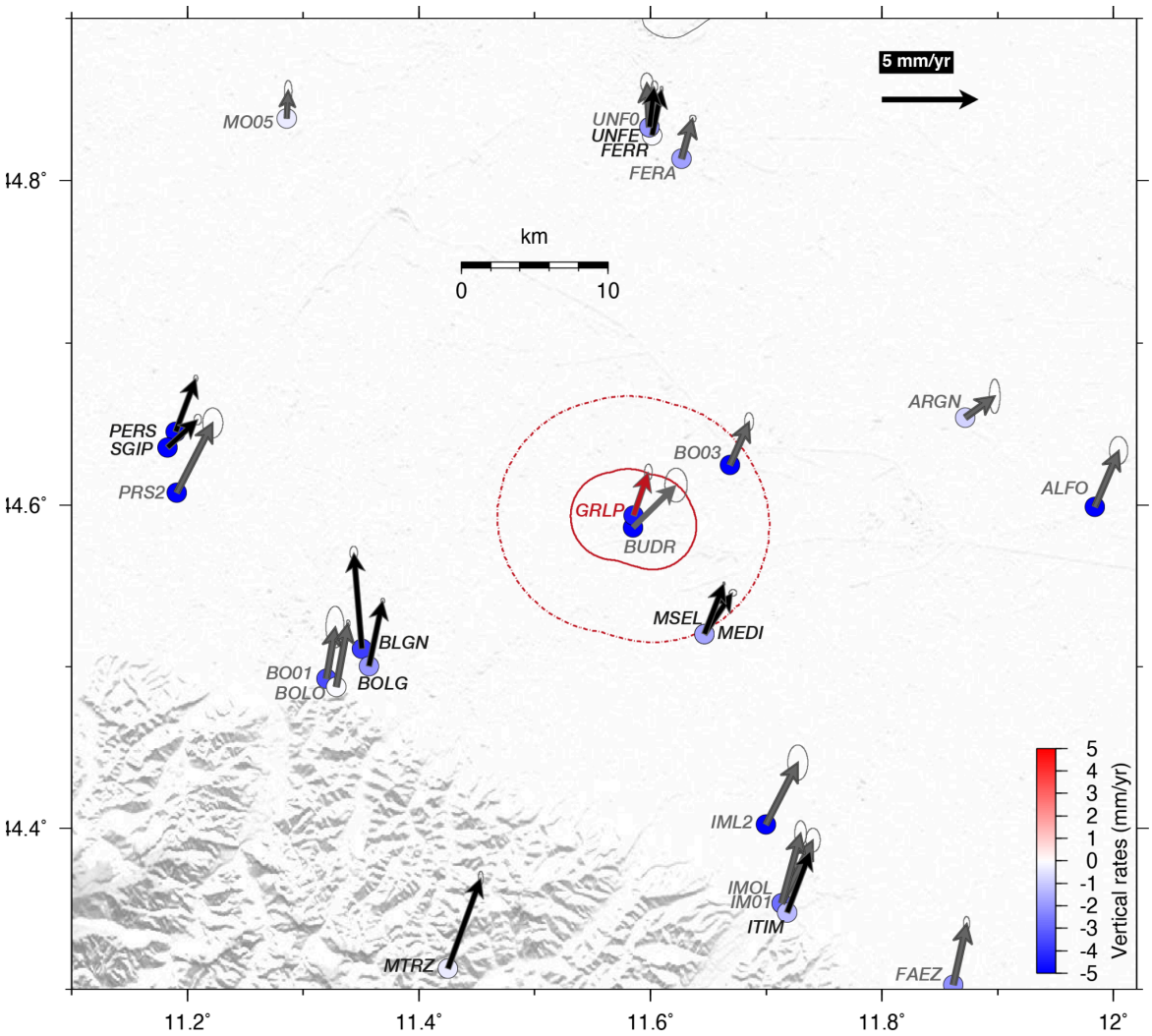


Figura 3.3. *Campo di velocità di spostamento ottenuto dall'analisi dei dati GNSS per le componenti orizzontali (frecce nere per le stazioni pubbliche e frecce grigie per le stazioni private) nel sistema di riferimento locale Eurasia-fissa (con ellissi di errore al 95%), e le corrispondenti componenti 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.*

Per quanto riguarda infine le velocità verticali, i dati confermano 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.

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	1.244	2.916	0.193	0.296	-5.803	2.358	ALFO_GPS
11.8719	44.6540	1.523	1.104	0.113	0.363	-0.824	1.359	ARGN_GPS
11.3506	44.5110	-0.42	4.986	0.081	0.139	-3.809	0.545	BLGN_GPS
11.3199	44.4926	0.458	2.678	0.192	0.441	-3.506	2.011	BO01_GPS
11.6686	44.6249	0.990	2.231	0.094	0.193	-5.944	1.281	BO03_GPS
11.3568	44.5002	0.713	3.403	0.041	0.055	-2.053	0.324	BOLG_GPS
11.3288	44.4876	0.602	3.277	0.034	0.078	-0.063	0.362	BOLO_GPS
11.5850	44.5862	2.223	2.190	0.236	0.360	-5.355	1.583	BUDR_GPS
11.8613	44.3028	0.702	3.176	0.066	0.148	-2.118	0.825	FAEZ_GPS
11.6270	44.8136	0.569	2.082	0.069	0.074	-1.862	0.369	FERA_GPS
11.6013	44.8279	0.496	2.395	0.031	0.063	-0.077	0.425	FERR_GPS
11.5854	44.5934	0.765	2.257	0.081	0.171	-4.571	1.011	GRLP_GPS
11.7135	44.3535	1.613	3.270	0.152	0.251	-0.659	1.681	IM01_GPS
11.6997	44.4024	1.652	3.199	0.212	0.375	-5.063	2.385	IML2_GPS
11.7133	44.3534	0.981	3.624	0.123	0.269	-2.760	1.497	IMOL_GPS
11.7179	44.3475	1.208	3.190	0.039	0.077	-1.324	0.437	ITIM_GPS
11.6468	44.5200	1.464	2.158	0.080	0.068	-2.009	0.241	MEDI_GPS
11.2858	44.8383	0.074	1.429	0.080	0.225	-0.392	0.792	MO05_GPS
11.6465	44.5200	1.017	2.632	0.021	0.039	-1.740	0.289	MSEL_GPS
11.4250	44.3128	1.702	4.691	0.050	0.151	-0.402	0.363	MTRZ_GPS
11.1898	44.6453	1.045	2.767	0.042	0.068	-7.186	0.485	PERS_GPS
11.1910	44.6077	1.850	3.611	0.214	0.317	-14.199	2.355	PRS2_GPS
11.1827	44.6355	1.574	1.458	0.079	0.112	-5.604	0.363	SGIP_GPS
11.5990	44.8330	-0.131	2.287	0.129	0.213	-2.166	1.647	UNF0_GPS
11.5592	44.8329	0.253	2.112	0.070	0.115	-2.052	0.665	UNFE_GPS

Tabella 3.1: *Valori delle velocità di spostamento GPS nelle 3 componenti (con gli errori associati) nel sistema di riferimento Eurasia-fisso per le stazioni analizzate*

3.2 Dati InSAR

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 indipendente delle deformazioni del suolo utilizzando i dati del satellite Sentinel-1, dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA), equipaggiato con un sensore Radar operante in banda C, ovvero con un segnale a una frequenza centrale di 5.405 GHz (lunghezza d'onda di circa 5.6 cm). L'elaborazione multitemporale delle immagini, con lo scopo di ottenere serie storiche di spostamento del suolo e le relative velocità medie, è stata svolta con un approccio di tipo SBAS (*Small BAseline Subset*) (Berardino et al., 2002). La copertura temporale dei due dataset Ascendente e Discendente è riportata in Tabella 3.2.

