

Accordo Quadro 2024-2026

MASE, Regione Emilia Romagna, Comune di Ravenna, INGV, ENI

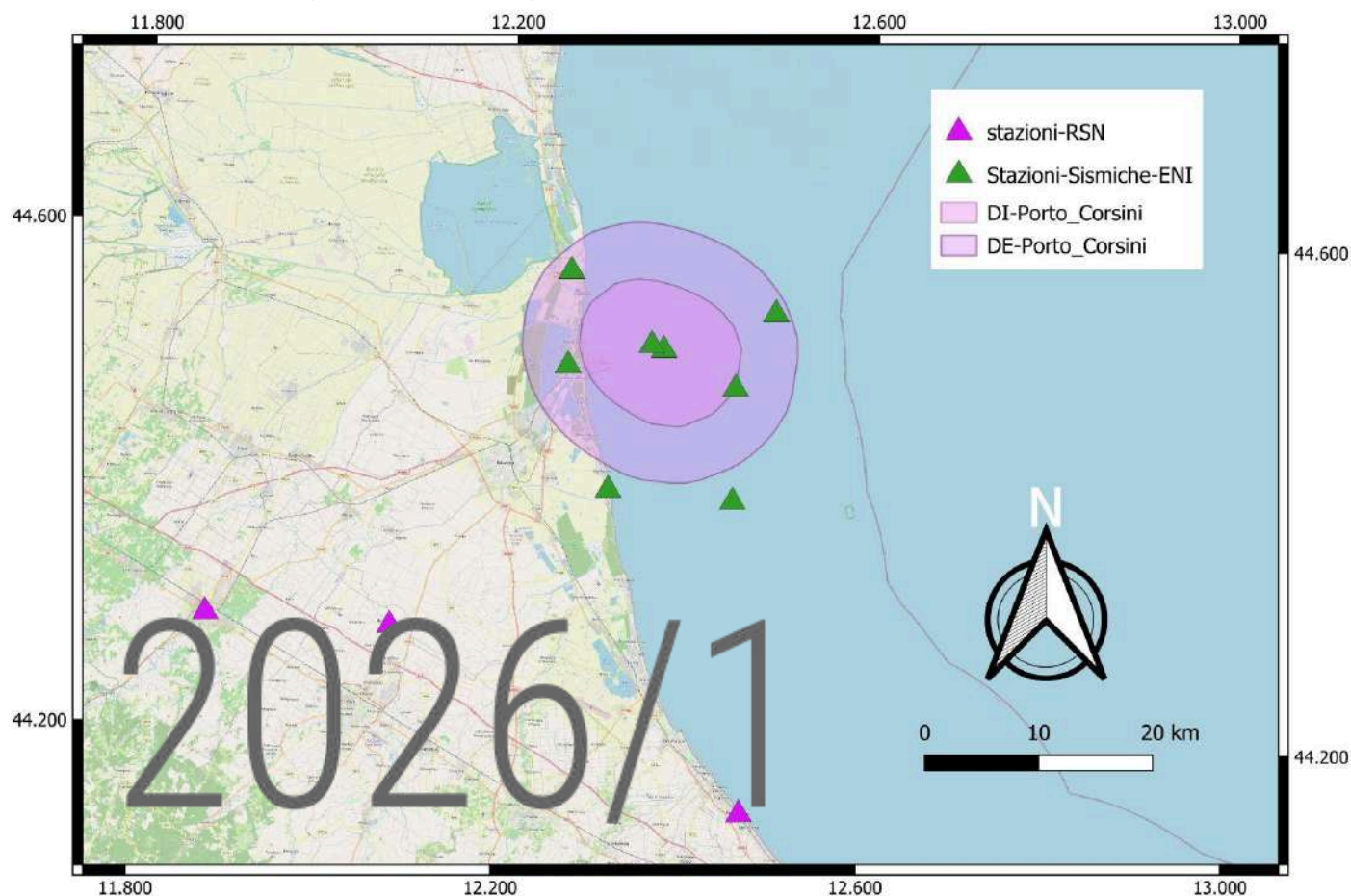
MONITORAGGIO DEL PROGRAMMA SPERIMENTALE DI STOCCAGGIO GEOLOGICO DI CO₂ "Ravenna CCS fase 1"

Responsabili di Progetto: Mario Anselmi, Letizia Anderlini, Giuseppe Pezzo

Autori: Mario Anselmi, Letizia Anderlini, Giuseppe Pezzo, Gilberto Saccorotti, Raffaello Pegna, Daniela Famiani, Eleonora Vitagliano, Sofia Baranello, Maddalena Errico, Giampaolo Zerbinato, Gruppo di Lavoro del CMS*

Redazione: M. D'Ambrosio

26/06/2026 (versione finale)



*Gruppo di Lavoro del CMS			
<i>Analisti</i>	<i>Informatici</i>	<i>Collaboratori</i>	<i>Comitato Direttivo</i>
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 Giampaolo Zerbinato	Sofia Baranello Lisa Beccaro Licia Faenza Letizia Elia Leonardo Martelli Enrico Serpelloni Enrico Rocchetti Gianpaolo Sensale Cristiano Tolomei Marco Polcari Simone Vecchi Eleonora Vitagliano Raffaello Pegna	Letizia Anderlini Mario Anselmi Thomas Braun Alexander Garcia Giuseppe Pezzo Lucia Zaccarelli <i>Coordinatore</i> Gilberto Saccorotti

INDICE

Premessa.....	4
1 Parametri di monitoraggio.....	6
2 Sismicità strumentale dell'area.....	8
3 Descrizione della rete sismica.....	9
4 Descrizione rete GNSS.....	12
5 Monitoraggio sismico e analisi dati.....	15
5.1 Disponibilità dei dati.....	15
5.2 Modello di velocità.....	17
5.3 Monitoraggio della sismicità.....	17
5.4 Aggiornamento della sismicità localizzata dalla SPM nei domini di monitoraggio (DI,DE) del campo PCMW CCS durante il periodo 1 Aprile 2023- 18 Aprile 2026.....	18
6 Misure di deformazione.....	21
6.1 Elaborazione del dato GPS e serie temporali di spostamento.....	21
6.2 Campo di velocità GPS.....	23
6.3 Misure di deformazione tramite InSAR.....	26
6.4 Livellazione ad alta precisione.....	30
7 Monitoraggio DAS.....	32
7.1 Geometria e parametri di acquisizione.....	32
7.2 Disponibilità e trasmissione dati.....	34
7.3 Derive di temporizzazione.....	34
7.4 Caratteristiche generali dei segnali.....	36
7.5 Rilevazione automatica di segnali transienti.....	37
7.6 Risultati del processo di detezione.....	40
7.7 Localizzazione probabilistica non-lineare.....	46
7.8 Considerazioni conclusive.....	48
8 Analisi dei dati di pressione e portata.....	50
9 Considerazioni conclusive.....	52
Glossario.....	56
Appendice A - Sismicità e rete sismica nazionale.....	57
Appendice B - Serie temporali di spostamento GPS.....	64
Appendice C Deriva nella temporizzazione del sistema DAS.....	77
Appendice D.....	78
D.1 Metodo per la rilevazione automatica di segnali transienti.....	78
Appendice E.....	80
E.1 RegISTRAZIONI alla rete P1 dei microsismi individuati dal sistema DAS.....	80
Bibliografia.....	83

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) al Programma sperimentale di stoccaggio di anidride carbonica (CO₂) denominata "CCS Ravenna fase 1" in Emilia Romagna (<https://cms.ingv.it/monitoraggi/ravenna-ccs-fase-1>).

In data 26 gennaio 2023 la società Eni S.p.A (di seguito "Concessionario") ottiene l'autorizzazione al progetto finalizzato allo svolgimento di un programma sperimentale di stoccaggio geologico di anidride carbonica (CO₂) denominato "CCS Ravenna fase 1", per un volume inferiore alle 100.000 tonnellate e durata di iniezione pari ad un massimo di due anni - nel complesso di stoccaggio individuato dal livello esaurito PL2-C del campo Porto Corsini Mare Ovest (PCMW) - denominato "PCMW CCS" - nell'ambito dell'area in concessione di coltivazione di idrocarburi denominata "A.C26.EA".

Di seguito riportiamo una cronologia essenziale delle fasi che hanno portato alla stesura dei documenti che regolano il monitoraggio (Tabella 1.1)

Data	Documento
26 gennaio 2023	Autorizzazione al progetto finalizzato allo svolgimento del programma sperimentale di stoccaggio geologico di anidride carbonica (CO ₂) denominato "CCS Ravenna fase 1"
14 Marzo 2024	Trasmissione Accordo Quadro (AQ) tra il Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MaSE), Regione Emilia Romagna, Comune di Ravenna e INGV, nel quale l'INGV viene nominato Struttura Preposta al Monitoraggio (SPM) per il complesso di stoccaggio denominato "PCMW CCS", nell'ambito dell'area in concessione di coltivazione di idrocarburi denominata "A.C26.EA".
15 maggio 2024	Riunione di insediamento del Comitato
28 Giugno 2024	Approvazione del Documento di Gestione Operativa del Monitoraggio (DGOM)
05 Agosto 2024	Inizio delle operazioni di iniezione da parte del Concessionario nel sito di PCMW CCS
18 aprile 2025	Ratifica dei protocolli d'Intesa tra Comune di Ravenna - Concessionario e Comune di Ravenna - SPM
31 agosto 2025	Termine delle operazioni di iniezione
15 settembre 2025	Comunicazione da parte del Concessionario del fermo dell'impianto di iniezione
18 ottobre 2025	Scadenza del primo semestre di monitoraggio
18 aprile 2026	Scadenza del secondo semestre di monitoraggio

Tabella 1.1. Date dei principali passaggi relativi all'approvazione e trasmissione dei documenti autorizzativi e regolatori del monitoraggio e delle principali operazioni industriali del programma sperimentale.

Nel presente rapporto vengono riportati i risultati del monitoraggio sismico e delle deformazioni per il secondo semestre di attività, ovvero dal 19/10/25 al 18/04/2026.

1 Parametri di monitoraggio

Per contestualizzare le attività di monitoraggio della concessione di stoccaggio sperimentale 'Ravenna CCS fase 1', richiamiamo brevemente quanto già descritto nella Relazione n. 1. Le definizioni dei domini e le relative soglie di riferimento si basano sul capitolo 9 degli ILG e seguono il Documento di Gestione Operativa del Monitoraggio (DGOM), consultabile al seguente [link](#). Si specifica che il DGOM è stato redatto in linea con i principi generali degli ILG, ma adotta un approccio più prudente. Tale scelta è legata sia all'assenza di un quadro informativo geofisico d'analisi completo, sia all'assunzione del comportamento della CO₂ come fluido incompressibile (nonostante il suo stato fisico e la sua dinamica dipendano strettamente dalle condizioni di pressione e temperatura del giacimento).

Il livello mineralizzato esaurito dove viene effettuata l'iniezione ha una profondità di circa 3 km. Per circoscrivere il Dominio Interno (DI) è stato considerato il volume contenuto in un raggio di 5 km attorno al limite dell'area mineralizzata, ed estensione in profondità sino a -8 km s.l.m. Per circoscrivere il Dominio Esteso (DE) è stato considerato un volume, contenuto in un raggio di 5 km attorno al DI, ed esteso sino ad una profondità di -13 km s.l.m. La mappa con i contorni dei due domini è riportata in Figura 1.1.

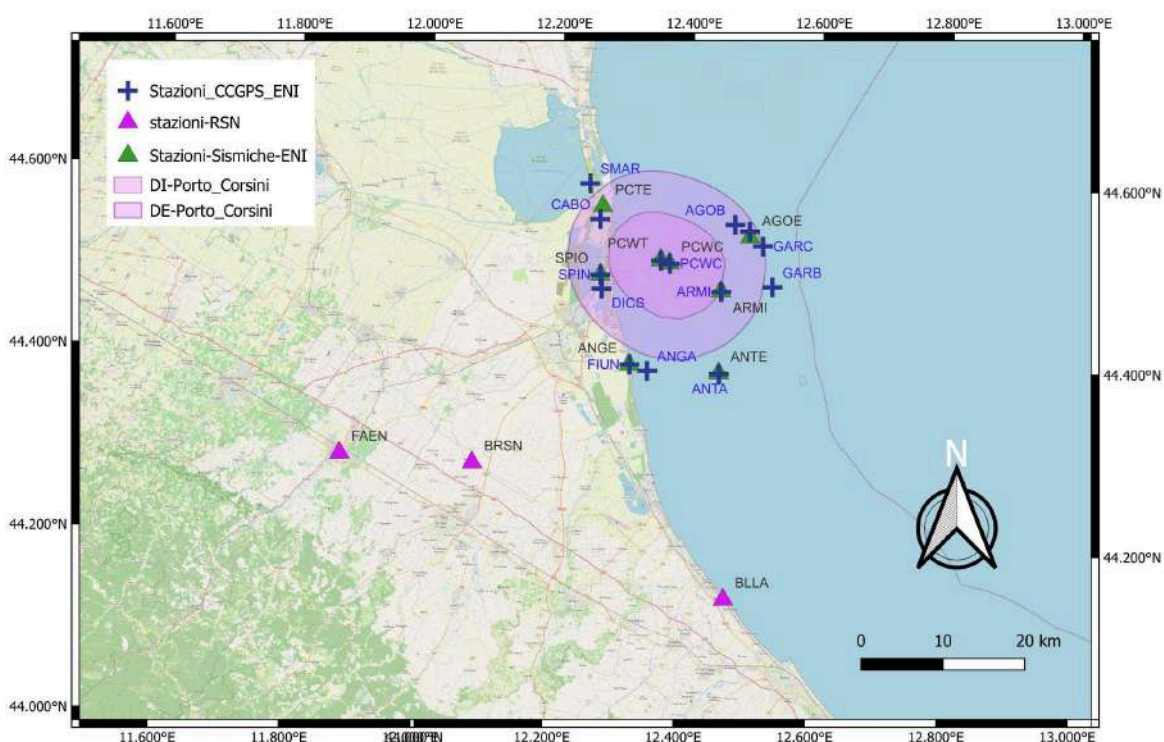


Figura 1.1 Mappa dell'area di Porto Corsini che mostra i Domini Interno ed Esteso (DI e DE), le stazioni della rete sismica del Concessionario (in verde) e le tre stazioni della Rete Sismica Nazionale (BRSN, BLLA e FAEN) in magenta.

Pertanto in questo contesto viene applicato un sistema TLS di tipo automatico. Esso si basa sui seguenti parametri:

- Coordinate ipocentrali rispetto al DI;
- Magnitudo;
- PGV (Peak Ground Velocity);
- PGA (Peak Ground Acceleration).

In mancanza del quadro conoscitivo di riferimento, abbiamo fatto riferimento ai valori generici suggeriti dagli ILG per le attività di reiniezione, che sono presentati nella Figura 1.2. E' sufficiente pertanto che, per un evento localizzato internamente al DI, uno dei parametri osservati superi il valore di soglia per far passare l'attenzione al livello successivo (TLS con automatismi).

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

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

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

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

Le azioni da mettere automaticamente in atto al superamento di ciascuna soglia sono estensivamente descritte nel DGOM ed ai capp. 9.3 e 9.4 degli ILG.

2 Sismicità strumentale dell'area

L'analisi della sismicità strumentale nell'area compresa tra Lagosanto e Milano Marittima in direzione Nord-Sud, e tra Bagnacavallo e il Mare Adriatico in direzione Est-Ovest (Lat.: 44.3–44.8; Lon.: 12.0–12.6) (Figura 2.1), è stata aggiornata integrando i dati strumentali più recenti con il quadro storico e strumentale già definito nel precedente report.

Per la sismicità strumentale recente (dal 1985 ad oggi), è stato consultato il bollettino dei terremoti strumentali registrati e localizzati dall'INGV (<https://www.ingv.it>; accesso 18 aprile 2026). In questo caso è stata effettuata una ricerca nell'area di interesse per eventi di magnitudo $-1 < M < 10$ e profondità comprese tra -10 e 50 Km. Sono stati individuati 164 terremoti (Figura 3.1 e Tabella A.1 in Appendice A), con magnitudo massima uguale a 4.3.

Dall'analisi della sismicità strumentale (dal 1985 al 2026), emerge che l'area è caratterizzata da eventi sismici la cui massima Magnitudo osservata è pari a 5.5. La Figura 2.1 rappresenta la distribuzione geografica epicentrale dei 164 strumentali (cerchi rossi) identificati e i limiti dei DI e DE (linea viola e arancione, rispettivamente). Nel DI si osservano 8 eventi sismici dal catalogo strumentale; nel DE sono invece stati identificati 15 terremoti recenti strumentali. Per gli eventi che, in mappa (Figura 2.1), ricadono all'interno dei contorni viola e arancione (DI e DE, rispettivamente), è comunque necessario considerare anche la rispettiva profondità ipocentrale, ai fini dell'effettiva collocazione all'interno del dominio, compatibilmente con i limiti di risoluzione delle localizzazioni strumentali. Ad esempio, i terremoti che in mappa ricadono nel DI appartengono effettivamente a tale dominio solo se la loro profondità è inferiore a 8 Km. Tra questi, soltanto due eventi soddisfano tale criterio: essi sono evidenziati in fucsia nella Tabella A-2. Per profondità comprese tra 8 e 13 Km, il dominio di appartenenza è il DE (Dominio Esteso). In questo intervallo rientrano effettivamente 12 eventi, che sono evidenziati in rosa nella Tabella A-2. Tutti gli eventi con profondità superiori a 13 km, risultano al di fuori di entrambi i domini.