Dataset	Inizio	Fine
S1 Ascendente	11/06/2017	13/04/2026
S1 Discendente	22/06/2017	12/04/2026

Tabella 3.2. *Copertura temporale dei dataset SAR ascendente e discendente.*

Le mappe di velocità medie di spostamento del suolo calcolate nelle due geometrie ascendente e discendente (rispettivamente in Figura 3.4A e 3.4B) mostrano valori di velocità media di spostamento del suolo su larga scala generalmente compresi entro ± 1.5 mm/anno, con valori di picco spazialmente localizzati, compresi entro -5 mm/anno in corrispondenza dell'area di Minerbio, ma che possono raggiungere localmente valori fino a oltre -10 mm/anno, come nell'area di Budrio, entrambi ubicati nel DE. Muovendosi verso Ovest, le velocità di allontanamento del suolo aumentano, andando ad interessare l'area di Bologna. In prossimità del pozzo PM1d, dove è ubicata la stazione GNSS GRLP, la copertura del dato è scarsa a causa della copertura agricola del territorio, ma si osservano valori entro entro 3 mm/anno lungo le LOS per entrambe le geometrie orbitali.

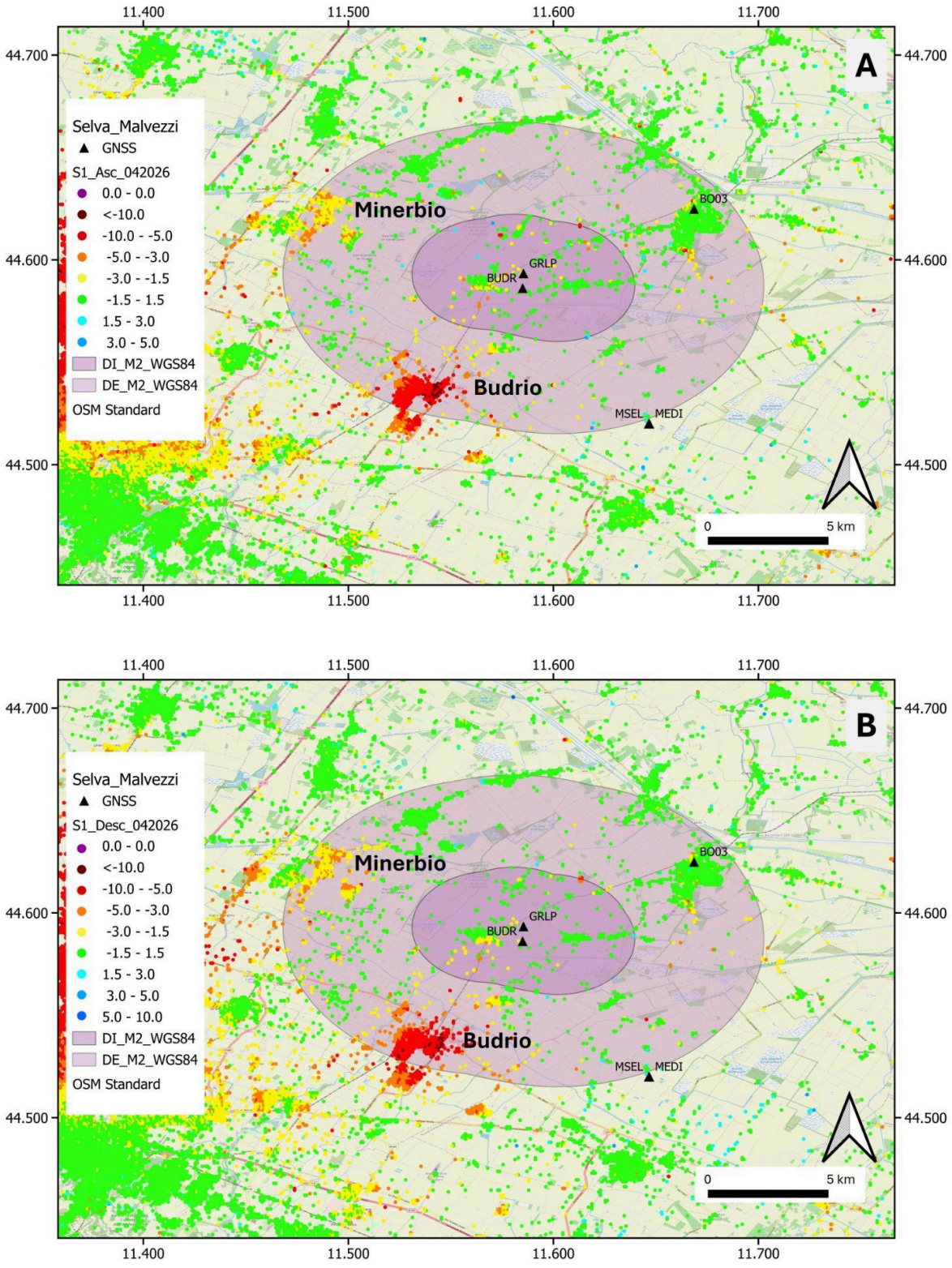


Figura 3.4. *Mappa della velocità media di spostamento del suolo (mm/anno) dal luglio 2017 ad aprile 2025 lungo la linea di vista del satellite, ascendente (A) e discendente (B), calcolata dai dati SAR acquisiti dai satelliti della costellazione Sentinel-1. Valori negativi indicano allontanamento dal 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 3.5, 3.6, 3.7 e 3.8 sono rappresentati alcuni esempi di serie storiche di spostamento del suolo lungo la linea di vista del satellite, ascendente (Figure 3.5 e 3.7) e discendente (Figure 3.6 e 3.7), calcolate in prossimità delle stazioni GNSS GRLP, ubicata al di sopra della culminazione del giacimento, e BUDR.

Le serie storiche mostrano un generale trend lineare di abbassamento del suolo sovrapposto a oscillazioni stagionali. In geometria ascendente, si osserva una decelerazione delle velocità di abbassamento dopo il 2019. In prossimità della stazione BUDR, lungo la linea di vista discente si evidenzia un'accelerazione del trend di allontanamento del suolo nel periodo 2020-2021

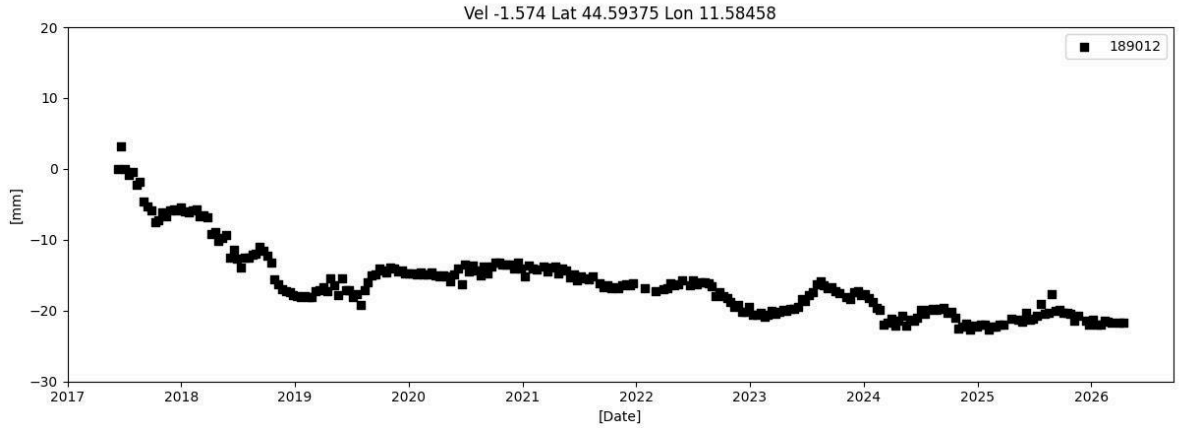


Figura 3.5. *Serie storica di spostamento del suolo (mm) in cui sono riportati gli spostamenti del suolo nel tempo lungo la linea di vista ascendente del satellite Sentinel-1, calcolati in prossimità della stazione GNSS GRLP. Valori negativi indicano allontanamento dal satellite, viceversa per valori positivi.*

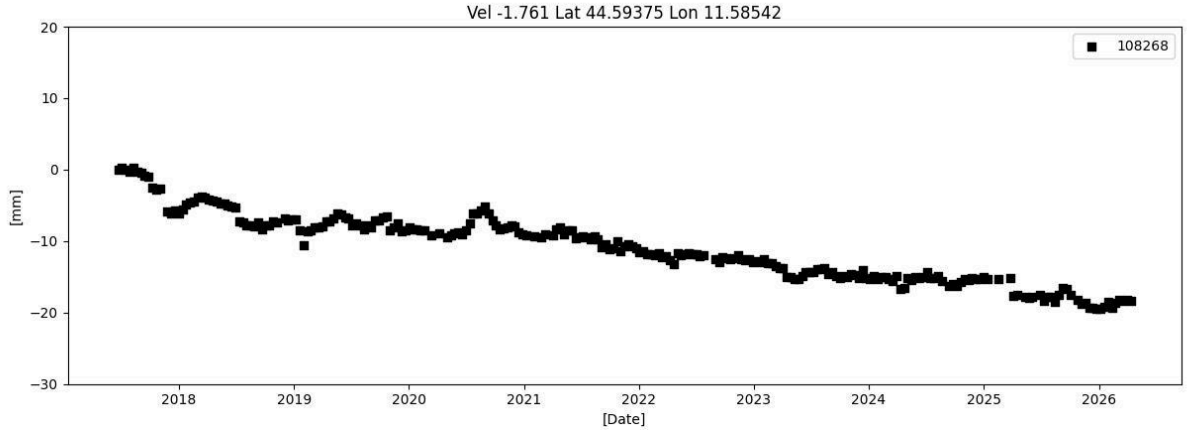


Figura 3.6. *Serie storica di spostamento del suolo (mm) in cui sono riportati gli spostamenti del suolo nel tempo lungo la linea di vista discendente del satellite Sentinel-1, calcolati in prossimità della stazione GNSS GRLP. Valori negativi indicano allontanamento dal satellite, viceversa per valori positivi.*

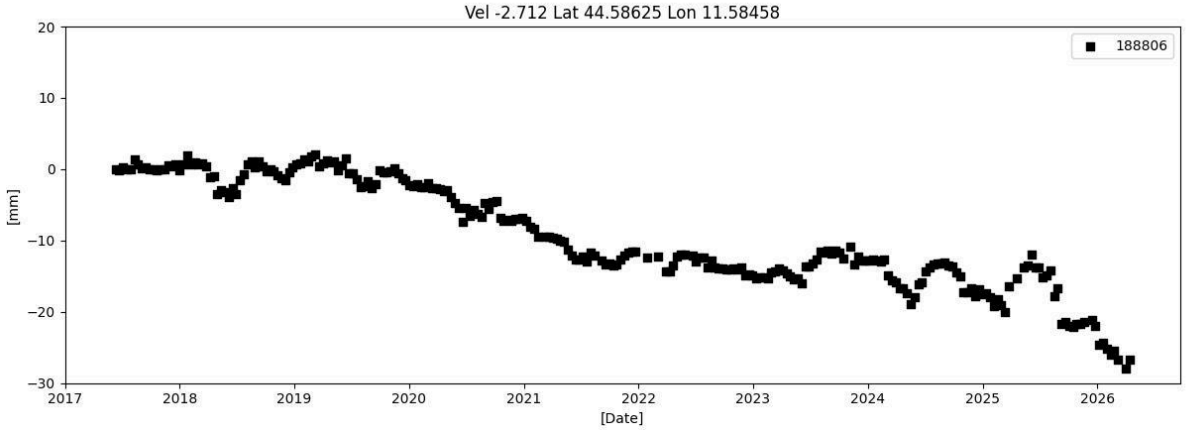


Figura 3.7. *Serie storica di spostamento del suolo (mm) in cui sono riportati gli spostamenti del suolo nel tempo lungo la linea di vista ascendente del satellite Sentinel-1, calcolati in prossimità della stazione GNSS BUDR. Valori negativi indicano allontanamento dal satellite, viceversa per valori positivi.*

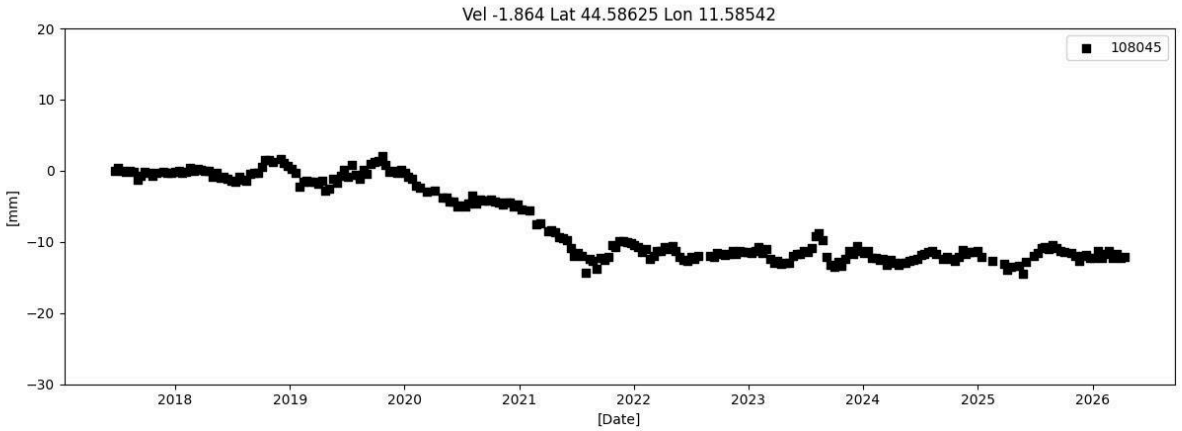


Figura 3.8. *Serie storica di spostamento del suolo (mm) in cui sono riportati gli spostamenti del suolo nel tempo lungo la linea di vista discendente del satellite Sentinel-1, calcolati in prossimità della stazione GNSS BUDR. Valori negativi indicano allontanamento dal satellite, viceversa per valori positivi.*

Le velocità di spostamento nelle componenti verticali (Figura 3.9A) e orizzontali (E-O) (Figura 3.9B), evidenziano valori in linea con quanto osservato nelle mappe in LoS. A larga scala le velocità di spostamento verticali sono in generale compresi tra -1.5 e 1.5 mm/anno, mentre si osservano subsidenze marcate nelle aree di Minerbio (entro i -5 mm/anno) e di Budrio (oltre i -10 mm/anno). Nel DI si segnala anche una limitata zona subsidente ad Est della stazione GNSS di BUDR, con valori entro i -5 mm/anno. Non si registrano andamenti significativi, per quel che riguarda la componente est-ovest.