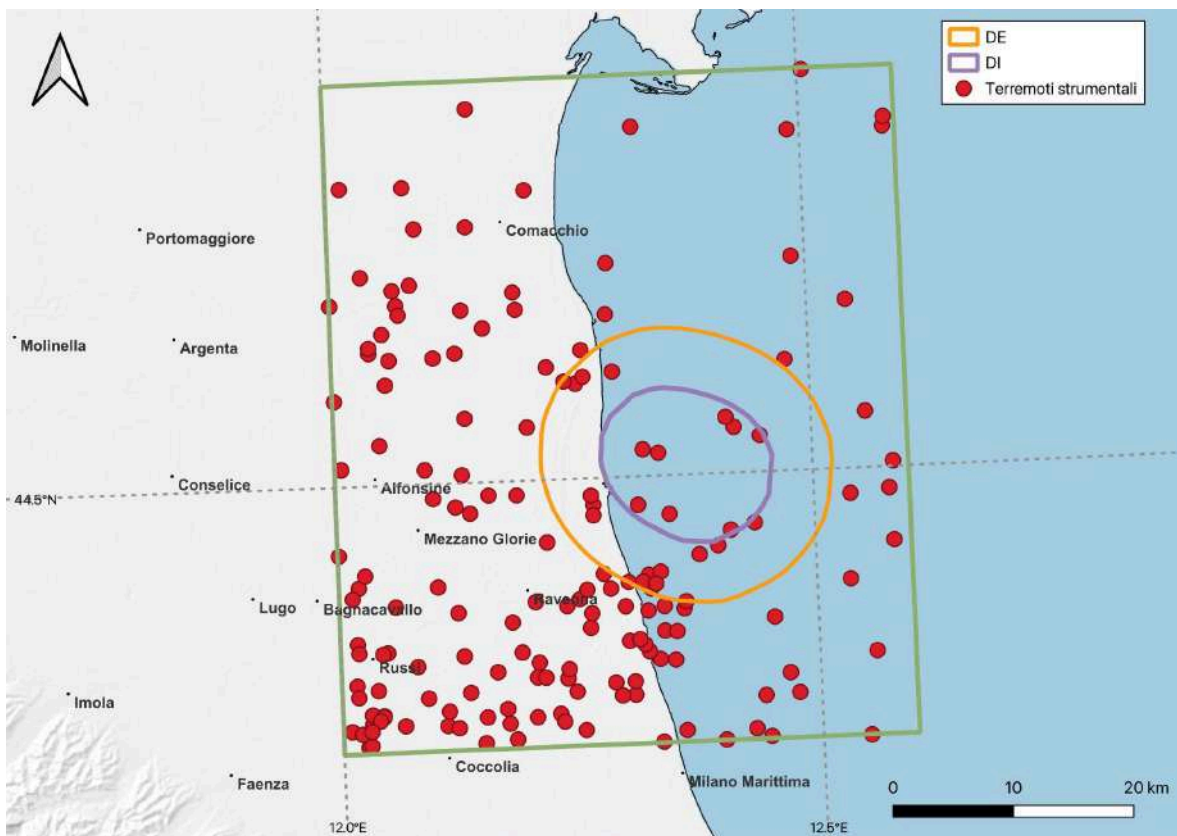


Figura 2.1: Mappa della distribuzione dei terremoti strumentali (relativi al periodo 1985-2026) che ricadono nell'area di interesse (rettangolo in verde). Il contorno viola identifica il DI mentre quello arancione identifica il DE.

3 Descrizione della rete sismica

La rete sismica del campo PCMW CCS è composta da stazioni installate sia in terraferma (3 stazioni: ANGE, PCTE e SPIO) che in mare aperto (5 stazioni: AGOE, ANTE, ARMI, PCWC, PCWT; Tabella 3.1 e Figura 3.1). A questa rete (denominata P1), la SPM ha integrato 3 stazioni della Rete Sismica Nazionale dell'INGV (Tabella 3.2 e Figura 3.1)

Tutte le 8 stazioni della rete P1 sono equipaggiate con un acquirente Solgeo Dymas24 System V (<https://www.luchsinger.it/contents/products/data-sheet-dymas-24-master-v.pdf>) con segnale continuo campionato ad una frequenza di 200 Hz.

Le stazioni in terraferma ANGE e SPIO hanno un sismometro in pozzo modello Sara SS10BHV (<https://products.quakelogic.net/product/sara-ss-bhv-borehole-seismograph/>), mentre l'altra stazione PCTE è equipaggiata con un sensore Lennartz Le3Dlite MKII (<https://reftek.com/sites/default/files/2023-12/REFETKLennartz-ProductBrochure.pdf>).

Tutte le stazioni in terraferma sono anche dotate di un accelerometro di tipo Sara SA10 (https://www.sara.pg.it/prodotti.php?id=57&n=sa-10&cat=single-product&cookie_consent=1), e sono alimentate tramite rete elettrica a 230 VAC, tranne la stazione SPIO che è invece alimentata a pannelli solari.

Le stazioni offshore ANTE e PCWT sono alimentate dalla tensione a 24 VDC della piattaforma, a sua volta alimentata da pannelli solari, mentre le altre stazioni offshore sono alimentate a 230 VAC

Stazione	Latitudine	Longitudine	Quota (m)	Quota del sensore (m)	Distanza dalla costa (km)	Data di installazione
AGOE	44.540878°	12.495122°	0	-23	17	22/03/2023
ANGE	44.397150°	12.315581°	1	-69	on-shore	27/01/2022
ANTE	44.390842°	12.453144°	0	-15	11	16/02/2023
ARMI	44.480647°	12.452836°	0	-19	13	23/03/2023
PCTE	44.570003°	12.267675°	1	1	on-shore	28/01/2022
PCWC	44.509675°	12.372431°	0	-14	7	22/03/2023
PCWT	44.513111°	12.358917°	0	-13	6	22/03/2023
SPIO	44.494886°	12.267086°	2	-97	onshore	29/11/2022

Tabella 3.1. Tabella delle stazioni sismiche della rete del Concessionario.

La Tabella 3.2 elenca invece le stazioni della RSN INGV più vicine all'area di studio, che sono state integrate alla rete del Concessionario.

Stazione	Latitudine	Longitudine	Quota (m)	Località	Data installazione	Distanza dal pozzo iniettore (km)
BLLA	44,1429	12,4703	1,00	BELLARIA	15/01/2009	46
BRSN	44,2842	12,0802	20,00	BARISANO	01/03/2003	42
FAEN	44,2895	11,8770	41,00	FAENZA	17/09/2007	34

Tabella 3.2 Tabella delle stazioni della Rete Sismica Nazionale utilizzate nel monitoraggio.

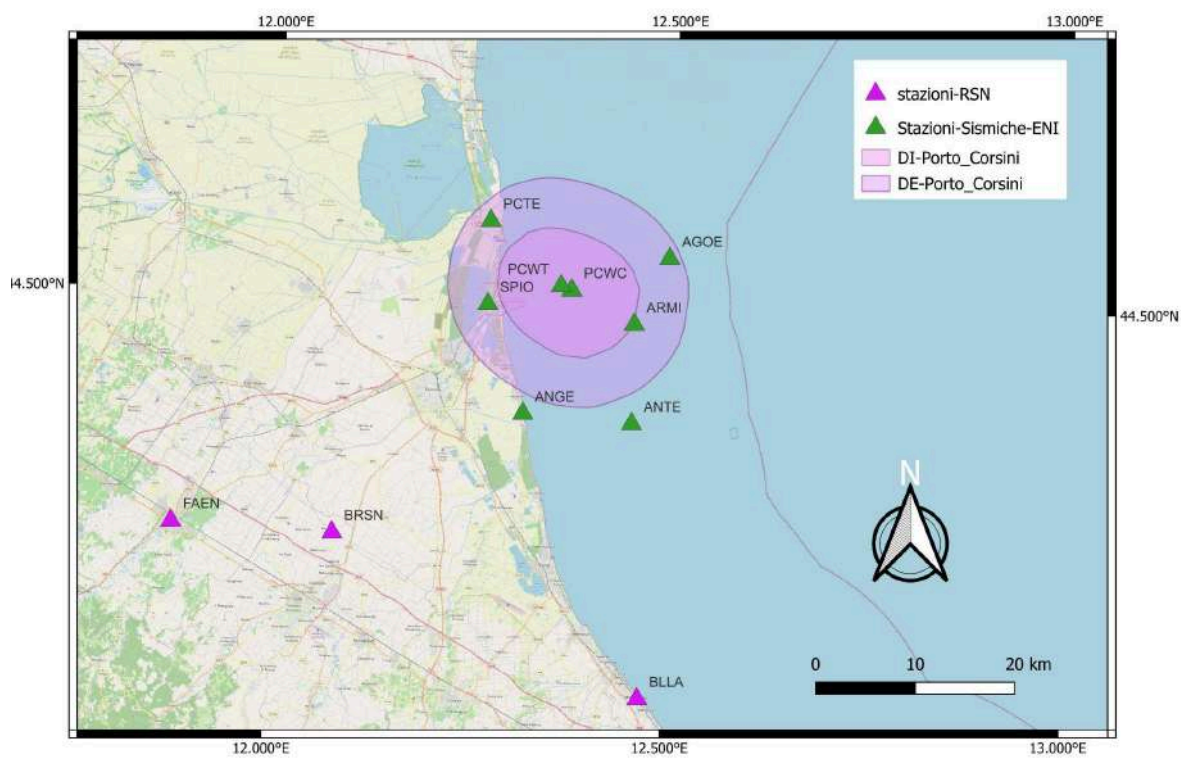


Figura 3.1 Mappa del campo PCMW CCS, raffigurante i limiti dei domini DI e DE, le stazioni della rete locale del Concessionario (in verde) e le stazioni della RSN INGV (in magenta).

4 Descrizione rete GNSS

Come già richiamato nei precedenti paragrafi, le indicazioni degli ILG per la rete geodetica sono calibrate soprattutto per attività minerarie a terra. Pertanto, la rispondenza ai requisiti esposti negli ILG sono tenuti in considerazione ai fini di una valutazione circa l'applicabilità dei medesimi a contesti *offshore*, evidenziandone al tempo stesso le possibili limitazioni.

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

In Tabella 4.1 è riportato l'elenco delle stazioni che compongono la rete di monitoraggio geodetico installate dal concessionario con le corrispondenti caratteristiche tecniche, che è composta da 14 stazioni GNSS permanenti poste all'interno dei domini di monitoraggio. Tutte le stazioni sono equipaggiate con strumentazione *“di precisione (di tipo geodetico)”* conforme agli scopi illustrati secondo gli ILG.

La rete di monitoraggio si trova prevalentemente *off-shore* (a mare), con 9 stazioni installate su piattaforma e 5 installate a terra (*on-shore*). La geometria della rete ha seguito le indicazioni fornite nella prescrizione n.7 dal Comitato ETS e riportate nel Decreto Ministeriale di autorizzazione¹, che suggerisce di installare il maggior numero possibile di nuove stazioni, oltre a quelle già esistenti di lunga data. Prima dell'inizio delle attività di iniezione sono state quindi installate due nuove stazioni a mare (AGOC e PCWT) e due a terra (CABO e DICS).

Dall'analisi eseguita nel precedente rapporto risulta che la rete geodetica così impostata segue le indicazioni riportate negli ILG, dal momento che: la strumentazione utilizzata è adatta a scopi geofisici, la maggior parte delle stazioni è ancorata al substrato roccioso, le stazioni GNSS sono posizionate in modo ottimale ai fini dell'acquisizione, registrando dati con un'elevata qualità e con una buona continuità temporale.

¹ Decreto Ministeriale 26 gennaio 2023 della Direzione Generale Infrastrutture e Sicurezza del Ministero dell'ambiente e della Sicurezza Energetica, pubblicato sul BUIG - Bollettino ufficiale degli idrocarburi e delle georisorse - Anno LXVII, n. 1 -31 gennaio 2023 Appendice all'All.1, par. 9.2 della prescrizione n. 7

Nome sito	Long (°E)	Lat. (°N)	Quota (m)	Posizione	Data Installazione	Antenna	Ricevitore
AGOB	12.47200	44.55410	50	Off-shore	11/10/2003	ASH701945B_M	ASHTech UZ-12
					20/11/2021	LEIAR20	LEICA GR30
AGOC	12.49450	44.54697	73	Off-shore	20/01/2024	STXSA1200	STONEX SC2200
ANGA	12.34400	44.39100	38	Off-shore	02/12/1998	ASH700936D_M	ASHTech Z-XII3
					19/06/2002		ASHTech UZ-12
					19/10/2021	LEIAR20	LEICA GR30
ANTA	12.45400	44.38970	38	Off-shore	08/07/2005	ASH701945E_M	ASHTech UZ-12
					11/01/2023	LEIAR20	LEICA GR30
ARMI	12.45300	44.48000	38	Off-shore	04/12/2008	ASH701945E_M	ASHTech UZ-12
					07/12/2021	LEIAR20	LEICA GR30
CABO	12.26420	44.55570	45	On-shore	20/01/2024	STXSA1200	STONEX SC2200
DICS	12.26963	44.47955	44	On-shore	20/01/2024	STXSA1200	STONEX SC2200
FIUN	12.31600	44.39730	44	On-shore	11/03/2002	ASH701945E_M	ASHTech UZ-12
					10/09/2021	LEIAR20	LEICA GR30
GARB	12.53200	44.48670	66	Off-shore	10/10/2003	ASH701945B_M	ASHTech UZ-12
					07/03/2024	LEIAR20	STONEX SC2200
GARC	12.51500	44.53140	72	Off-shore	09/10/2003	ASH701945B_M	ASHTech UZ-12
					21/03/2024	STXSA1200	STONEX SC2200
PCTA	12.26700	44.49480	45	On-shore	12/04/2002	ASH701945B_M	ASHTech UZ-12
					15/07/2021	LEIAR20	LEICA GR30
PCWC	12.37300	44.50920	72	Off-shore	10/04/2003	ASH701945B_M	ASHTech UZ-12
					12/05/2015		LEICA GR10
PCWT	12.35947	44.51227	73	Off-shore	20/01/2024	STXSA1200	STONEX SC2200
SMAR	12.24700	44.59440	44	On-shore	12/07/2002	ASH701945B_M	ASHTech UZ-12
					14/07/2021	LEIAR20	LEICA GR30

Tabella 4.1: Elenco delle stazioni GNSS installate per il campo PCMW CCS con coordinate, data di installazione e strumentazione in uso.

L'unica criticità riscontrata per questo tipo di rete riguarda il fatto l'area di monitoraggio del campo PCMW CCS è circondata da altre concessioni di coltivazione idrocarburi tuttora attive e le serie temporali di spostamento delle altre stazioni GNSS su piattaforma potrebbero essere influenzate da questi processi. Infatti molte stazioni off-shore sono caratterizzate da una decelerazione a lungo termine che può interessare le intere serie temporali di spostamento e risulta pertanto necessario eseguire un'analisi specifica delle acquisizioni GNSS in modo da minimizzare queste influenze e massimizzare allo stesso tempo l'osservazione degli spostamenti prevalentemente legati al campo di Porto Corsini Mare Ovest.

Si è scelto quindi di analizzare i dati GNSS a partire dal 2018 per poter avere acquisizioni che siano il meno influenzate possibile da andamenti non lineari e poter stimare di conseguenza i termini lineari di spostamento più rappresentativi dello stato attuale di monitoraggio. La Figura 4.1 mostra la percentuale dei RINEX giornalieri disponibili per ciascun mese di acquisizione per ogni stazione del campo PCMW CCS a partire dal 01/01/2018 fino al 30/04/2026. Osservando un periodo di dati più ristretto, è possibile notare meglio la presenza dei dati anche negli ultimi 6 mesi di acquisizione, evidenziando un'ottima continuità del dato (~100%) per quasi tutte le stazioni GNSS, tranne PCTA che ha una presenza dei dati di circa l'80% negli ultimi 6 mesi.

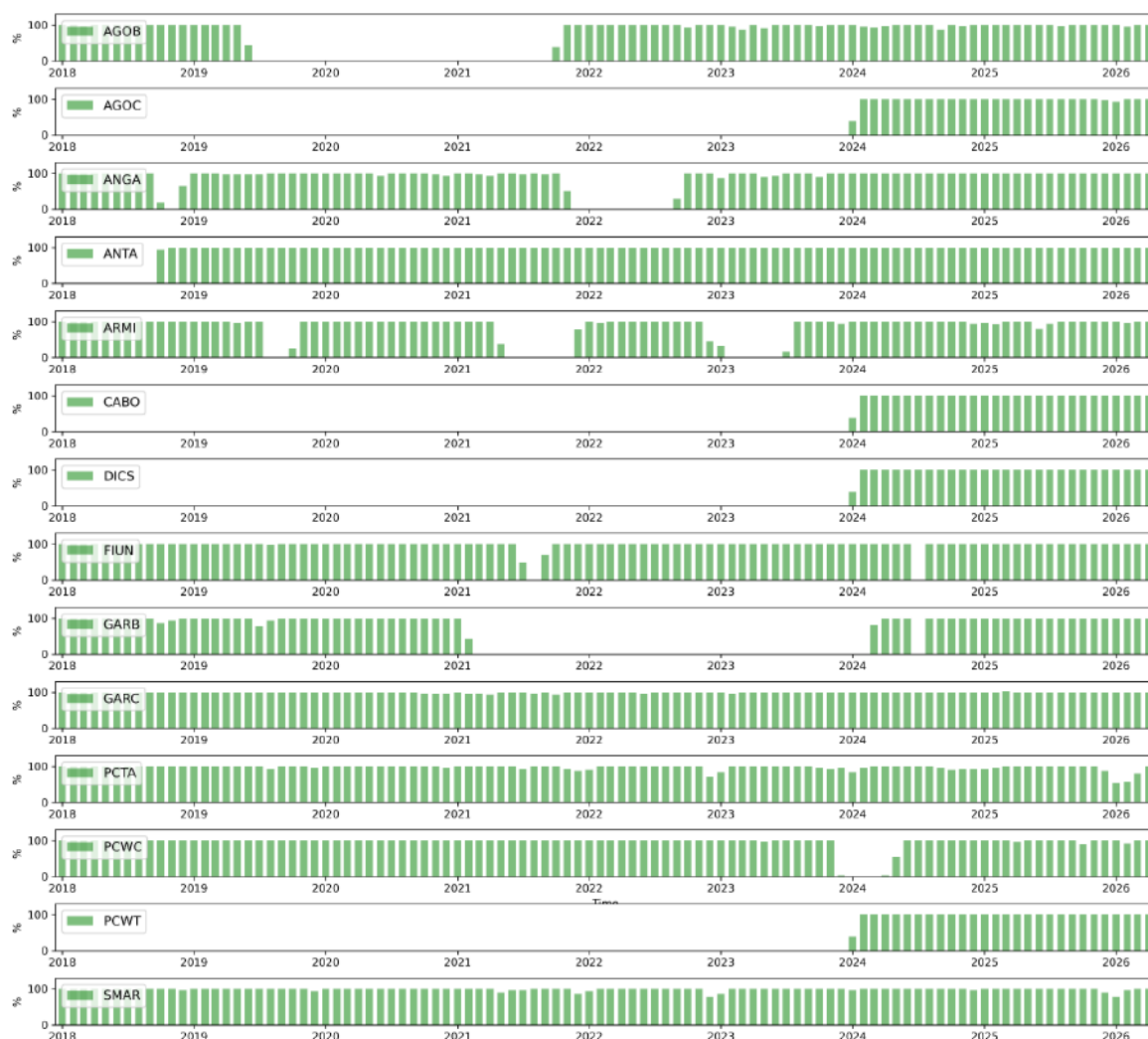


Figura 4.1: Percentuale di RINEX giornalieri disponibili per ciascun mese di acquisizione a partire dal 01/01/2018 fino al 30/04/2026 per ogni stazione della rete di Porto Corsini

5 Monitoraggio sismico e analisi dati

In questo capitolo viene descritta l'analisi della sismicità eseguita dalla SPM, con riferimento ai domini DI e DE del programma CCS Ravenna fase 1 nel campo di Porto Corsini Mare Ovest (PCMW CCS) e nelle immediate vicinanze, nel periodo precedente, in quello relativo alle attività industriali e in quello successivo fino alla data del 18 Aprile 2026 (come indicato dalle ILG al Paragrafo 5.3-2).