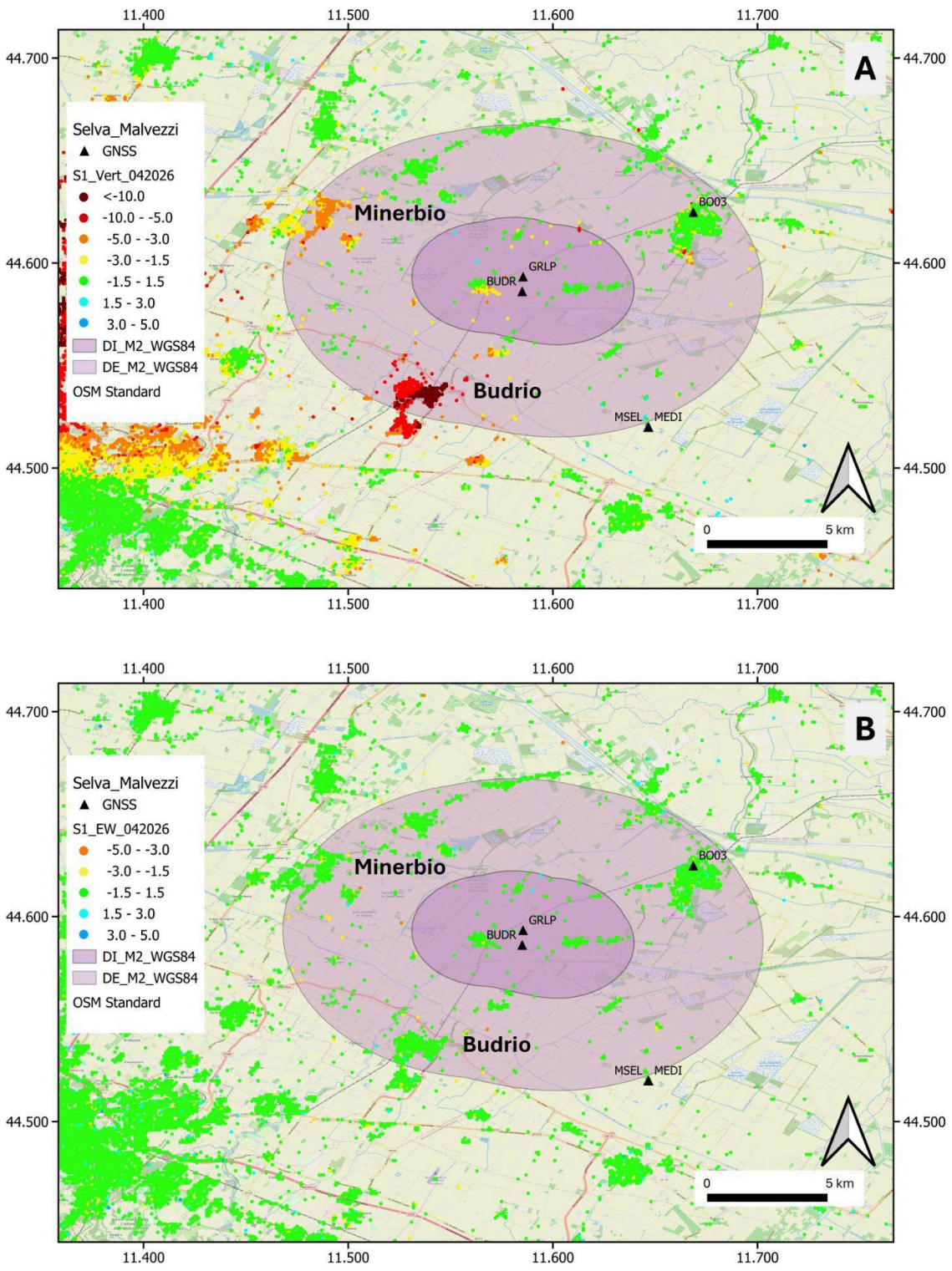


Figura 3.9. *Mappa della velocità media di spostamento del suolo (mm/anno) dal giugno 2017 aa aprile 2026 lungo la componente verticale (A) e orizzontale (B), calcolata dai dati SAR acquisiti dai satelliti della costellazione Sentinel-1. Nel pannello A, i valori negativi indicano subsidenza, viceversa per valori positivi. Nel pannello B, i 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).*

3.3 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 3.3), che forniscono anche temperatura e conducibilità dell'acqua, e temperatura del terreno.

Strumento	Profondità (m dal p.c.)	Dato	Periodo
Assestimetro	10 (AS) / 140 (AP)	Delta (mm)	17/02/2022 - 22/05/2026
Piezometro	9 (PS) / 90 (PP)	Soggiacenza (m)	18/02/2022 - 22/05/2026

Tabella 3.3. *Informazioni relative ai dati di cedimento del terreno e andamento della falda acquifera. Acronimi: AS: Assestimetro Superficiale; AP: Assestimetro Profondo; PS: Piezometro Superficiale; PP: Piezometro Profondo.*

Per effettuare le analisi comparative fra abbassamento/sollevamento del piano campagna (delta) e variazioni del livello di falda rispetto al piano campagna (soggiacenza), i dati orari sono stati prima filtrati attraverso un metodo statistico standard per eliminare i valori fuori scala e, successivamente, mediati per ottenere i valori giornalieri (Figura 3.10). In aggiunta, per apprezzare meglio le variazioni di spessore legate alla compattazione delle parti più profonde di terreno, il delta misurato dall'assestimetro profondo è stato corretto delle variazioni di spessore della parte più superficiale del terreno, ottenendo il delta residuale (differenza fra delta misurato dall'assestimetro profondo e delta misurato dall'assestimetro superficiale).

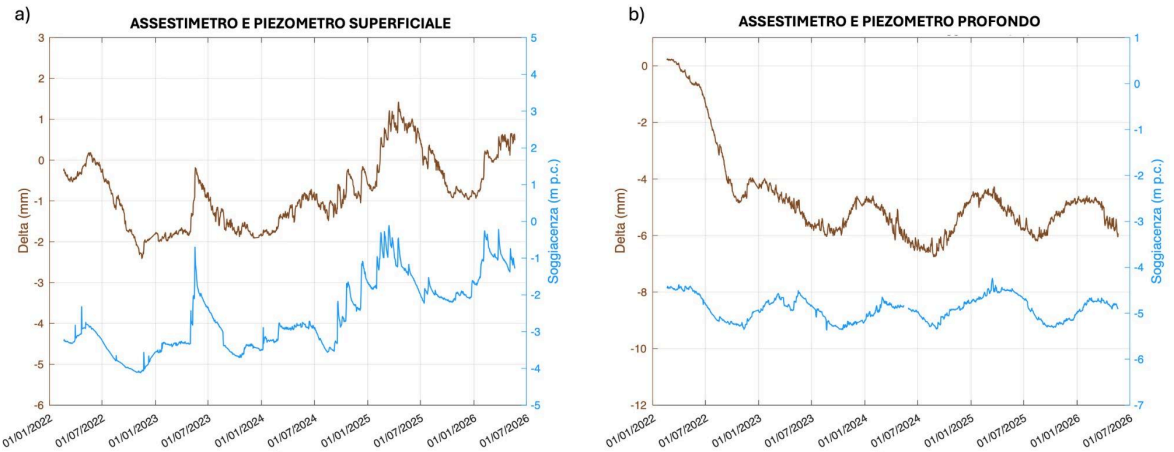


Figura 3.10. *Serie temporali dei dati acquisiti dall'assestimetro (delta) e dal piezometro (soggiacenza) nelle porzioni superficiali (a) e profonde (b) del terreno. L'intervallo temporale dei dati va dal 19/02/2022 al 22/05/2026. L'abbreviazione p.c. indica il piano campagna.*

La Figura 3.10a 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. La Figura

3.10b 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.

Per ottenere segnali continui nel tempo e procedere con ulteriori analisi comparative, è stato preliminarmente individuato un intervallo temporale comune alle serie giornaliere. L'intervallo individuato per il confronto tra delta e soggiacenza superficiale va dal 19/02/2022 al 22/05/2026, mentre quello relativo al confronto tra delta residuo e soggiacenza profonda va dal 19/10/2022 al 22/05/2026, cioè è più ridotto nel tempo. Tale scelta è stata adottata per escludere la prima parte dei dati acquisiti dall'assestimetro profondo, caratterizzata da un anomalo abbassamento del suolo in un breve lasso di tempo (febbraio – ottobre 2022 in Figura 3.10b). Dopo l'individuazione degli intervalli comuni di tempo, i dati mancanti delle serie sono stati stimati mediante interpolazione lineare. Infine, ai fini della stima dei coefficienti di correlazione, tutte le serie sono state normalizzate rispetto al valore medio.

L'analisi della correlazione lineare per la coppia delta–soggiacenza superficiale, espressa mediante il coefficiente di Pearson, ha restituito un valore pari a 0,81, che indica una correlazione tra le due serie molto forte. Inoltre, l'analisi di cross-correlazione per le serie superficiali mostra che l'indice di correlazione si mantiene elevato (0,81) anche per sfasamenti temporali fino a 12 giorni. Invece, per la coppia delta residuo–soggiacenza profonda, senza tener conto di sfasamenti fra i minimi e i massimi delle serie, l'indice di correlazione è pari a 0,36 ed indica una correlazione debole fra i segnali. La correlazione diventa forte (0,67) se l'andamento della piezometria viene anticipato di circa due mesi rispetto a quello del cedimento. Questo risultato, anche se non è ragionevole dal punto di vista fisico, mette però in evidenza che, l'occorrenza di altre falde non intercettate dal sensore piezometrico e caratterizzate da andamenti simili a quello osservato, ma con fasi leggermente anticipate, potrebbero contribuire a deformare il terreno e spiegare l'andamento osservato nell'assestimetro profondo. Se la parte filtrata del foro piezometrico si trovasse a fondo pozzo, il sensore piezometrico misurerebbe le oscillazioni di una falda posta a 140 m di profondità, identificabile con la parte superiore del Complesso Acquifero A3 (cfr. Po Valley, 2021). Questa configurazione del foro non consentirebbe di intercettare altre falde a minore profondità, come la falda basale e quella intermedia del Complesso Acquifero A2, potenzialmente capaci di influenzare la dilatazione-contrazione di strati siltoso-argillosi presenti nelle parti meno profonde del terreno.

3.4 Confronto tra dati GNSS e dati di piezometri ed assestimetri

Al fine di verificare l'eventuale relazione tra la deformazione superficiale osservata nelle serie GNSS, l'andamento della falda e lo spostamento del suolo misurati dal piezometro e dall'assestimetro superficiale, la componente verticale della serie temporale di spostamento della stazione GRLP (capitolo 3.1) è stata confrontata con la serie della soggiacenza e del delta del terreno (capitolo 3.3).

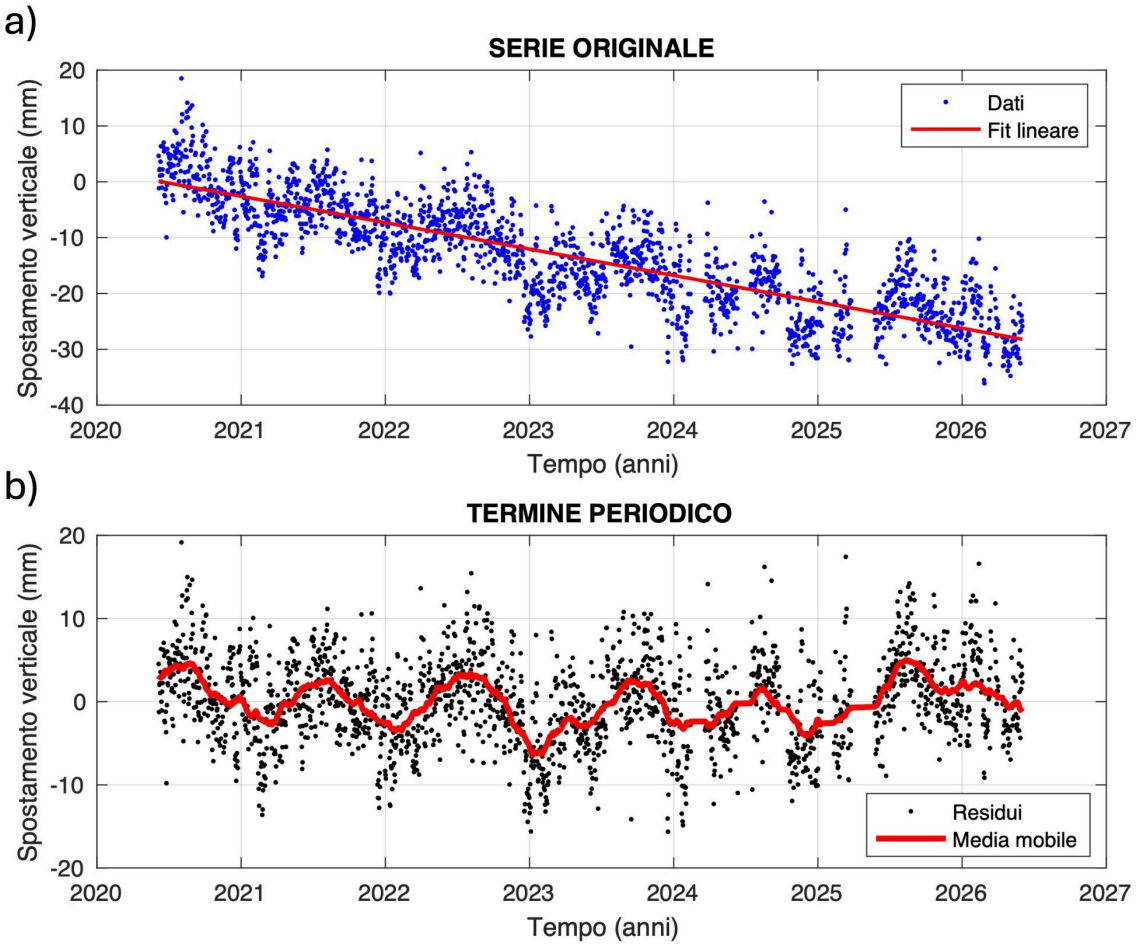


***Figura 3.11**. Componente verticale dello spostamento riferito alla stazione GRLP: a) dato originale (cerchi blu) e b) termine periodico (cerchi neri). Il termine periodico è stato ottenuto rimuovendo il termine lineare dai dati originali. La linea rossa in a) e in b) rappresenta, rispettivamente, il trend lineare e la media mobile centrata con finestra mobile pari a 3 mesi.*

Dalla serie temporale dello spostamento verticale calcolato alla stazione GRLP abbiamo rimosso il termine lineare pari a 4.7 mm/anno (Figura 3.11a), così da mettere in evidenza l'andamento periodico (Figura 3.11b).