5.1 Disponibilità dei dati

La Figura 5.1 mostra la disponibilità dei segnali di ciascuna stazione per il periodo di analisi dell'ultimo semestre di monitoraggio, che va dal 19 Ottobre 2025 al 18 Aprile 2026. Ad eccezione di brevi interruzioni di durata al massimo giornaliera che hanno interessato quasi tutte le stazioni della rete in periodi diversi, le uniche interruzioni significative sono state quelle della stazione PCWC nel periodo che va dal 2026-02-24_00:17 UTC al 2026-02-27_09:07 UTC (smobilitazione impianto di perforazione al pozzo PCW-B, come comunicato dal Concessionario) e della stazione PCTE dal 2026-01-02 13:27 UTC al 2026-01-16 12:54 UTC (guasto al modem di trasmissione, come comunicato dal Concessionario), mentre vi è stata un'interruzione generale di tutte le stazioni dal 2026-03-11 11:32 UTC circa al 2026-03-12 07:42:38.00 UTC circa, legate probabilmente a problemi di trasmissione dei dati.

In aggiunta si nota che la stazione AGOE, a partire dai primi di Dicembre 2025 fino al 18 aprile 2026 (per la componente N) e dalla fine di Novembre 2025 fino al 18 Aprile 2026 (per la componente Z) ha avuto problemi di qualità del segnale come visibile dalle immagini in Figura 5.2. In particolare si nota una progressiva modifica sia nella morfologia che negli intervalli di variabilità delle distribuzioni di densità spettrale. Per la componente N, la forma delle distribuzioni spettrali approssima gradualmente un caratteristico andamento a 'V', caratteristico del rumore di natura elettronica. Per la componente Z, si osserva invece un progressivo aumento della rumorosità a periodi maggiori di 1s e minori di 0.1s.

Le nostre osservazioni vengono confermate da una comunicazione del Concessionario, che attribuisce tali anomalie a problemi di alimentazione e al parziale danneggiamento dell'alloggiamento del sensore a causa di attività di terzi comunque non consentite nell'area.

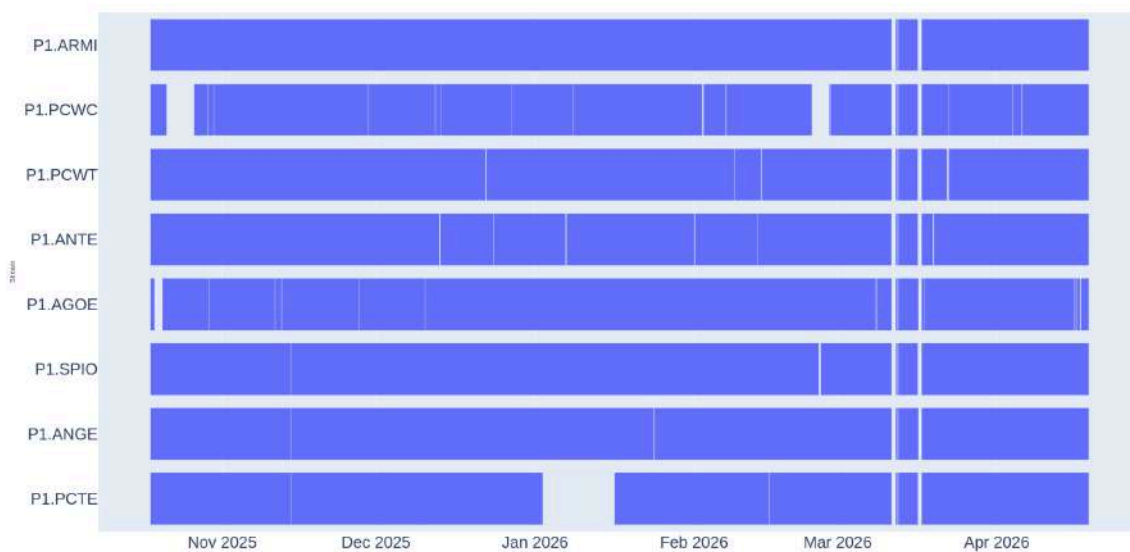


Figura 5.1 Schema della disponibilità dei dati della rete del Concessionario dal 19 Ottobre 2025 al 18 Aprile 2026.

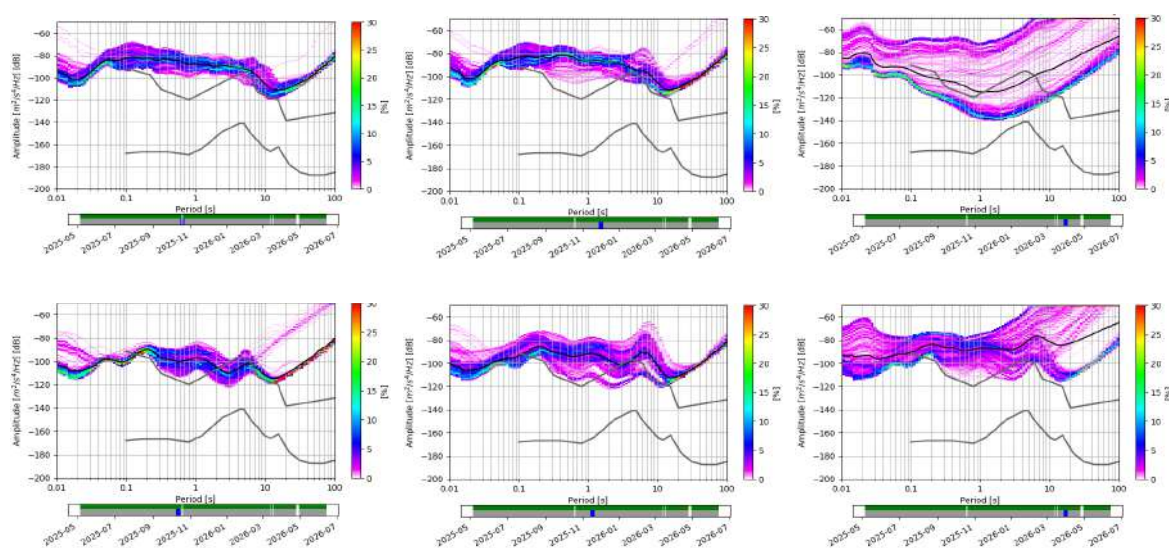


Figura 5.2. (In alto) Immagini delle PPSD (medie settimanali) della componente N della stazione AGOE, rispettivamente per le settimane con inizio al 16 Ottobre 2025, 5 Dicembre 2025 e 2 Aprile 2026. (In basso) Immagini delle PPSD (medie settimanali) per la componente Z, per le settimane con inizio al 16 Ottobre 2025, 20 Novembre 2025 e 2 Aprile 2026.

	AGOE	ANGE	ANTE	ARMİ	PCTE	PCWC	PCWT	SPIO
19/10/2025 - 18/04/2026	98.7%	99.6%	99.5%	99.6%	93.6%	94.0%	99.6%	99.7%

Tabella 5.1: Percentuali della disponibilità del dato per ogni stazione calcolate su base annuale per tutto il periodo 19 Ottobre 2025-18 Aprile 2026.

5.2 Modello di velocità

Per la localizzazione della sismicità abbiamo scelto uno dei 2 modelli 1-D utilizzati dal Concessionario, in particolare quello denominato "Modello Costiero" per tutte le stazioni utilizzate durante il monitoraggio. Riteniamo infatti che tale modello rappresenti in maniera realistica le velocità sismiche, e relativa sequenza stratigrafica, caratteristiche dell'area oggetto del monitoraggio (Tabella 5.2).

Depth	Vp (km/s)	Vp/Vs
0	1,8	4,50
0,5	2,1	2,63
1,0	2,4	2,40
1,5	2,6	2,17
2,00	2,8	2,00
2,50	3,2	1,88
3,50	3,5	1,84
5,00	4,2	1,83
6,00	5,0	1,82
11,00	6,2	1,81
35,00	8,1	1,80

Tabella 5.2 Modello di velocità 1-D utilizzato per la localizzazione degli eventi sismici.

5.3 Monitoraggio della sismicità

Per le procedure di analisi il CMS utilizza il software SeisComp (<https://www.seiscomp.de/>) che permette un'analisi automatica del segnale sismico sia in tempo reale che differito, come descritto nel rapporto precedente.

Per il calcolo della magnitudo locale ML, oltre alla relazione di Bakun and Joyner già descritta nel precedente report, è stata introdotta e aggiunta al sistema anche la relazione sviluppata da Bragato e Tonto (2005) per l'area del Nord-Est italiano. La notazione di questa relazione è indicata con MLbt:

$$MLbt = \log A + 2,23 \cdot \log(R/100) - 0,0039 \cdot (R-100) + 3$$

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

Si ricorda che i segnali registrati alle stazioni della rete P1 vengono elaborati in modo automatico e in tempo reale insieme a quelli acquisiti da una selezione di stazioni della rete IV, come riportato nella descrizione della rete sismica integrata (Tabella. 3.1., Tabella 3.2 e Figura 3.1).

5.4 Aggiornamento della sismicità localizzata dalla SPM nei domini di monitoraggio (DI,DE) del campo PCMW CCS durante il periodo 1 Aprile 2023- 18 Aprile 2026.

In questo paragrafo riassumiamo tutta l'attività sismica nei domini interno (DI) ed esteso (DE) e nelle immediate vicinanze del programma sperimentale di stoccaggio geologico di CO₂ "CCS Ravenna fase 1" avvenuta in tutto il periodo di osservazione, dal 1 Aprile 2023 al 18 Aprile 2026. Vengono qui aggiunti anche i risultati relativi alla valutazione della diversa relazione per il calcolo della ML, così descritta nel Paragrafo 5.3.

Nel periodo di analisi sono stati localizzati 16 eventi sismici in totale (Figura 5.3), come elencati nella Tabella 5.3. Nessuno degli eventi registrati è avvenuto all'interno del Dominio Interno della Concessione (DI), mentre gli eventi del **2023-08-03**, **2023-12-28**, entrambi gli eventi del **2024-04-29**, gli eventi **2025-08-23_14:19:38** e **2025-09-26_23:56:49** sono avvenuti all'interno del Dominio Esteso. Tutti gli altri ricadono al di fuori dei domini della Concessione.

Nel corso della revisione critica della sismicità analizzata segnaliamo una rettifica, relativa all'evento **2023-12-25_05:27:41** (sottolineato in Tabella 5.3): l'evento, sempre con forti incertezze sulla localizzazione, si localizza al di fuori dai domini di rilevazione, mentre nel precedente report risultava essere all'interno del DE. Come conseguenza anche la stima della Magnitudo MLbj (Bakun-Joyner), calcolata sempre utilizzando le 2 stazioni più vicine, passa da 0,75 a 0,28, mentre il nuovo valore di MLbt (Bragato -Tonto) è di -0.01.

Nella Tabella 5.3 è stato inserito, in una colonna a parte, il calcolo della MLbt per tutti gli eventi registrati.

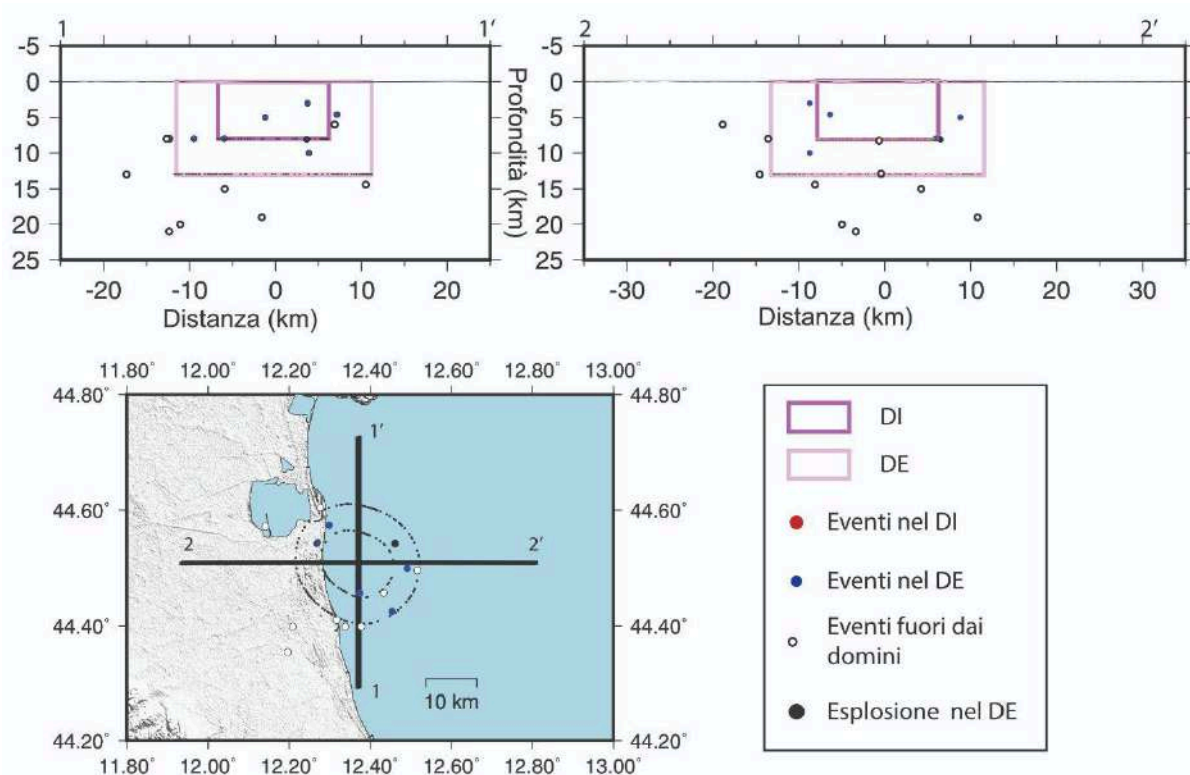
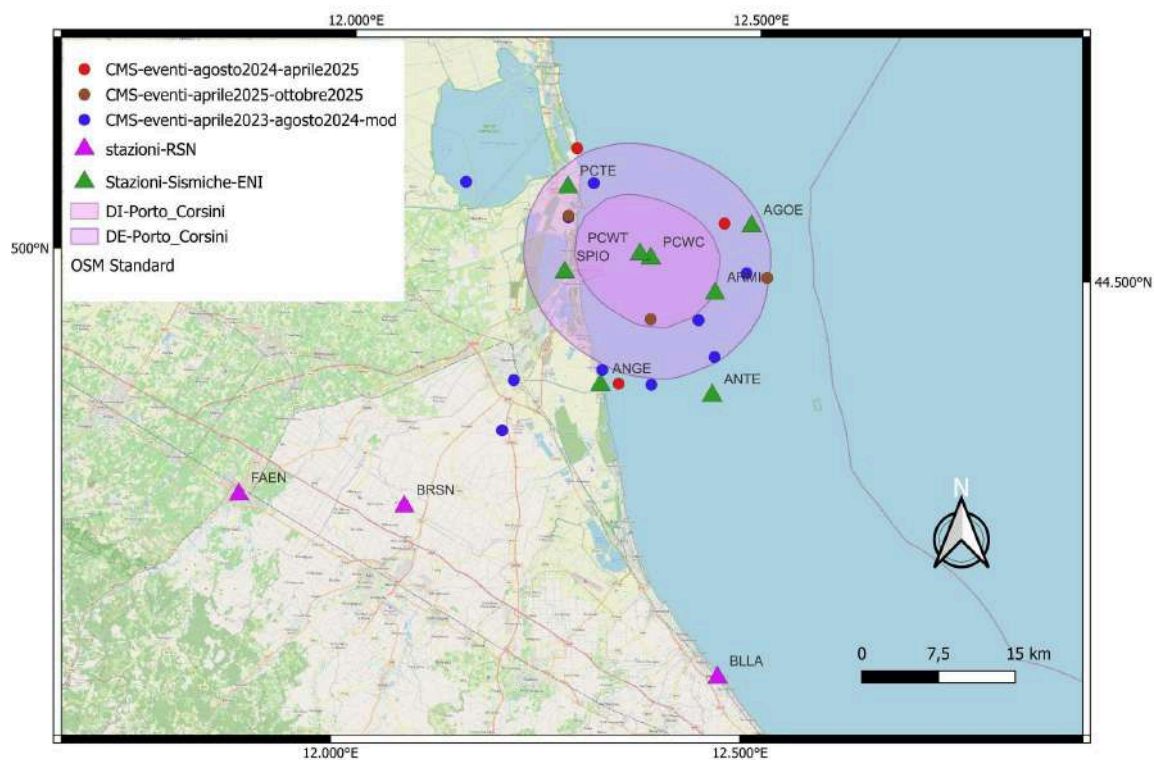


Figura 5.3 In alto: Mappa epicentrale degli eventi sismici avvenuti nell'intero periodo di osservazione 1 Aprile 2023 -18 Aprile 2026. In basso: Sezioni verticali della stessa sismicità e posizione degli eventi rispetto ai domini.