Per ciascuna delle serie analizzate, 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 3.12). Da un confronto qualitativo si osserva come la serie dello spostamento verticale (Figura 3.12a) non mostri nessuna evidente somiglianza con l'andamento del delta (Figura 3.12b) e della soggiacenza (Figura 3.12c), che invece sono molto simili e ben correlati tra di loro (come già evidenziato nel capitolo 3.3).

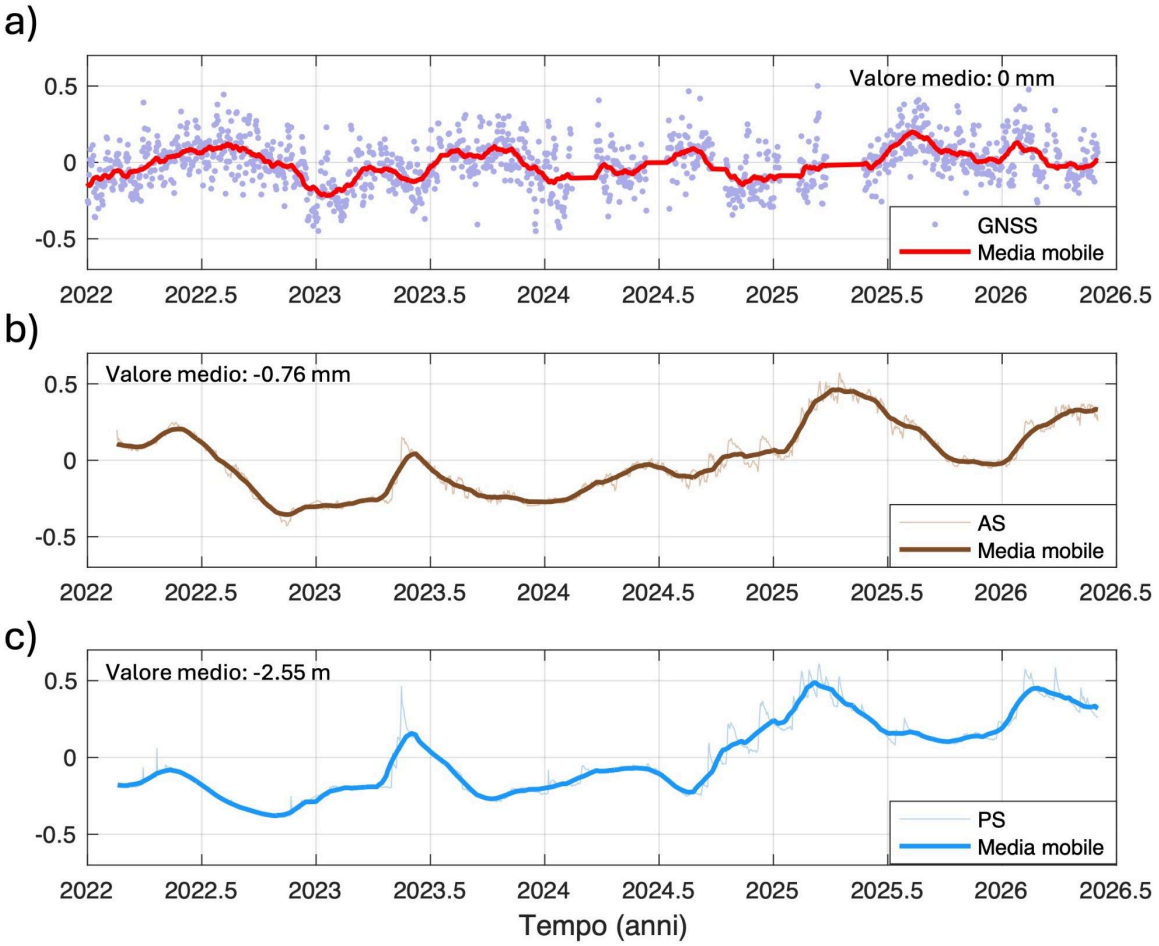


Figura 3.12. *Confronto tra le serie normalizzate: a) geodetica (GNSS), b) geotecnica (AS) e c) idrogeologica (PS), con anche le relative medie mobili centrate. Le serie sono state normalizzate rispetto al valore medio (indicato in alto all'interno di ogni grafico), mentre le medie mobili sono state ottenute utilizzando una finestra mobile di 1.5 mesi. Acronimi: GNSS, componente verticale residuale alla stazione GRLP; AS, delta riferito all'assestimetro superficiale; PS, soggiacenza riferita al piezometro superficiale.*

Al fine di valutare quantitativamente la correlazione tra serie geodetica e le serie di soggiacenza e spostamento del suolo legato alla compressione e dilatazione del terreno, tenendo conto anche di possibili sfasamenti temporali, le serie sono state ricampionate con lo stesso passo di campionamento ed è stata effettuata un'analisi di cross-correlazione basata sul coefficiente di Pearson. I risultati ottenuti evidenziano coefficienti inferiori a 0,4 che indicano una correlazione debole, anche introducendo ritardi tra i segnali.

4 Analisi di dati di pressione e portata

4.1 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 31/05/2026. Questi dati vengono mostrati nei grafici di Figura 4.1.