DATE	Type	M-(type)	ML _{bt}	N° phases	RMS	LAT	LON	DEPTH (km)	Domini
2023-05-21_03:56:05	earthquake	1,39(MLbj) ± 0.11	1,19 ± 0.26	13	0,61	44,3987 ± 1km	12,2090 ± 1km	8,0 ± 3km	Esterno ai domini
2023-07-28_19:58:44	earthquake	1,69(ML) ± 0.58	1,78 ± 0.53	11	0,43	44,5717 ± 1km	12,1420 ± 1km	6,0 ± 48km	Esterno ai domini
2023-08-03_08:55:22	earthquake	2,35(ML) ± 0.8	2,08 ± 0.7	5	0,52	44,4247 ± 1km	12,4545 ± 1km	8,0 ± 2km	DE
2023-09-18_18:44:38	earthquake	2,25(ML) ± 0,68	2,53 ± 0,59	10	0,28	44,4103 ± 1km	12,3172 ± 1km	20,0 ± 1km	Esterno ai domini
2023-12-25_05:27:41	earthquake	0,28(ML) ± 0.51	-0,01 ± 0,59	4	1,29	44,3987	12,3780	8,0 (fissata)	Esterno ai domini
2023-12-25_12:03:12	earthquake	1,19(ML) ± 0.27	1,36 ± 0,26	13	0,87	44,3542 ± 3km	12,1968 ± 3km	13,0 ± 7km	Esterno ai domini
2023-12-28_05:27:52	earthquake	1,36(ML) ± 0,66	0,99 ± 0,37	9	0,40	44,4993 ± 1km	12,4907 ± 1km	5,0 ± 3km	DE
2024-03-23_00:04:14	earthquake	1,36(ML) ± 0,39	1,50 ± 0,37	10	0,29	44,4567 ± 1km	12,4335 ± 1km	15,0 ± 2km	Esterno ai domini
2024-04-29_12:17:35	earthquake	1,36(ML) ± 0.66	0,89 ± 0.31	6	0,03	44,5743 ± 0,6km	12,2993 ± 0,6km	4,6 ± 0,8km	DE
2024-04-29_19:58:31	earthquake	1,30(ML) ± 0.22	0,59 ± 0.44	8	0,31	44,5435 ± 1km	12,2693 ± 1km	3,0 ± 2km	DE
2024-11-28_14:10:22	controlled explosion	--	2,07	15	1,24	44,5425	12,4617	--	
2024-12-20_00:35:18	earthquake	2,28(MLbj) ± 0.02	2,35 ± 0.19	15	0,21	44,6045 ± 1km	12,2772 ± 1km	14,4 ± 1km	Esterno ai domini
2025-02-10_02:08:59	earthquake	1,44(MLbj) ± 0.01	1,33 ± 0.34	12	0,20	44,3987 ± 1km	12,3378 ± 1km	21,0 ± 1km	Esterno ai domini
2025-06-03_05:14:11	earthquake	2,2 (MLbj) ± 0.01	2,62 ± 0,36	16	0,31	44,4958 ± 1km	12,5162 ± 1km	19,0 ± 1km	Esterno ai domini
2025-08-23_14:19:38	earthquake	1,68(ML) ± 0.52	1,68 ± 0.43	10	0,40	44,4612 ± 1km	12,3605 ± 1km	10,0 ± 2km	DE
2025-09-26_23:56:49	earthquake	0,83(ML) ± 0,29	1,08 ± 0,36	8	0,43	44,5450 ± 3km	12,2693 ± 3km	10,0 ± 2km	DE

Tabella 5.3 Eventi sismici avvenuti nell'intero periodo di osservazione 1 Aprile 2023 -18 Aprile 2026

6 Misure di deformazione

In questo capitolo vengono mostrati i risultati delle elaborazioni dei dati di deformazione disponibili per l'area di monitoraggio, in termini di misure GNSS e misure InSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*) elaborati dalla SPM, e di misure di livellazione fornite dal Concessionario.

6.1 Elaborazione del dato GPS e serie temporali di spostamento

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 della costellazione GPS a doppia frequenza dei segnali satellitari) dalle stazioni ENI 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 di posizione giornaliere al sistema di riferimento globale IGS20 (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. Come già spiegato nel Capitolo 5, l'analisi dei dati è stata eseguita per tutte le stazioni GNSS gestite dal concessionario a partire dal 01/01/2018 fino a fine aprile 2026. Solo FIUN è stata analizzata a partire dal 01/01/2020 (Figura B.8) per minimizzare ulteriormente l'andamento non lineare.

Le serie temporali riferite rispetto 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.

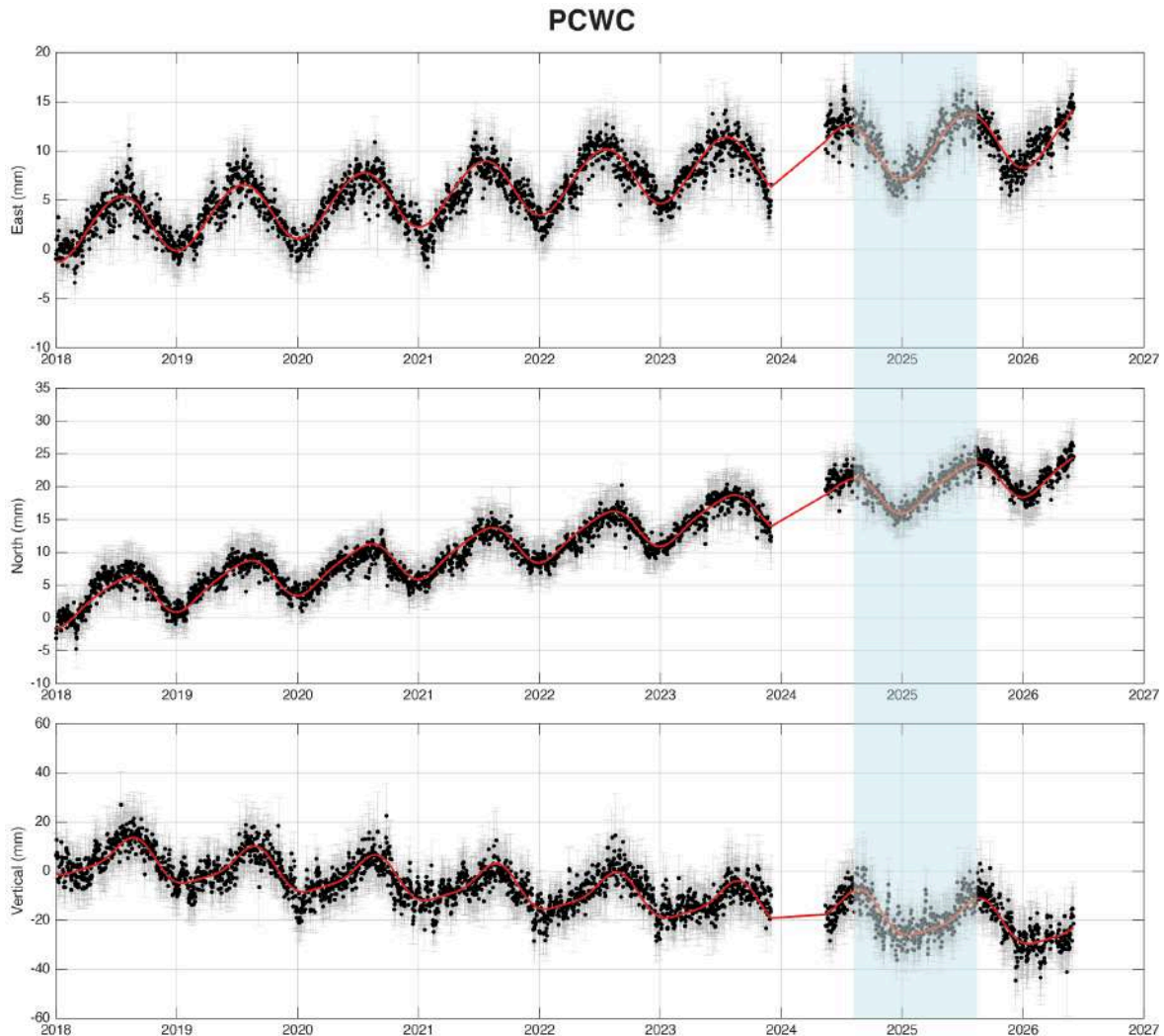


Figura 6.1. Serie temporale di spostamento (epoche, punti neri) della stazione PCWC nel sistema di riferimento Eurasia-fisso per le componenti Est e Nord e in IGS20 per la componente verticale. Le linee grigie indicano le barre d'errore (1σ) per gli spostamenti e la linea rossa rappresenta il modello analitico atteso. Il riquadro azzurro indica il periodo di attività di iniezione della CO₂.

La Figura 6.1 mostra le serie temporali di spostamento nelle tre componenti così ottenute per la stazione PCWC che si trova esattamente sopra il giacimento, mentre tutte le altre serie temporali sono riportate in Appendice B. Nelle immagini sono mostrati gli spostamenti giornalieri (punti neri) per le componenti Est e Nord nel sistema di riferimento Eurasia fisso e per la componente verticale nel sistema di riferimento globale. Ogni epoca ha associata un'incertezza corrispondente ad una deviazione standard (1σ) e viene riportato anche il modello funzionale atteso sopra descritto (linea rossa). Nella Figura 6.1 viene evidenziato

anche il periodo delle operazioni di iniezione nel campo, senza osservare nessuna particolare anomalia nelle serie temporali di spostamento.

6.2 Campo di velocità GPS

Dall'analisi delle serie temporali di spostamento di tutte le stazioni nell'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 attraverso il fronte esterno dell'appennino settentrionale sepolto al di sotto della pianura padana (Argnani 1998; Vannoli et al., 2004) con tassi di accorciamento orizzontali di circa 1-2 mm/anno (Pezzo et al., 2020). Pertanto un campo di velocità fornito da stazioni stabili e affidabili dovrebbe mostrare un andamento comune e coerente tra le stazioni adiacenti, mostrando gradualmente la compressione in atto in direzione circa Nord-Sud lungo il fronte pede-appenninico. Per quanto riguarda le velocità verticali, l'area è invece interessata da una diffusa subsidenza dovuta a diversi fenomeni naturali (es. compattazione dei sedimenti, flessione litosferica, emungimento di acque) dell'ordine di circa 3-4 mm/anno (Teatini et al., 2006).

Il risultato di questa analisi è mostrato in Figura 6.2 per le componenti orizzontali, mettendo a confronto le stime di velocità eseguite utilizzando la serie temporale ridotta, rispetto le velocità ottenute considerando l'intera serie temporale (vettori grigi). Nella figura vengono anche mostrate le velocità stimate per le stazioni di nuova installazione (vettori rossi) che hanno appena 23 anni di dati, intervallo di acquisizione leggermente inferiore rispetto al valore minimo di riferimento (2.5 anni, Blewitt and Lavallée, 2002), con lo scopo di avere una prima valutazione della stima dei tassi di spostamento a lungo termine per queste stazioni. Le stazioni aggiuntive considerate appartengono a reti sia pubbliche che private e alcune di esse non sono più attive, ma le cui misure sono utili per vincolare il campo di deformazione a scala regionale. La Figura 6.3 mostra lo stesso tipo di analisi per le componenti verticali delle stazioni GNSS. In Tabella 6.1 sono riportati i valori di velocità stimati per le stazioni GNSS della rete di monitoraggio ENI.

Dai risultati in Figura 6.2 si osserva come buona parte delle stazioni di monitoraggio della rete ENI mostrino un andamento abbastanza coerente in termini di intensità e direzione rispetto al campo di convergenza atteso in direzione Nord Nord Est - Sud Sud Ovest, soprattutto per le velocità stimate su un intervallo di anni ridotto, evidenziando un miglior allineamento dei trend rispetto la convergenza attesa. Questo miglioramento è molto evidente soprattutto per la stazione FIUN su tutte e tre le componenti, e per la stazione ANGA nella componente verticale (Figura 6.3). Anche le stazioni di recente installazione (AGOC, CABO, DICS e PCWT) mostrano i termini di velocità lineare che sembrano in ottimo accordo con le stime ottenute per le stazioni adiacenti.

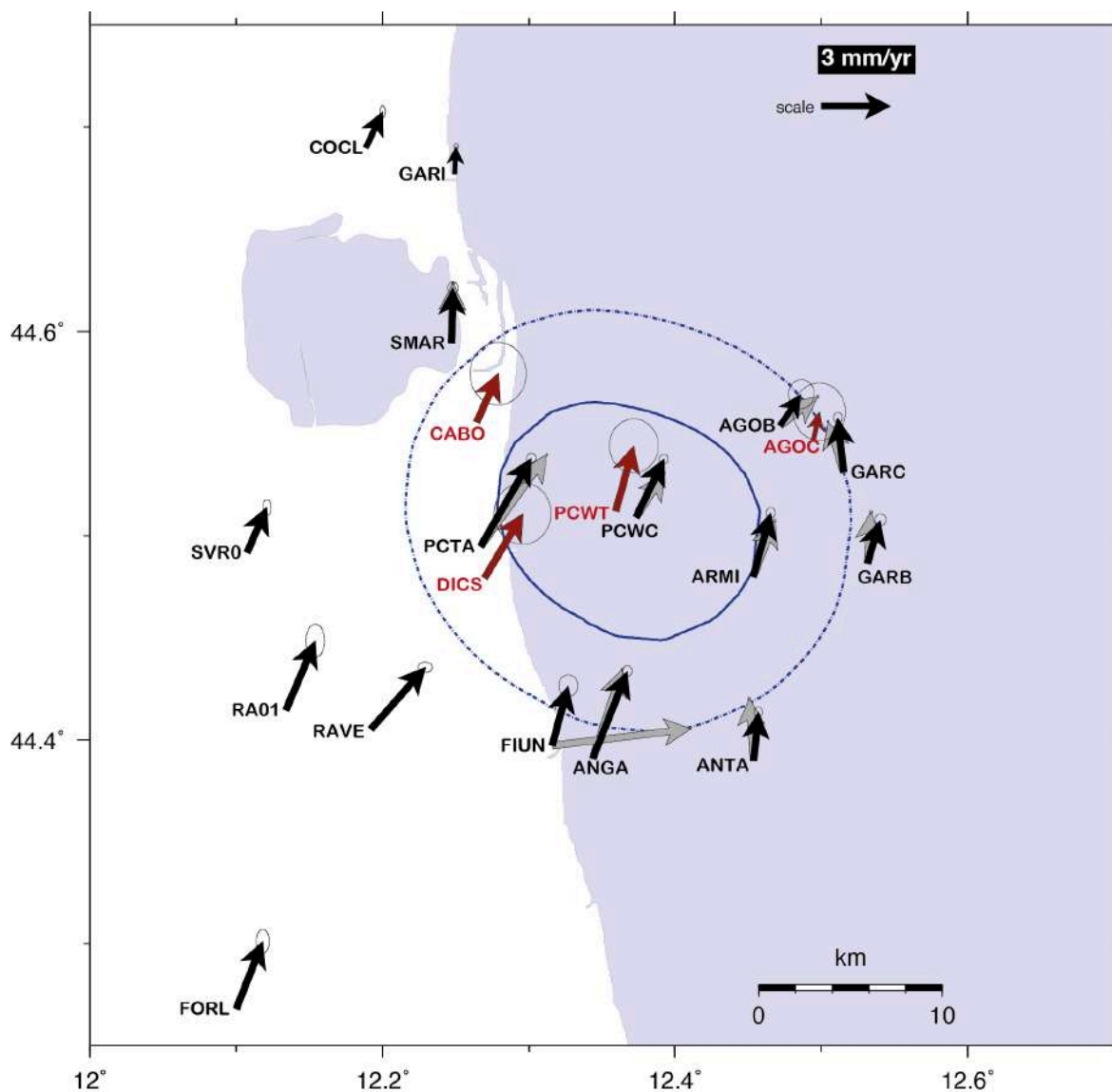


Figura 6.2. Campo di velocità di spostamento ottenuto dall'analisi dei dati GPS per le componenti orizzontali (freccie nere) nel sistema di riferimento locale Eurasia-fissa con ellissi di errore al 95%; le freccie rosse indicano le stazioni nuove con poco meno di 2.5 anni di dati, mentre le velocità grigie indicano le stime ottenute utilizzando le serie temporali complete. I domini di monitoraggio sono indicati in blu.

Il campo di velocità di spostamento per la componente verticale (Figura 6.3) mostra un tasso di abbassamento del suolo di circa 4-5 mm/anno, comune per la maggior parte delle stazioni analizzate e con intensità in riduzione per le stazioni analizzate nell'intervallo temporale più recente. La subsidenza osservata mostra valori in linea con i processi naturali in atto, come compattazione dei sedimenti, flessione litosferica, emungimento di acque.

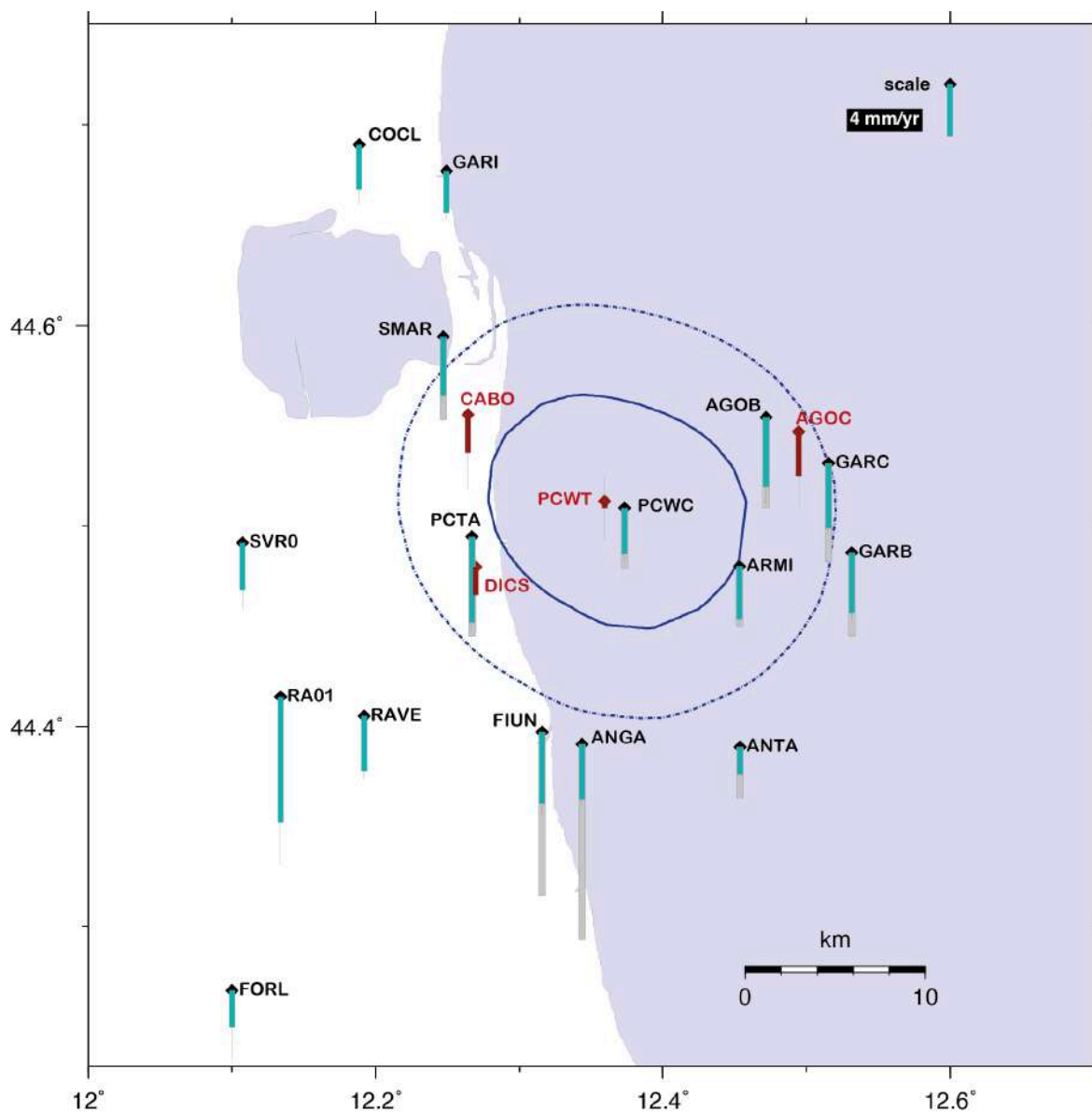


Figura 6.3. Campo di velocità di spostamento ottenuto dall'analisi dei dati GPS per le componenti verticali (barre azzurre) nel sistema di riferimento globale IGS20 con barre di errore al 95%; le barre rosse indicano le velocità verticali delle stazioni nuove con poco meno di 2.5 anni di dati, mentre le barre grigie indicano le stime ottenute utilizzando le serie temporali verticali complete. I domini di monitoraggio sono indicati in blu. Come si evince dalla Tabella 6.1, si tratta di velocità negative che descrivono la subsidenza in atto dell'area di studio.

Stazione	VE (mm/anno)	VN (mm/anno)	VU (mm/anno)	S_VE (mm/anno)	S_VN (mm/anno)	S_VU (mm/anno)
AGOB	0,91	1,35	-5,34	0,23	0,25	0,83
AGOC	0,26	1,22	-3,44	0,46	0,51	1,65
ANGA	1,50	3,76	-4,24	0,08	0,09	0,31
ANTA	0,21	2,10	-2,14	0,07	0,08	0,28
ARMi	0,76	2,75	-4,05	0,08	0,09	0,30
CABO	0,93	2,09	-2,93	0,49	0,55	1,89
DICS	1,65	2,77	-2,15	0,50	0,54	1,89
FIUN	0,70	2,57	-5,52	0,17	0,19	0,63
GARB	0,56	1,86	-4,65	0,09	0,11	0,36
GARC	-0,25	2,34	-5,01	0,08	0,09	0,28
PCTA	2,18	3,80	-6,59	0,08	0,09	0,31
PCWC	1,20	2,50	-3,53	0,08	0,09	0,29
PCWT	0,77	2,80	-0,52	0,43	0,47	1,58
SMAR	0,06	2,38	-4,51	0,10	0,10	0,39

Tabella 6.1: Velocità di spostamento delle componenti Est (VE), Nord (VN), e verticale (VU) e relative incertezze (S_VE, S_VN e S_VU) in mm/anno delle stazioni GNSS della rete locale nel sistema di riferimento Eurasia-fisso per le componenti orizzontali e in IGS20 per quelle verticali.

6.3 Misure di deformazione tramite 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 6.2.

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

Tabella 6.2. Copertura temporale dei dataset SAR ascendente e discendente.

I risultati mostrano valori di velocità media di spostamento del suolo su larga scala generalmente compresi entro ± 1.5 mm/anno, con valori di picco fino a -10 mm/anno spazialmente localizzati. L'area del DE mostra anche essa valori prevalentemente entro ± 1.5 mm/anno con alcuni allontanamenti del suolo lungo la linea di vista (LOS) del sensore mediamente entro i 3-5 mm/anno. Solo localmente si osservano allontanamenti più marcati, con valori entro i -10/mm all'anno, con rari punti che superano tale valore solo nell'area lagunare compresa tra Ravenna e Marina di Ravenna (Figura 6.9). In generale, le aree caratterizzate da valori di spostamenti negativi del suolo più marcati sono spazialmente poco estesi. Le misure confermano quanto già evidenziato nella prima relazione semestrale. .

Le velocità di spostamento nelle componenti verticali e orizzontali (E-O) (Figura 6.10), evidenziano valori in linea con quanto osservato nelle mappe in LoS. L'area del DE mostra valori di spostamento verticali stabili entro i -1.5 - 1.5 mm/anno, con alcune subsidenze del suolo generalmente entro i 5 mm/anno, che solo localmente si attestano su tassi di circa -10/mm all'anno, principalmente nell'area lagunare compresa tra Ravenna e Marina di Ravenna. Gli spostamenti lungo la componente E-O sono compresi tra i -1.5 e 1.5 mm/anno e non mostrano andamenti rilevanti.

Nelle Figure 6.11 e 6.12 si mostrano due esempi di serie storiche InSAR rispettivamente in geometria ascendente e discendente relativa all'area costiera più prossima all'area di studio, presso Marina Romea.

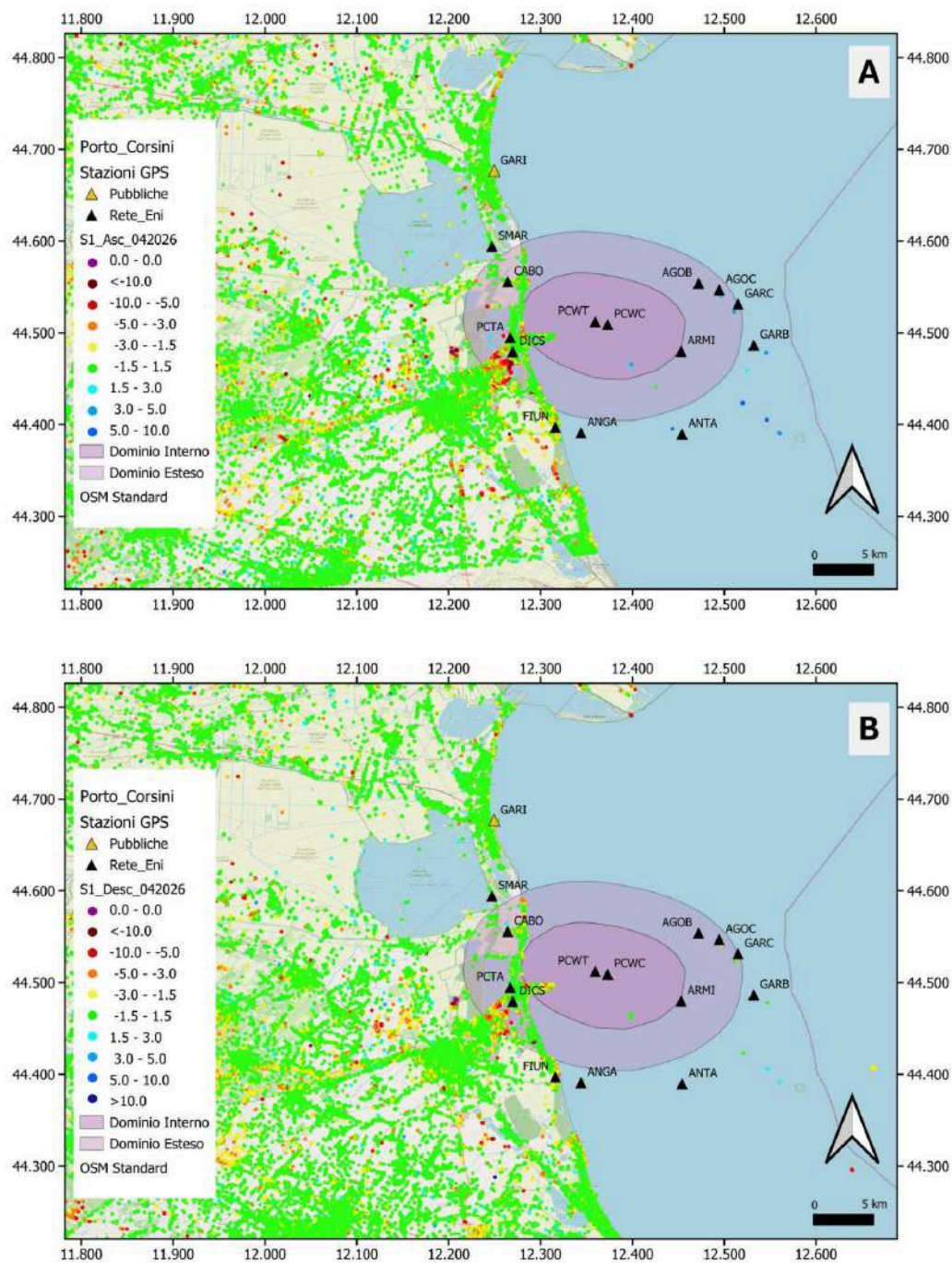


Figura 6.9 Mappa della velocità media (mm/anno) di spostamento del suolo lungo la linea di vista del satellite in orbita ascendente (A) e discendente (B), calcolata dai dati SAR acquisiti dai satelliti della costellazione Sentinel-1. Valori negativi indicano allontanamento dal satellite, viceversa per valori positivi. Nelle mappe sono riportati anche i domini di rilevazione interno ed esteso (DI e DE) per il campo PCMW CCS e la posizione delle stazioni geodetiche GNSS pubbliche (triangoli gialli) e quelle installate da Eni presenti nell'area (triangoli neri).

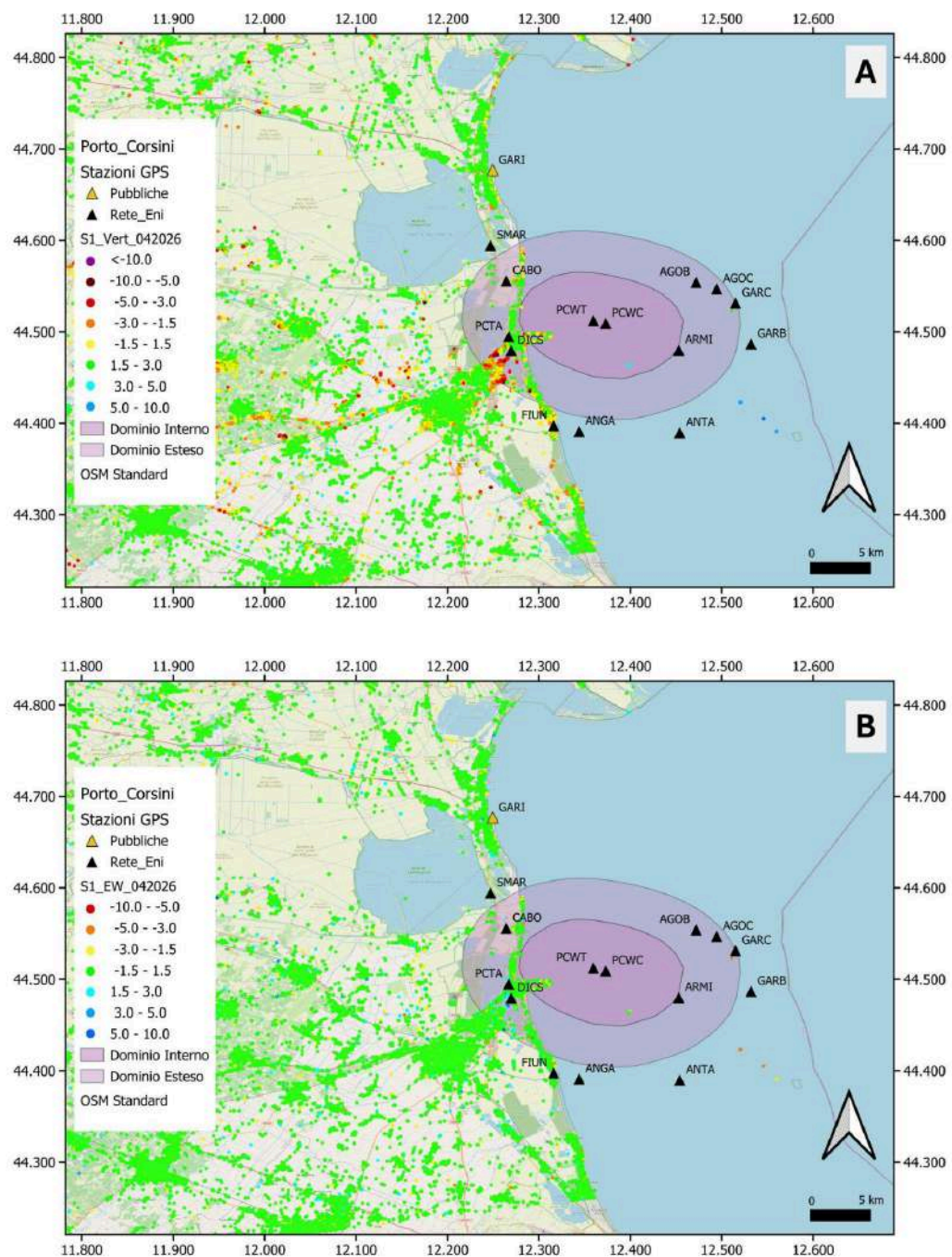


Figura 6.10 Mappa della velocità media (mm/anno) di spostamento del suolo lungo la componente verticale (A) ed est-ovest (B), calcolata dai dati SAR acquisiti dai satelliti della costellazione Sentinel-1. Nel Pannello A, i valori negativi indicano subsidenza, mentre quelli positivi indicano sollevamento del suolo; nel pannello B, valori positivi indicano spostamenti verso est, mentre valori negativi indicano spostamenti verso ovest. Nella mappe sono riportati anche i domini di rilevazione interno ed esteso (DI e DE) per il campo PCMW CCS e la posizione delle stazioni geodetiche GNSS pubbliche (triangoli gialli) e quelle installate da Eni presenti nell'area (triangoli neri).

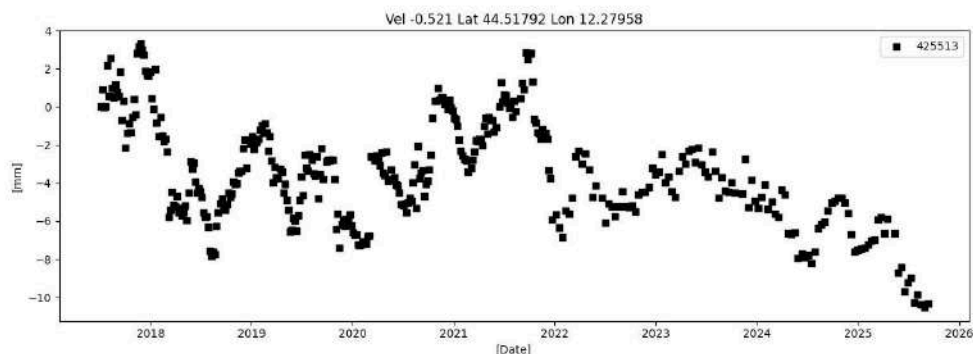


Figura 6.11 Serie storica di deformazione del suolo in geometria ascendente relativo ad un punto sull'area costiera in prossimità di Marina Romea.

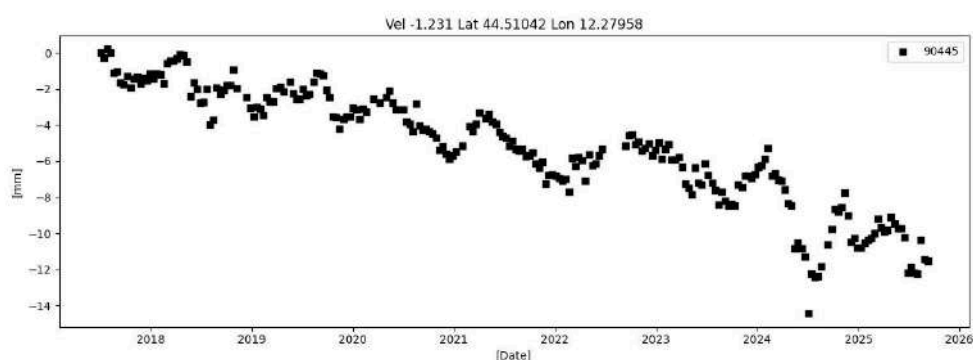


Figura 6.12 Serie storica di deformazione del suolo in geometria discendente relativo ad un punto sull'area costiera in prossimità di Marina Romea.