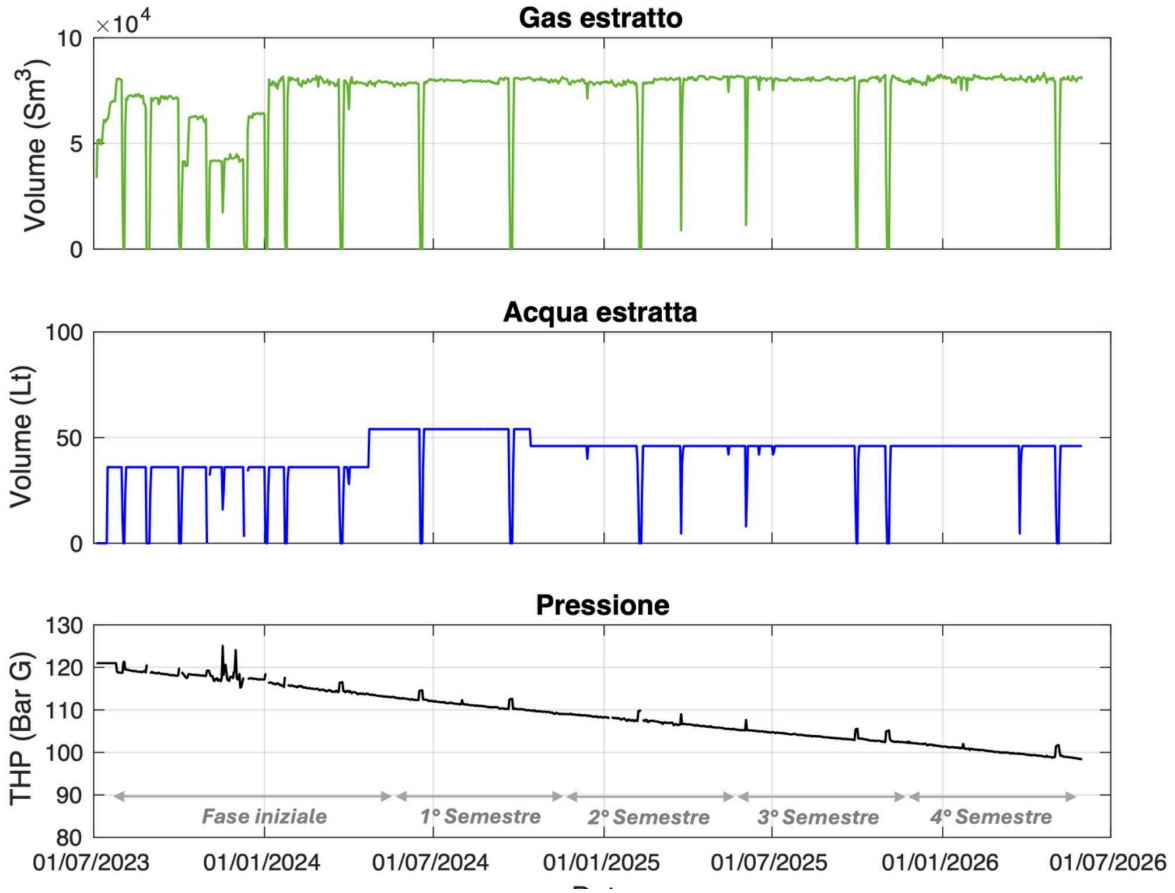


Figura 4.1. *Volumi di gas e di acqua prodotti dal livello C2 del pozzo Podere Maiar 1 dir e relativi valori di pressione (THP). Il periodo dei dati va dal 1/7/2023 al 31/05/2026. Il livello C1 ha valori nulli nello stesso periodo. La pressione è espressa in bar relativi.*

La pressione giornaliera misurata a testa *tubing* nei diversi periodi di monitoraggio (THP, Figura 4.1) è stata analizzata mediante interpolazione lineare, al fine di stimarne i tassi annui di decremento (Tabella 4.1).

Monitoraggio	Periodo di analisi dei dati	Decremento annuale di pressione (bar/anno)
Fase iniziale del campo	25/07/2023 - 21/05/2024	-8.3 ±0.4
Primo semestre	22/05/2024 - 21/11/2024	-7.8 ±0.5
Secondo semestre	22/11/2024 - 21/05/2025	-7.2 ±0.4
Terzo semestre	22/05/2025 - 21/11/2025	-5.7 ±0.5
Quarto semestre	22/11/2025 - 21/05/2026	-7.0 ±0.4

Tabella 4.1. *Tassi annuali di decremento della pressione misurata a testa tubing (THP) nei semestri di monitoraggio.*

Ad eccezione del terzo periodo di monitoraggio, i risultati mostrano una progressiva riduzione dei tassi di decremento della pressione nel corso del tempo. Tale andamento risulta coerente con l'evoluzione del campo, in cui la diminuzione della pressione di giacimento è legata alla produzione del gas. A supporto di questa interpretazione, l'applicazione di un modello di regressione lineare tra la THP e la produzione cumulata (Figura 4.2) mostra che la pressione diminuisce progressivamente all'aumentare della produzione cumulata e restituisce un coefficiente di determinazione R^2 pari a 0,98. Questo valore indica che il 98% della variabilità osservata nei dati THP è spiegato dalla produzione cumulata, confermando l'esistenza di una forte relazione tra i due parametri.

Per quanto riguarda il profilo statico e dinamico della pressione e della temperatura di PM1d, sono state fornite una misura statica di pressione e una misura dinamica, acquisite a maggio 2026. 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 (THP) misurati durante la produzione del gas (Figura 4.3a). In aggiunta, il decremento di pressione calcolato utilizzando le misure STHP sull'intero periodo (giugno 2023 - maggio 2026) è pari a -7.0±0.5 bar/anno e risulta confrontabile con quello relativo al periodo precedente di -6.9±0.7 bar/anno (giugno 2023 - novembre 2025). Infine, la Figura 4.3b mostra che 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 1289 metri (TVD) a fondo pozzo (SBHP).

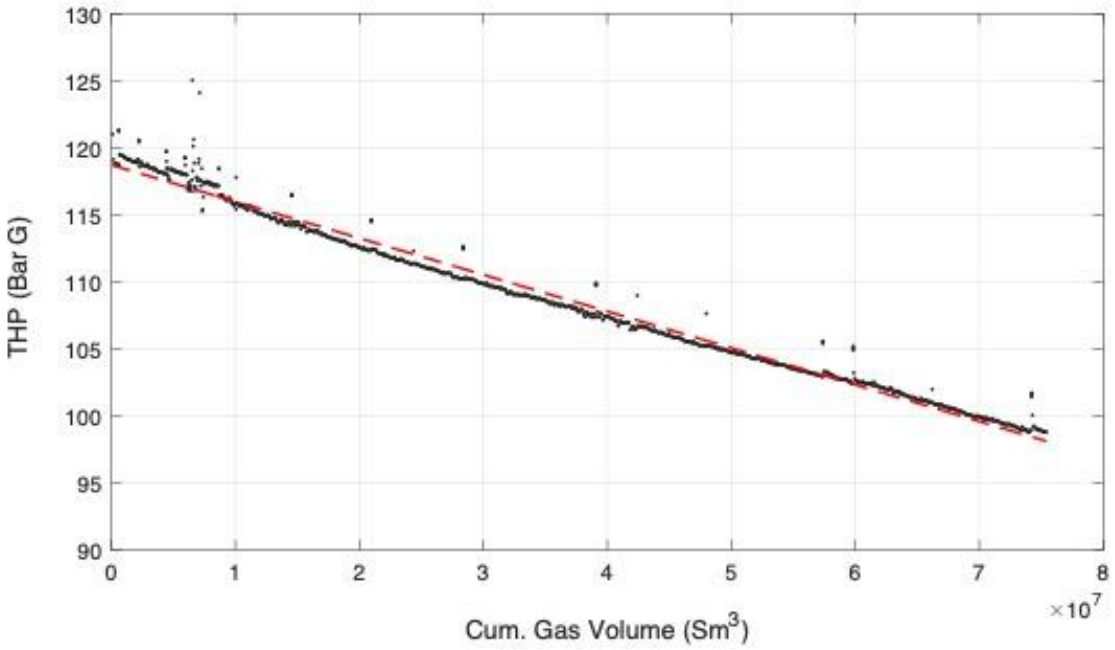


Figura 4.2. *Pressione di testa tubing in relazione alla produzione cumulata di gas. I dati si riferiscono al periodo 25/07/2023 - 21/05/2026. La linea rossa tratteggiata rappresenta la retta di regressione lineare.*