6.4 Livellazione ad alta precisione

I dati di livellazione trasmessi dal Concessionario sono stati acquisiti lungo un tracciato complessivo di circa 272 km, esteso lungo la costa adriatica tra le Valli di Comacchio e Cervia, nel periodo compreso tra il 21 settembre e il 23 novembre 2023. Durante le fasi di acquisizione ed elaborazione sono state eseguite, a cura del DICAM, numerose procedure di controllo della qualità delle misure; sono inoltre state adottate metodologie specifiche per l'attraversamento di aree non accessibili, assegnato un datum altimetrico alla rete ed effettuata la compensazione ai minimi quadrati delle osservazioni (cfr. Relazione conclusiva DICAM, 2024). I valori di chiusura delle poligoni rientrano nei limiti di tolleranza previsti, mentre la compensazione, nella quale sono stati inclusi quattro capisaldi co-localizzati con stazioni GNSS, ha superato i test di coerenza statistica. La rete presenta un adeguato grado di ridondanza e una precisione complessiva dell'ordine di pochi millimetri. La Figura 6.13 mostra la distribuzione dei capisaldi della rete di monitoraggio con: a) i dislivelli misurati lungo i poligoni di livellazione; b) le quote compensate dei capisaldi; c) la deviazione standard associata alle quote compensate. La Figura 6.14 riporta, per i capisaldi selezionati lungo il settore costiero, sia all'interno che all'esterno del dominio esteso di monitoraggio (DE), il profilo delle quote e la relativa deviazione standard.

La campagna costituisce il rilievo di riferimento della rete di livellazione. I dati disponibili consentono di descrivere la geometria della rete e di verificarne la qualità, ma non permettono di valutare fenomeni deformativi quali subsidenza o sollevamento, la cui stima richiede il confronto tra almeno due campagne di misura.

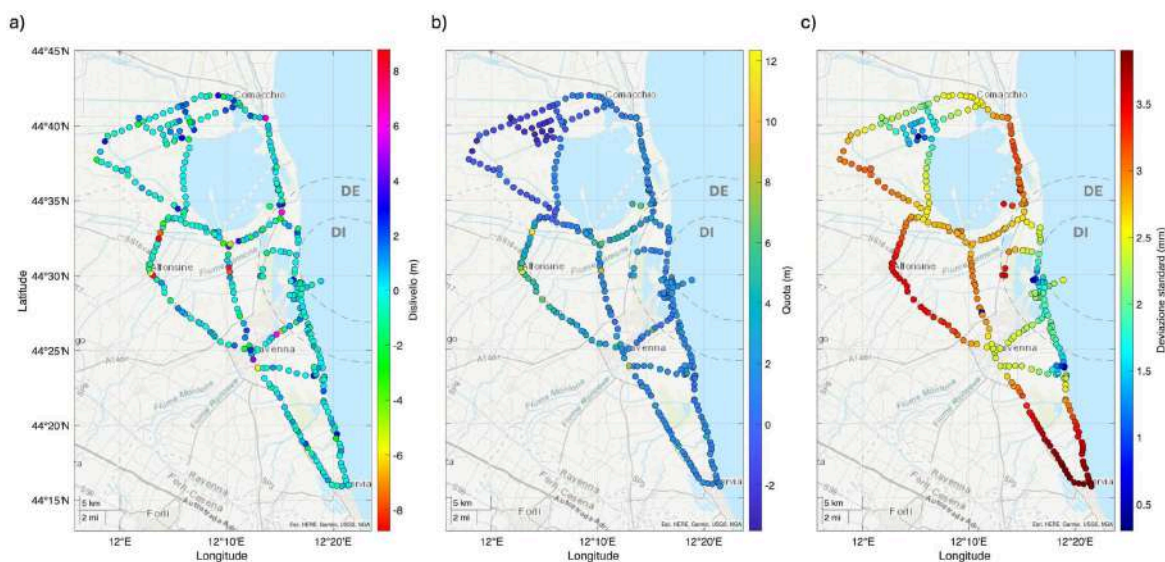


Figura 6.13 Caisaldi della rete di monitoraggio con: a) i dislivelli misurati lungo i poligoni di livellazione; b) le quote compensate; c) la deviazione standard associata alle quote compensate. Gli acronimi DE e DI indicano rispettivamente il Dominio Esteso e Interno di monitoraggio.

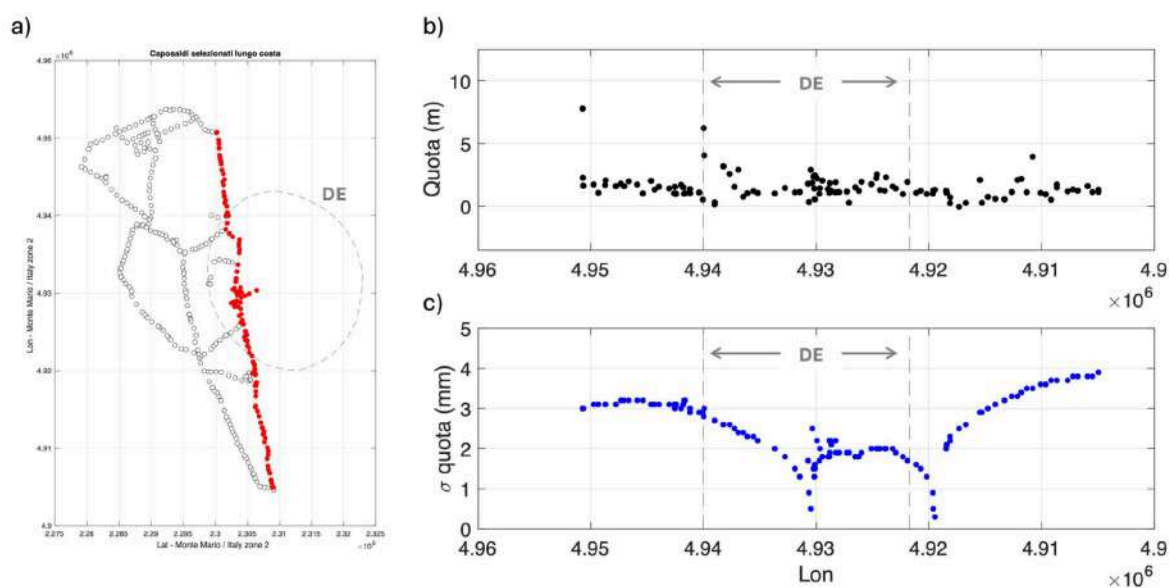


Figura 6.14 Profilo delle quote compensate relativo a caposaldi posizionati lungo costa: a) mappa che mostra in rosso i capisaldi selezionati; b) quote compensate dei capisaldi selezionati; c) deviazione standard associata alle quote compensate. L'acronimo DE indica il Dominio Esteso di monitoraggio.

7 Monitoraggio DAS

In questa sezione presentiamo la prosecuzione delle analisi sulle registrazioni di deformazione dinamica acquisite dal sistema DAS posizionato a bordo della piattaforma Porto Corsini Mare Ovest. In particolare, lo studio è focalizzato sull'individuazione di segnali transienti, e la loro successiva classificazione. Viene presentato anche un esempio applicativo di localizzazione, impiegando un metodo probabilistico non-lineare che permette la definizione esaustiva delle incertezze sulla stima dei parametri ipocentrali.

7.1 Geometria e parametri di acquisizione

Durante il primo mese di acquisizione (24.5.2024 - 27.6.2024), il monitoraggio prevedeva l'acquisizione di un segmento di fibra di circa 1,5 km con un campionamento spaziale di 1 m, limitatamente alla porzione terminale cementata del pozzo di iniezione. Successivamente, l'acquisizione è stata estesa all'intera lunghezza della fibra, raddoppiando l'estensione del segmento iniziale. Per ottimizzare lo spazio di archiviazione dei dati, la spaziatura inter-canale è stata raddoppiata (passando da ~1 m a ~2 m), mantenendo però invariato il numero complessivo di canali. Questa seconda configurazione copre l'intervallo di profondità compreso tra la superficie e ~3300 m. Dopo il 27 giugno 2024, la geometria e i parametri di acquisizione del sistema DAS sono rimasti invariati, e corrispondono a quelli già dettagliati nel Rapporto n. 1, che vengono qui riproposti per facilità di consultazione (ffgg. 7.1 e 7.2, Tab. 7.1, 7.2).

Tabella 7.1 - Parametri di acquisizione per l'intervallo 24.5.2024-27.6.2024

Gauge length (m)	15
Number of channels	1527
Laser Pulse Rate (Hz)	10000.0
Laser Pulse Width (ns)	80.0
Channel spacing (m)	1.02
Refractive Index	1.468000
DataType	Raw
Output Data Rate (Hz)	500.00
RawDataUnit Differential phase, scaled by 10430	$(2^{15} - 1) / \pi$

Tabella 7.2 - Parametri di acquisizione successivamente al 27.6.2024

Gauge length (m)	15
Number of channels	1627
Laser Pulse Rate (Hz)	10000.0
Laser Pulse Width (ns)	80.0
Channel spacing (m)	2.042183
Refractive Index	1.468000
DataType	Raw
Output Data Rate (Hz)	500.00
RawDataUnit Differential phase, scaled by 10430	$(2^{15} - 1) / \pi$

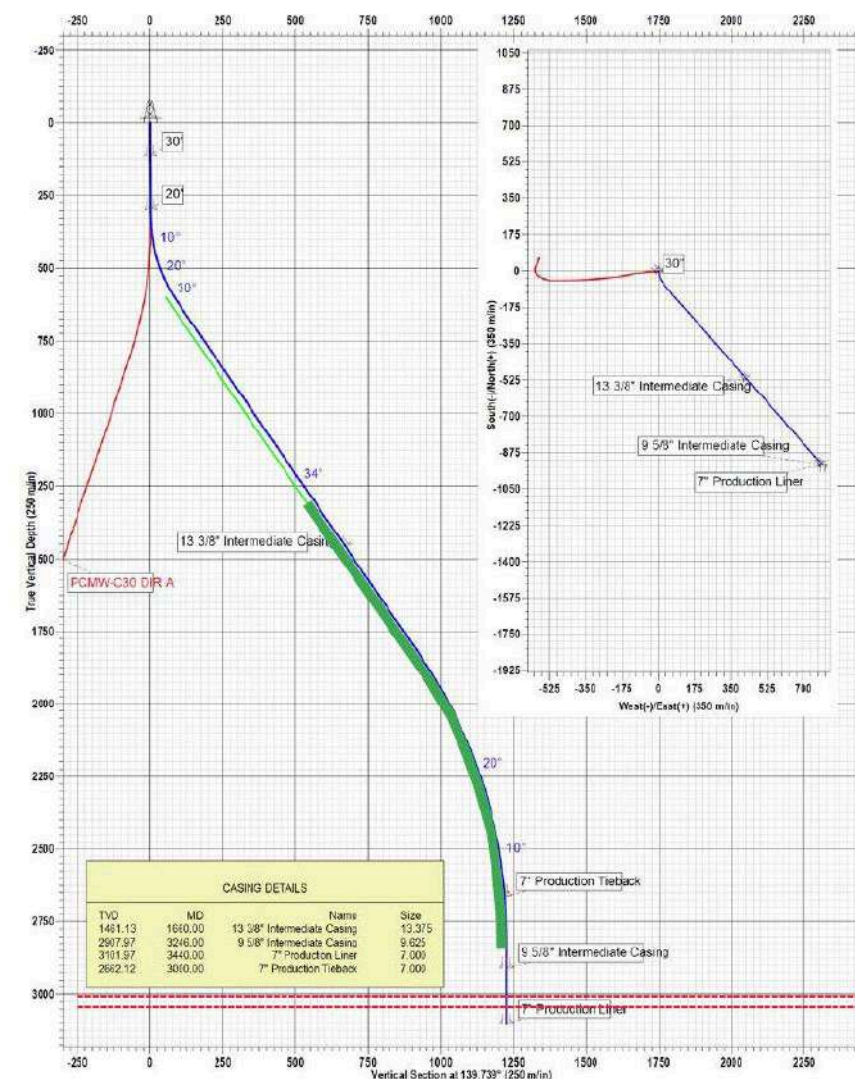


Figura 7.1: Rappresentazione schematica della geometria di acquisizione. Tratto verde chiaro (da testa pozzo a 1329 m TVD [True Vertical Depth]) : casing non cementato. Tratto verde scuro (intervallo utile ca. 1329-2842 m TVD): casing cementato. Il livello di iniezione è compreso nell'intervallo 3003-3036 m TVD. Immagine gentilmente fornita dal Concessionario.

7.2 Disponibilità e trasmissione dati

Le modalità di trasmissione dati sono quelle già descritte nel [Rapporto n.1](#). La figura 7.2 illustra la disponibilità delle registrazioni presso il Centro Dati del concessionario, aggiornata al 18 aprile 2026.

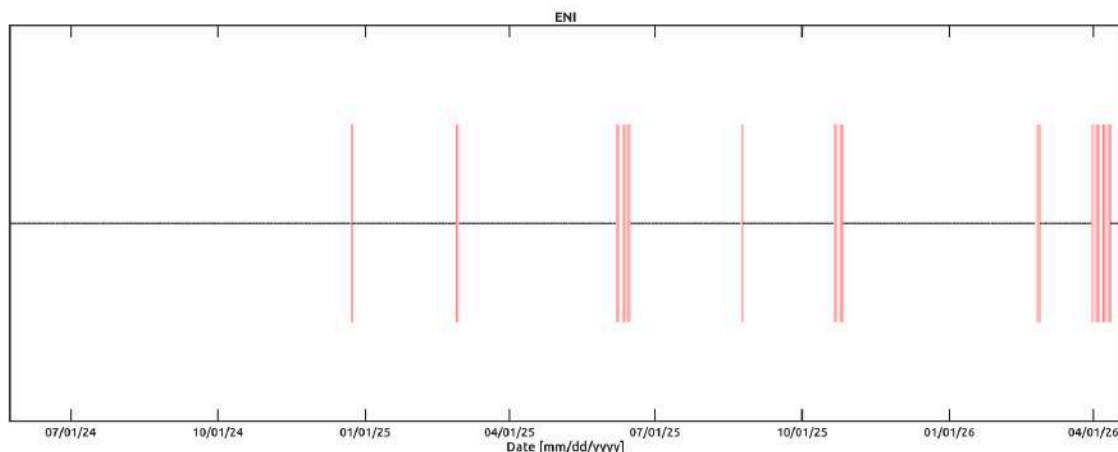


Figura 7.2 Disponibilità delle registrazioni DAS al centro dati dell'operatore, aggiornata al 18 aprile 2026. Le linee rosse indicano gli intervalli mancanti. Nell'insieme, la disponibilità dei dati è di poco superiore al 95%.

La continuità delle registrazioni DAS nel periodo analizzato continua a mostrare un buon livello complessivo, attestandosi intorno al 95%. Tuttavia, si osserva una leggera flessione rispetto all'intervallo preso in esame nel report precedente. I periodi di interruzione, evidenziati graficamente dalle linee rosse nella Figura 7.2, potrebbero non essere definitivi: data la natura asincrona del sistema di trasferimento dati, rimane possibile che i segmenti mancanti vengano recuperati e integrati negli archivi in una fase successiva.

7.3 Derive di temporizzazione

Come già evidenziato nel precedente Report di monitoraggio, il sistema DAS ha presentato per periodi prolungati criticità legate alla mancanza di una sincronizzazione precisa con il tempo universale coordinato (UTC). Tale disallineamento temporale rappresenta un fattore critico per l'integrazione dei dati DAS con i cataloghi sismici standard. Per procedere a una quantificazione rigorosa di questa discrepanza, la SPM ha analizzato un set di eventi sismici rappresentativi registrati tra giugno 2024 e giugno 2025.

La metodologia adottata ha previsto il calcolo del tempo di arrivo teorico delle onde P presso la fibra DAS, basandosi sulle coordinate ipocentrali fornite dai cataloghi di riferimento. In questa analisi si è assunta una propagazione ideale in un mezzo omogeneo ed isotropo, stimando i tempi di tragitto come rapporto tra la distanza ipocentrale (rispetto al baricentro della fibra) e una velocità costante delle onde P fissata a 5500 m/s (v. tabella C.1 in Appendice C). Il risultato di questa procedura è illustrato nella Figura 7.3. A partire dalla seconda metà di luglio 2024, il tempo DAS risulta essere progressivamente anticipato rispetto al tempo universale, con una deriva di circa 2 secondi al giorno. Il problema è stato parzialmente risolto con l'inizio del 2025, anche se l'esame di un sisma registrato nel giugno 2025 sia dalla DAS che dai sismometri della rete P1 continua a mostrare un anticipo del tempo DAS di alcuni secondi (Figura 7.4).

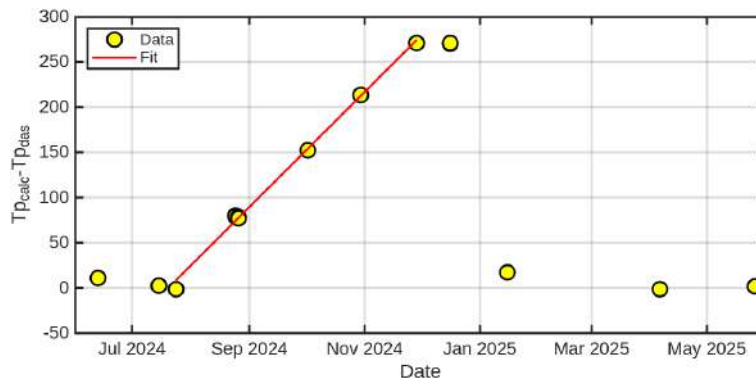


Figura 7.3 Discrepanza fra il tempo UTC e quello del sistema DAS. La determinazione è stata effettuata stimando la differenza fra i tempi di arrivo delle onde P misurati e quelli predetti sulla base delle localizzazioni del catalogo INGV, per alcuni eventi sismici rappresentativi occorsi tra ottobre e dicembre 2024. La linea rossa è il fit lineare ai dati compresi fra la fine di luglio 2024 e fine dicembre 2024. Dalla pendenza della retta si ricava una deriva di circa 2 secondi / giorno.

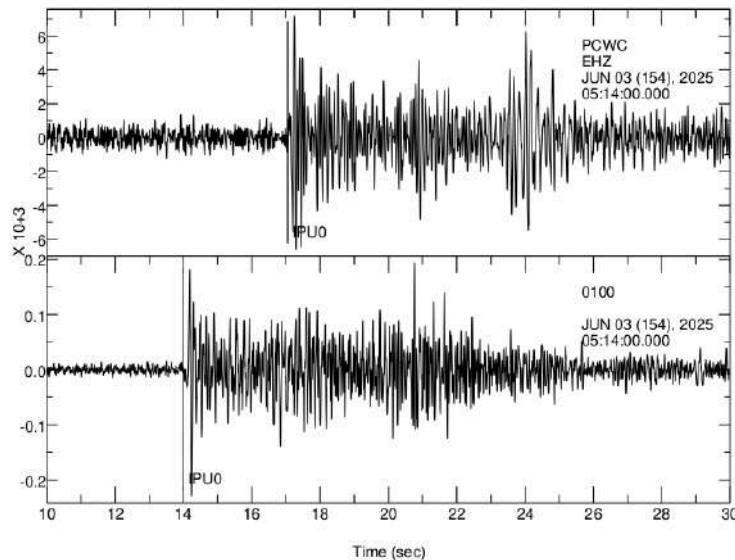


Figura 7.4 Sismogrammi alla componente verticale della stazione sismica PCWC (in alto) ed al canale 100 del sistema DAS (in basso) per l'evento con tempo origine 2025-06-03T05:14:11. Considerando il modello di velocità della zona (v. Tabella 6.1), la differenza nei tempi di arrivo dell'onda P dovrebbe essere nell'ordine di un decimo di secondo, corrispondente alla differenza di profondità dei due punti di misura (~200 m) diviso la velocità di propagazione (~1800 m/s). In realtà, osserviamo una differenza nell'ordine di 3s, verosimilmente attribuibile ad una deriva del sistema di sincronizzazione temporale dell'interrogatore DAS.

7.4 Caratteristiche generali dei segnali

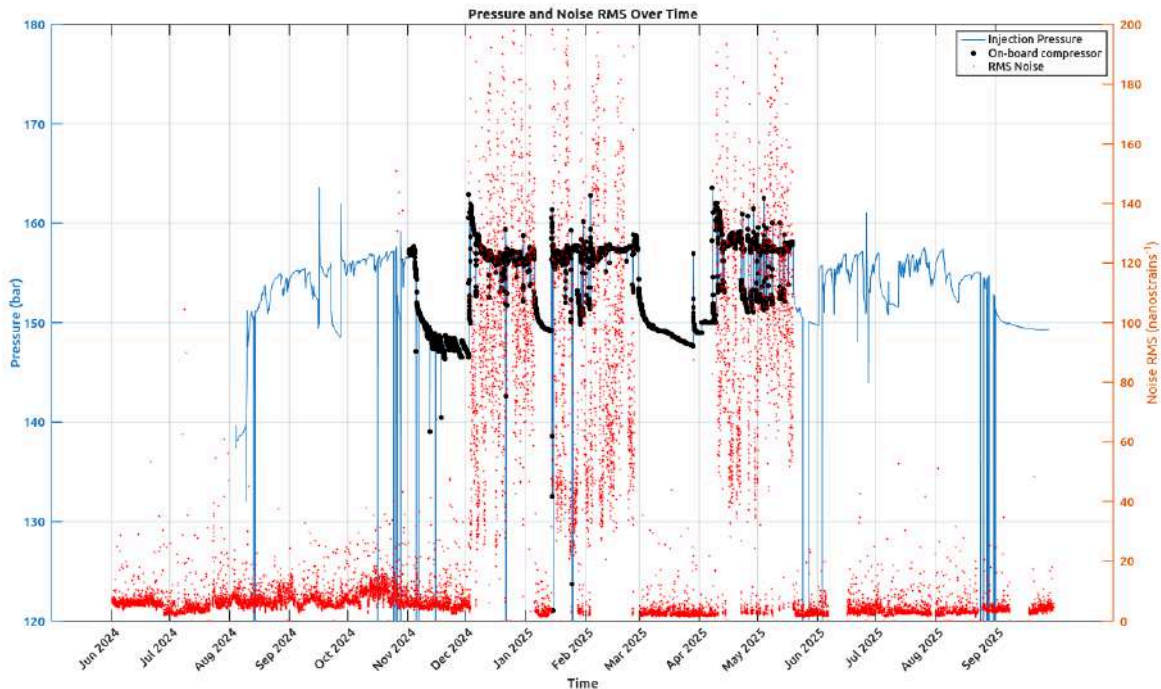


Figura 7.5 Evoluzione temporale dell'ampiezza del segnale di deformazione dinamica calcolata su intervalli consecutivi di mezz'ora per la banda 0.1-50 Hertz. I dati si riferiscono alla media fra i canali 1000 - 1004. Per confronto sono anche mostrati i dati delle pressioni di fondo pozzo, con indicazione dei periodi in cui il compressore era posizionato a bordo piattaforma.

Una prima immagine sull'evoluzione temporale del segnale di deformazione dinamica è stata ottenuta calcolando l'ampiezza media delle registrazioni ai canali 1000-1004, nella banda di frequenza $[0.1, 50]$ Hz (Figura 7.5). Da dicembre 2024 si nota un netto aumento del rumore, la cui evoluzione temporale è ben correlata con i cicli di iniezione. Come successivamente confermato dal concessionario, l'insorgenza di tale disturbo è attribuibile all'installazione e funzionamento di un compressore direttamente sulla piattaforma PCW-C, in prossimità del pozzo iniettore. Questo macchinario induce una vibrazione sull'interrogatore DAS, con la comparsa di un forte rumore di modo comune. In altre parole, lo spostamento dell'interrogatore viene misurato come una deformazione che interessa contemporaneamente tutti i canali della fibra ottica. Questa sorgente di rumore compromette seriamente la capacità di rilevare gli eventi sismici, e deve quindi essere tenuta in debito conto nella pianificazione di ogni misura futura.

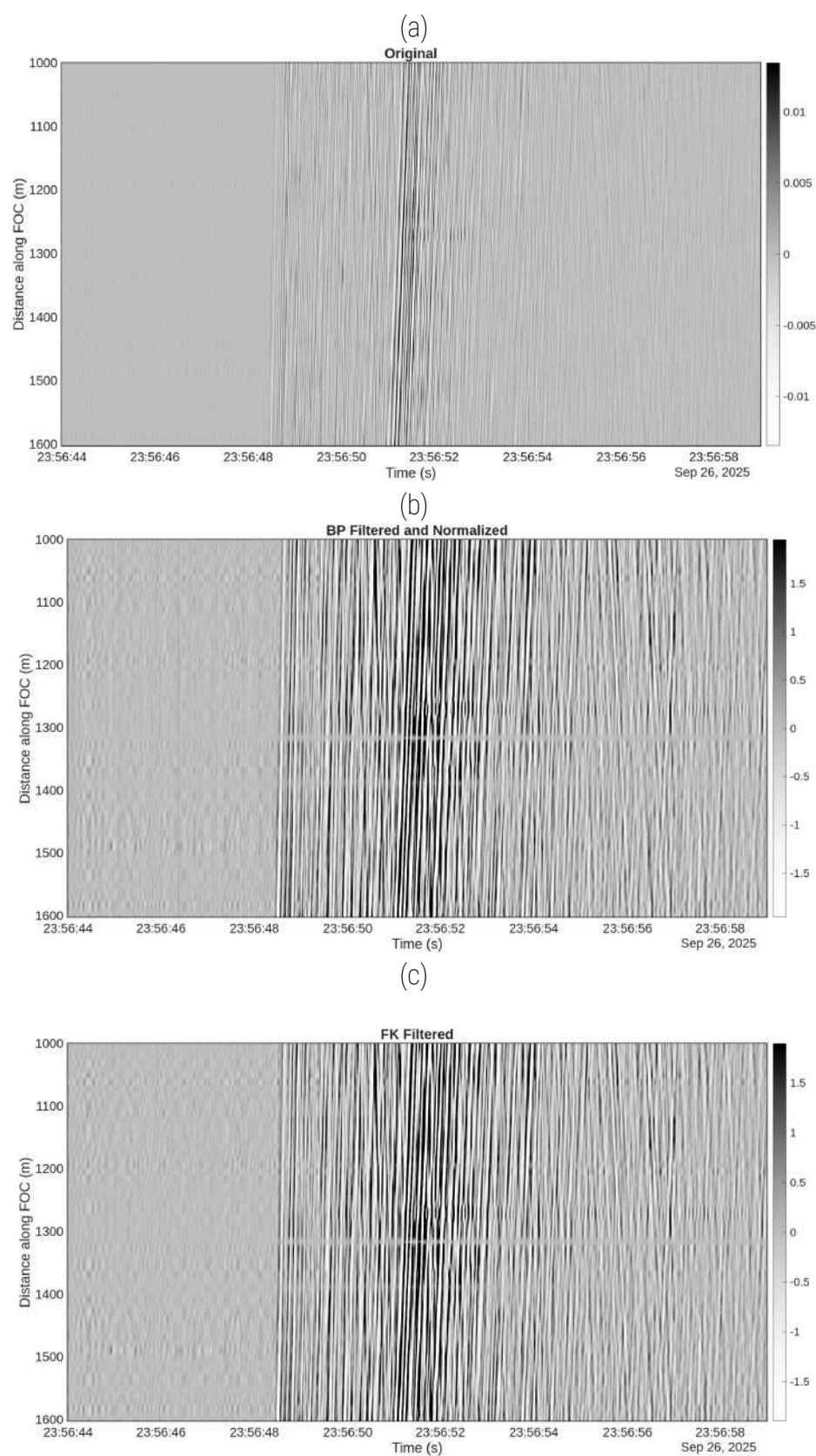
7.5 Rilevazione automatica di segnali transienti

In questa sezione viene descritta la metodologia per la discriminazione automatica di eventi transienti, e la successiva applicazione alle registrazioni del sistema DAS.

La procedura è stata implementata mediante i seguenti passi:

1. **Sottocampionamento spazio-temporale.** Questa prima parte consiste nella selezione dei canali compresi tra 1000 e 1300 e nello stacking delle forme d'onda a gruppi consecutivi di cinque canali. Il numero di canali utili diventa quindi uguale a 60. Questi segnali sono stati poi filtrati con un filtro passa-basso a 40 Hz, e ricampionati ad un passo di campionamento di 0.01 s (frequenza di campionamento 100 Hz). I segnali ricampionati sono infine salvati in archivi digitali in formato H5 di lunghezza 30 minuti.
2. **Precondizionamento.** In questa fase, i segnali sono soggetti a:
 - a. applicazione di un filtro passa banda nella banda [1,10]Hz (Fig. 7.6a,b);
 - b. normalizzazione di ciascun canale per rimuovere gli effetti dell'attenuazione e dello *spreading* geometrico;
 - c. applicazione di un filtro FK per eliminare il rumore di modo comune, ovvero quei segnali che compaiono con la medesima ampiezza e fase su tutti i canali, assimilabili quindi ad un'onda piana che si propaga a velocità apparente infinita (numero d'onda $k = 0$) (Fig. 7.6c).
 - d. calcolo, per ciascun canale, della funzione caratteristica Curtosi (Langet et al., 2014; v. App. D) (Fig. 7.6d).
 - e. Applicazione dell'algoritmo di rilevazione basato sulla funzione Semblance (v. App. D). Il risultato è una mappa di Semblance in funzione del tempo e della lentezza apparente di propagazione. In tale mappa, i valori di picco corrispondono a segnali coerenti che si sono propagati lungo la fibra (Fig. 7.6e).
3. **Detezione.** Nelle mappe di Semblance, la condizione per il riconoscimento di un evento è associata al superamento di un valore di soglia uguale alla media calcolata sull'intervallo di 30 minuti, più n volte la deviazione standard. Il valore n solitamente è uguale a 4, ma occasionalmente è stato aumentato in caso di un numero eccessivo di discriminazioni (Fig. 7.6e).
4. **Clusterizzazione.** Per evitare la catalogazione di eventi duplicati, i tempi di detezione sono stati clusterizzati utilizzando l'algoritmo DBscan (Ester et al., 1996). I parametri per raggruppare gli elementi di un insieme in gruppi omogenei sono dati dalla distanza minima ϵ tra elementi e il numero minimo $N_{\min}$ di elementi per ogni cluster (v. Tabella A2.1).
5. **Ispezione manuale.** Infine, i segnali individuati ai punti precedenti sono stati ispezionati visivamente, per rimuovere i numerosi falsi positivi ed operare una prima classificazione basata sulla morfologia delle mappe di deformazione dinamica espressa in funzione del tempo e della distanza lungo la fibra.

Un esempio di queste procedure è illustrato nella Figura 7.6.



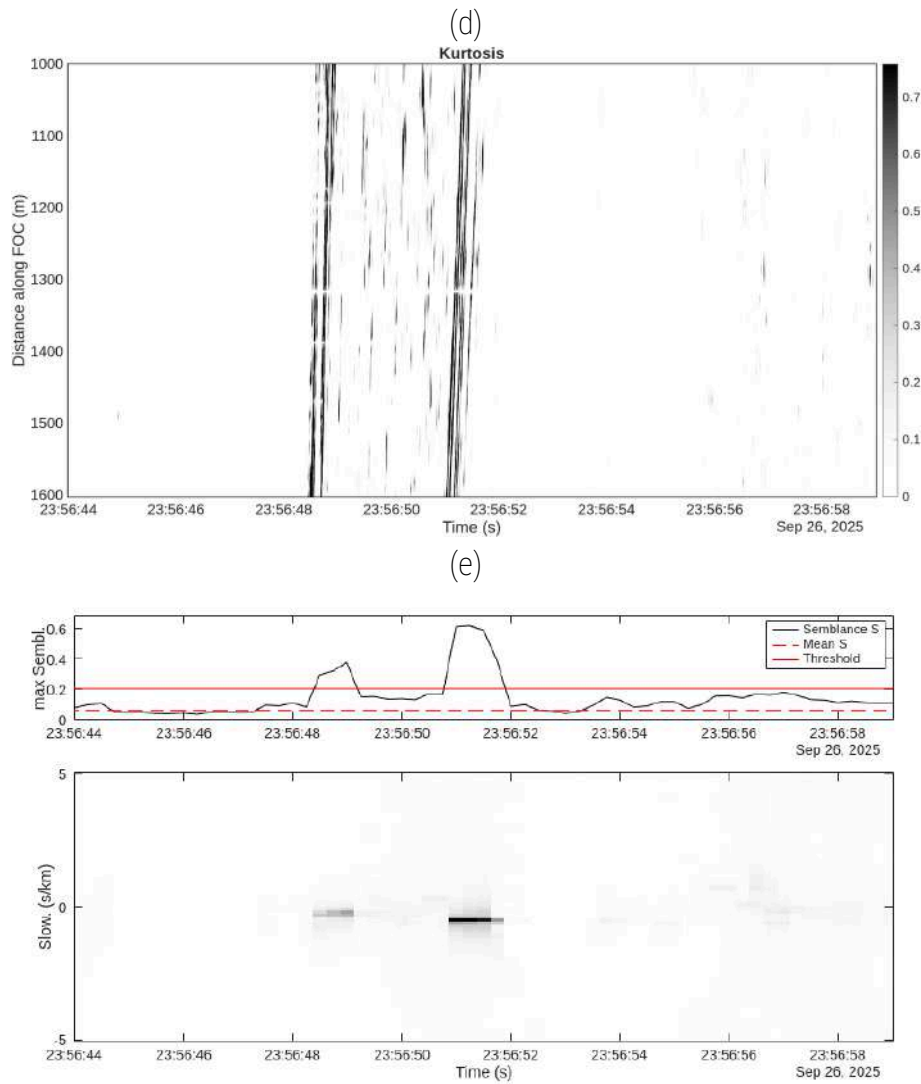


Figura 7.6. Illustrazione delle diverse fasi del pre-condizionamento dei segnali e successiva procedura di detezione. (a) Mappa della deformazione dinamica nel dominio spazio-tempo originale. (b) Dopo l'applicazione del filtro passa banda 1,10 Hz e successiva normalizzazione. (c) Dopo il filtraggio frequenza numero d'onda. (d) Funzione caratteristica Curtosi. (e) Mappa dei valori di Semblance in funzione del tempo e della lentezza. Le zone più scure indicano quegli intervalli temporali e valori di lentezza ai quali è stata riconosciuta la propagazione di un'onda piana coerente attraverso il cavo ottico. Nel pannello superiore è riportato l'andamento temporale dei valori massimi di Semblance per ciascuna finestra temporale. La linea tratteggiata corrisponde alla media di tali valori sull'intero intervallo di 30 minuti. La linea rossa continua individua il valore di soglia per l'individuazione di un evento (Semblance media + 4 volte la deviazione standard). I due picchi corrispondono agli arrivi delle onde P ed S, che vengono successivamente raggruppati in una singola detezione tramite la procedura di clustering.

7.6 Risultati del processo di detezone

La procedura di detezone è stata applicata al periodo 1° giugno - 30 novembre 2024, e successivamente al mese di marzo 2025. Il trimestre compreso tra dicembre 2024 e febbraio 2025 è stato invece escluso a causa degli elevati livelli di rumore riscontrati. Trattandosi di una metodologia sperimentale sviluppata ad hoc, ulteriori affinamenti nella calibrazione dei parametri (v. Tabella 2 in Appendice D) potranno ottimizzare ed arricchire i risultati qui presentati.

La revisione manuale degli eventi discriminati ha permesso una prima classificazione utile a fornire indicazioni circa i possibili meccanismi causativi. Oltre a rilevare la sismicità locale regionale, la procedura di discriminazione ha individuato un gran numero di eventi di natura ignota, grossolanamente classificabili in 2 categorie come meglio dettagliato nella prossima sezione.

7.6.1 Eventi di natura ignota

1. Eventi con origine in prossimità del cavo ottico, che si propagano con velocità compatibili con la propagazione di onde sismiche. La sorgente di questi eventi può essere sia superficiale che profonda, in corrispondenza delle porzioni terminali del cavo ottico. Le velocità di propagazione sono nell'ordine di [1500 - 3000] m/s e quindi compatibili con quelle di onde P o S, rispettivamente (ffgg. 7.7, 7.8 e 7.9). Quando questi eventi sono particolarmente energetici, generano riflessioni sia alla superficie libera che a fondo pozzo, rendendo visibili fronti d'onda che si intersecano viaggiando in direzione opposta (Fig. 7.8). Fra questi, è stato anche individuato un evento le cui caratteristiche spettrali ricordano gli eventi quasi-monocromatici tipicamente osservati in ambienti vulcanici / idrotermali, ed attribuiti all'interazione fluido-roccia (Fig. 7.11)
2. Eventi con origine sia superficiale che profonda, che si propagano con velocità eccezionalmente basse, nell'ordine dei 200 m/s. Spesso si manifestano con carattere sostenuto, ovvero di una vibrazione continua (Fig. 7.12, 7.13).