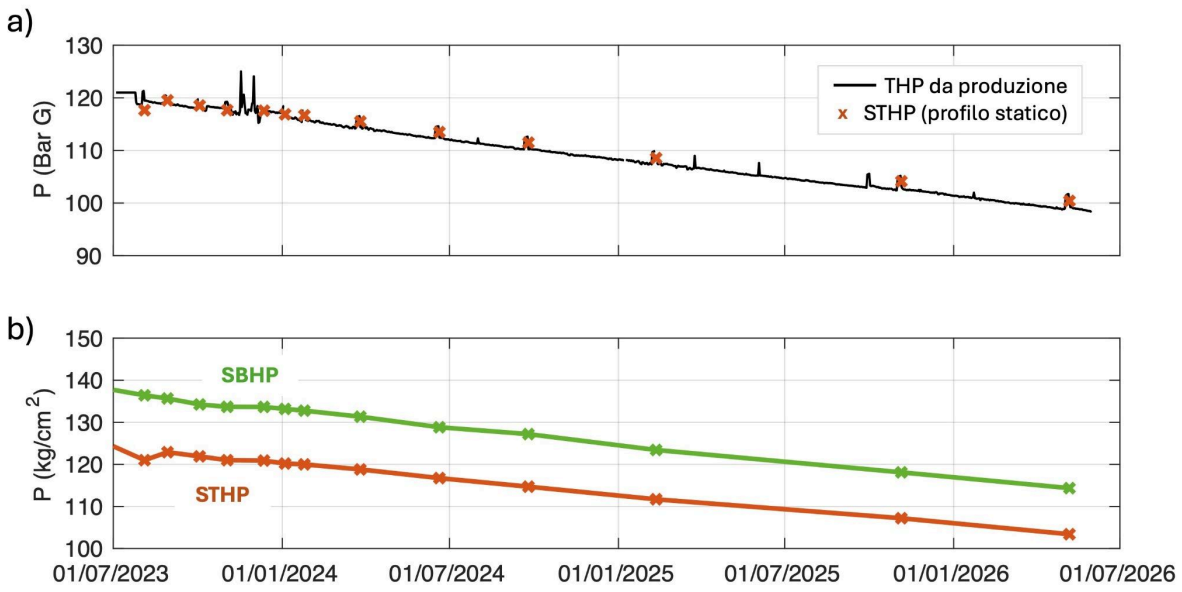


Figura 4.3. *Misure di pressione ottenute dai gradienti statici: a) confronto tra i valori statici di pressione (STHP) e i valori di pressione (THP) misurati durante la produzione del gas; b) confronto tra i valori statici di pressione riferiti alla testa del tubaggio (STHP) e ad una profondità media di 1289 metri (TVD) a fondo pozzo (SBHP). Il periodo dei dati va dal 1/7/2023 al 31/05/2026. Nei grafici a) e b), la pressione è espressa rispettivamente in bar relativi e in kilogrammi/cm^2.*

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.

5 Considerazioni finali

5.1 Monitoraggio sismologico

Le stazioni della rete sismica locale mostrano una buona continuità del dato confermando quanto già osservato nelle precedenti relazioni semestrali. Si conferma il corretto funzionamento della stazione SMV04, componente N dopo l'intervento di sostituzione dello strumento effettuato il 14/15 maggio 2026. Si evidenzia un comportamento anomalo per la componente N del sensore

SMV02, e per le componenti E e Z del sensore SMV03, in entrambi i casi riteniamo opportuno indagare su quali possano essere le cause.

In questo quarto semestre, e in generale dall'inizio del monitoraggio alla data di questo rapporto, non sono stati registrati eventi sismici nelle aree di interesse ovvero all'interno dei DI e DE definiti sopra. Questo rende impossibile la verifica su base prestazionale della rete sismica, così come la definizione di soglie ad-hoc per il superamento dei livelli di allerta.

5.2 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 e verticali mostra un andamento in accordo con il contesto regionale, dimostrandosi un sito stabile e affidabile ai fini del monitoraggio e senza evidenziare variazioni degli spostamenti in atto rispetto a quanto riportato nel precedente rapporto semestrale.

I risultati del monitoraggio svolto tramite tecniche di interferometria satellitare con i dati Sentinel-1 evidenziano un quadro deformativo caratterizzato da spostamenti entro 3 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. Nei primi 140 m di terreno, la falda profonda e lo spostamento del suolo misurato dall'assestimetro profondo hanno un andamento caratterizzato da una marcata oscillazione annuale, ma sono sfasati nel tempo. Anche se non è del tutto chiara l'origine dello sfasamento, si ipotizza che la falda profonda contribuisca solo in parte alla deformazione del suolo, e che questa sia influenzata anche da altri livelli di falda non direttamente intercettati dal piezometro.

Il dato di deformazione del suolo è stato confrontato con i dati assestimetrici e piezometrici forniti dal Concessionario. I risultati di un'analisi comparativa ha evidenziato che, nel periodo 2022-2026, non si osserva una buona correlazione tra la serie geodetica della stazione GRLP, il delta del terreno misurato dall'assestimetro superficiale e la soggiacenza misurata dal piezometro superficiale. Nell'ottica di comprendere la natura dei processi che influenzano l'oscillazione geodetica, nella Relazione semestrale 2025/2 era stata condotta anche un'analisi comparativa utilizzando parametri climatici disponibili sul web (Portale Ispra-Scia, confronto che non è stato possibile aggiornare in questa Relazione a causa della manutenzione di alcune pagine del portale Ispra-Scia). Tale analisi aveva 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, aveva consentito 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 (Romagnoli et al., 2003; Vitagliano et al., 2022).

5.3 Monitoraggio delle pressioni di poro

Le misure di pressione di poro riferite al periodo 22 novembre 2025 - 21 maggio 2026 non presentano particolari anomalie e si inseriscono in continuità con i dati acquisiti nei periodi precedenti, confermando il trend di progressiva diminuzione della pressione associato alla produzione di gas.

Glossario

AQ: Accordo Quadro
ASI: *Agenzia Spaziale Italiana*
CMS: Centro di Monitoraggio per le attività di Sottosuolo
DE: Dominio Esteso
DI: Dominio Interno
ESA: *Agenzia Spaziale Europea*
GNSS: *Global Navigation Satellite System*
GPS: *Global Positioning System*
IGS: *International GNSS Service*
ILG: 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)
InSAR: *Interferometric SAR*
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: *Multipath portante L1 GPS*
MP2: *Multipath portante L2 GPS*
NW: *Network*
PGA: *Peak Ground Acceleration*
PGV: *Peak Ground Velocity*
PM1d: *Pozzo Podere Maiar 1 dir*
PPSD: *Probability Power Spectral Density*
RINEX: *Receiver INdependent EXchange*
RING: Rete Nazionale Integrata GPS
RMS: *Root Mean Square*
RSN: Rete Sismica Nazionale (INGV)
SAR: *Synthetic Aperture Radar*
SBAS: *Small BAseline Subset*
SBHP: *Static Bottom Hole Pressure* - pressione a fondo pozzo
SPM: Struttura Preposta al Monitoraggio
STHP: *Static Tubing Head Pressure* - pressione a testa pozzo
THP: *Tubing Head Pressure* - pressione a testa pozzo
TLS: *Traffic Light System* - sistema a semaforo
TVD: *Total Vertical Depth*

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 Geosci. Remote 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.mase.gov.it/geomonitoraggi/linee-guida-per-i-monitoraggi/ (ultimo accesso giugno 2025).

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: 22 giugno 2026)

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.

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

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.