Si evidenzia come nessuno degli eventi sopra descritti presenti caratteristiche compatibili con attività sismica di origine naturale o antropica. In nessun caso, infatti, si osservano fronti d'onda distinti associabili alla propagazione di onde longitudinali (P) e di taglio (S). La formulazione di ipotesi circa i meccanismi causali di tali eventi esula quindi dagli scopi della SPM. Tuttavia, sarà comunque di interesse svolgere ulteriori approfondimenti, con il duplice obiettivo di [1] valutare se questi segnali racchiudano un contenuto informativo circa l'andamento delle operazioni di iniezione e, [2] una volta individuata la causa, definire strategie per mitigarne l'occorrenza. Trattandosi di segnali coerenti con accadimento sostenuto nel tempo, infatti, rappresentano un disturbo nelle procedure di detezone della microsismicità.

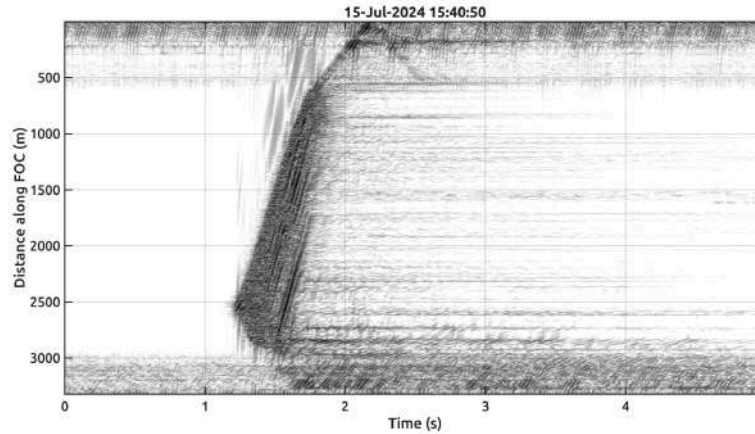


Figura 7.7 Registrazione DAS per un evento di origine ignota con sorgente in prossimità del pozzo di iniezione, circa 2600 m lungo il cavo ottico. Le velocità di propagazione sono nell'ordine di 3300m/s e 1650m/s per il fronte ascendente e discendente, rispettivamente.

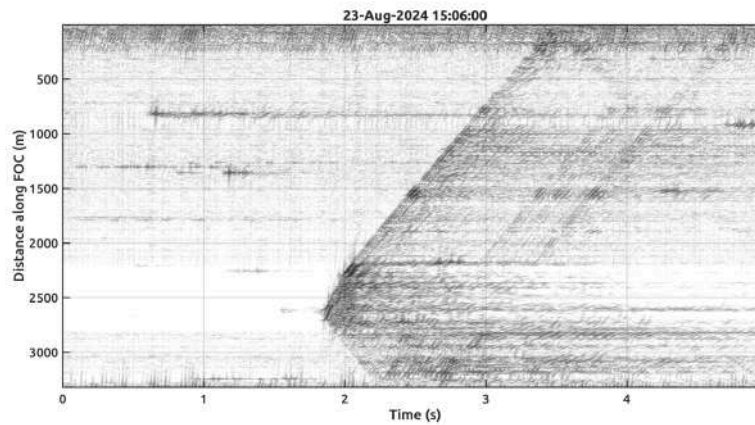


Figura 7.8 Registrazione DAS per un evento di origine ignota con sorgente in prossimità del pozzo di iniezione, ad una distanza di circa 2600 m lungo il cavo ottico. Le velocità di propagazione sono nell'ordine di 1650 m/s sia per il fronte ascendente che per quello discendente. Sono chiaramente visibili riflessioni sia alla superficie che a fondo pozzo.

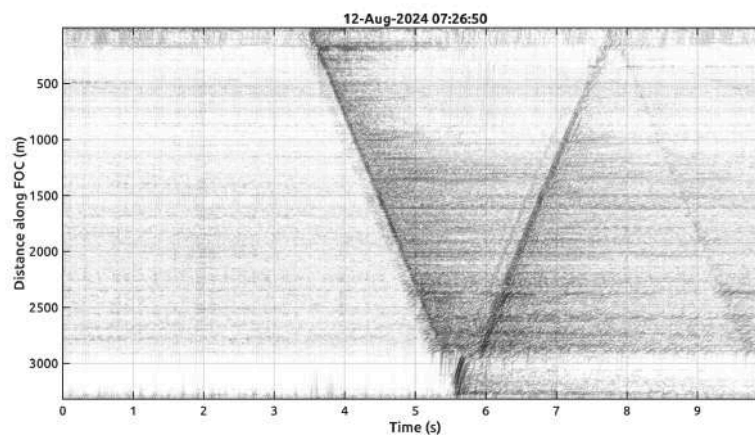


Figura 7.9 Registrazione DAS per un evento di origine ignota con sorgente alla superficie. La velocità di propagazione è di circa 1550 m/s.

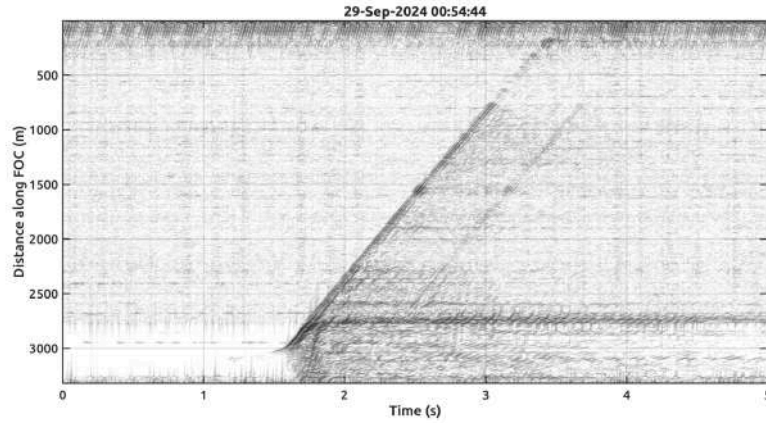
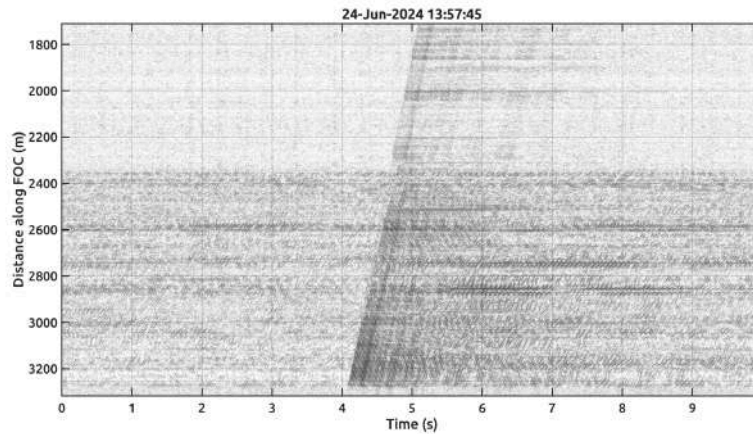


Figura 7.10 Registrazione DAS per un evento di origine ignota con sorgente lungo il tubino di iniezione, ad una distanza di circa 3000 m lungo il cavo ottico. Le velocità di propagazione sono nell'ordine di 1500 m/s sia per il fronte ascendente che discendente.

(a)



(b)

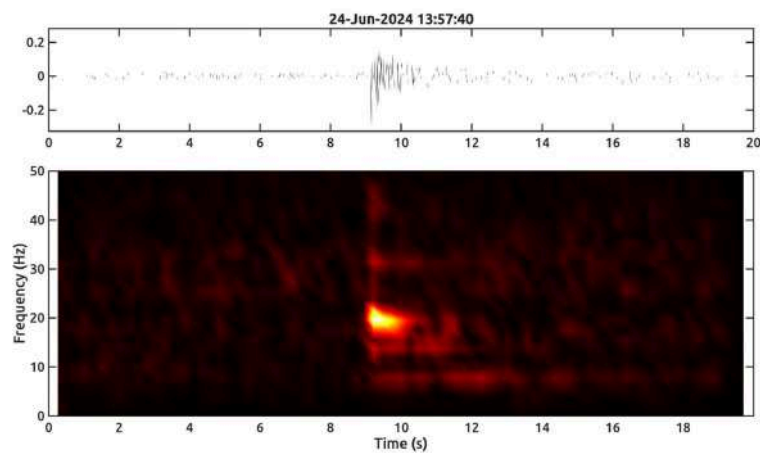


Figura 7.11 (a) Evento di origine ignota, con sorgente a profondità maggiori del fondo pozzo. La velocità di propagazione è nell'ordine di 1500 m/s. (b) Rappresentazione tempo-frequenza (spettrogramma) per la traccia del canale 1450 dell'evento in (a).

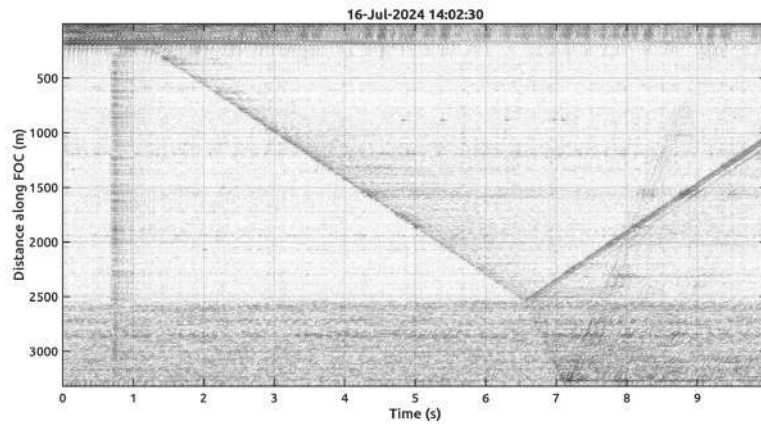


Figura 7.12: Registrazione DAS per un evento di origine ignota con sorgente in prossimità della superficie. La velocità di propagazione nel tratto 0-2600 m è di circa 430 m/s; nella parte terminale del cavo (~2600-3300 m) è di circa 1350 m/s.

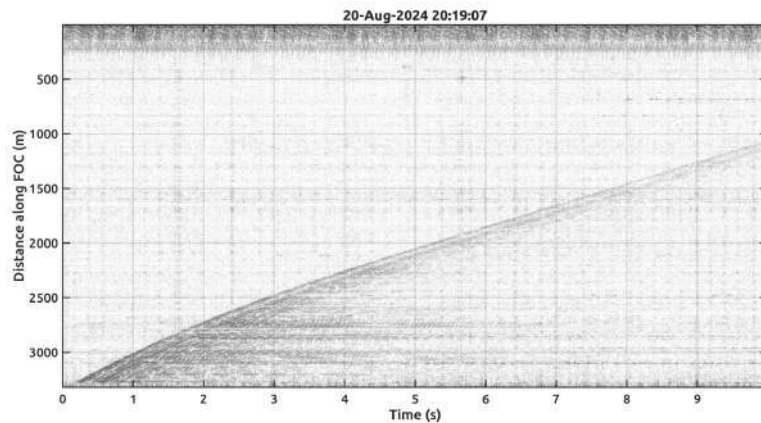


Figura 7.13 Registrazione DAS per un evento di origine ignota con sorgente profonda. Le velocità di propagazione variano nell'intervallo [200,300] m/s

7.6.2 Microsismicità locale

Ai fini del monitoraggio, il dato più interessante consiste nella discriminazione di 3 eventi microsismici (Tabella 7.3 e ffigg 7.14, 7.15 e 7.16), non catalogati nè dalla rete INGV nè da quella integrata utilizzata dalla SPM nel monitoraggio. Infatti come mostrato nelle figure dell'Appendice E, solo uno di questi eventi risulta visibile alla rete locale, seppur a solo due stazioni. Tutti e tre gli eventi sono occorsi nel periodo precedente l'avvio delle operazioni industriali, e possono quindi costituire un utile riferimento per la definizione della sismicità di background nell'area.

Per l'evento #2 è stato possibile ottenere una stima realistica della localizzazione ipocentrale, come mostrato nella prossima sezione. L'evento #1 è stato registrato durante il periodo in cui il sistema DAS campionava solo la porzione terminale del cavo. La propagazione delle onde P ed

S mostra comunque un pattern molto simile a quello dell'evento #2, per cui è ragionevole ipotizzare una simile localizzazione ipocentrale. L'evento #3 è posizionato sicuramente a una distanza maggiore dal pozzo iniettore, come evidenziato dalle maggiori differenze dei tempi di arrivo delle onde S rispetto alle P. Maggiori vincoli sulla localizzazione di questo evento potranno derivare dalla integrazione con le registrazioni della rete sismica locale (vedi figura E.3), pur considerando le limitazioni dovute alla mancanza di sincronizzazione fra il sistema DAS e la rete sismica.

ID	Tempo di detezione (UTC)	Ts-Tp al termine del cavo (s)
1	2024:06:24T18:15:41	0.53
2	2024:07:13T14:51:04	0.53
3	2024:08:01T23:01:18	2.58

Tabella 7.3 - Microsismi individuati dalla procedura di detezione automatica

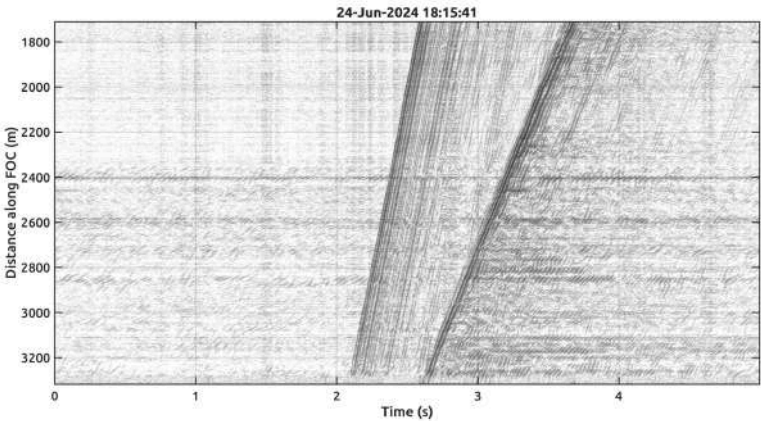


Figura 7.14 Registrazione DAS per un evento microsismico di natura verosimilmente tettonica. Si riconoscono chiaramente i due fronti d'onda P ed S, che si propagano con velocità nell'ordine di 3100m/s e 1550m/s, rispettivamente.

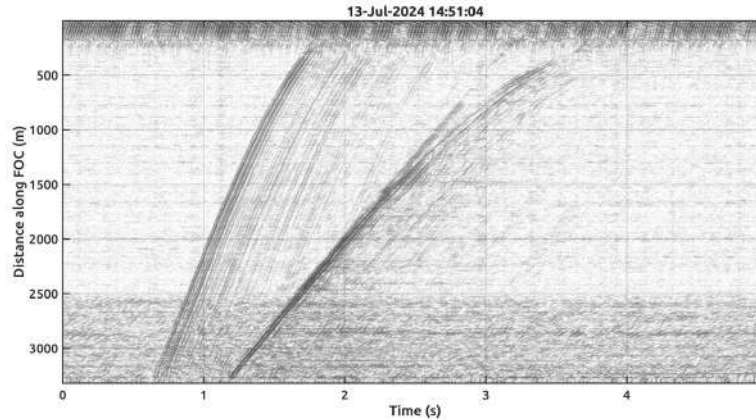


Figura 7.15 Registrazione DAS per un evento microsismico di natura verosimilmente tettonica. Nella porzione più profonda del cavo, i due fronti d'onda P ed S si propagano con velocità nell'ordine di 3100m/s e 1550m/s, rispettivamente.

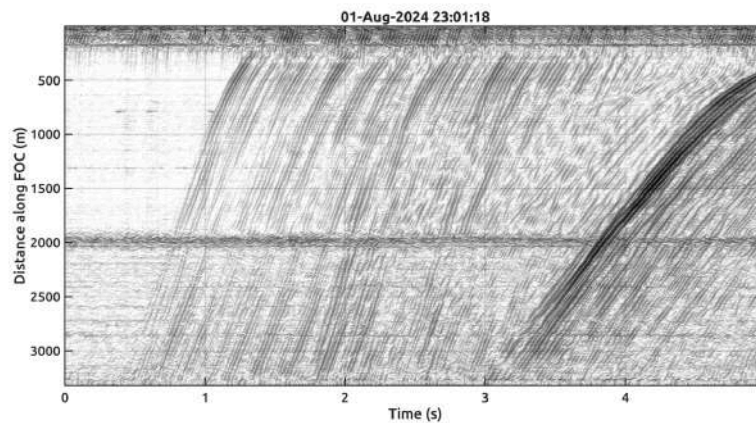


Figura 7.16 Registrazione DAS per un evento microsismico di natura verosimilmente tettonica. Nella porzione più profonda del cavo, i due fronti d'onda P ed S si propagano con velocità apparenti nell'ordine di 3800m/s e 1600m/s, rispettivamente.

7.7 Localizzazione probabilistica non-lineare

In questa sezione investighiamo la capacità di risoluzione dei dati DAS per la localizzazione della micro sismicità a scala locale. Per questa procedura, abbiamo utilizzato il pacchetto software di libero accesso NonLinLoc (Lomax et al., 2000; 2014; <https://github.com/ut-beg-texnet/NonLinLoc>, ultimo accesso 20 giugno 2026), che attualmente costituisce uno dei riferimenti più utilizzati dalla comunità sismologica internazionale. Questa scelta è fondata su due motivazioni principali:

1. Il calcolo dei tempi di tragitto si basa su uno schema alle differenze finite. Questo approccio è ideale per gestire configurazioni complesse di sorgenti e ricevitori, proprio come nel caso in esame, dove i ricevitori non sono disposti in superficie ma lungo un allineamento che si estende in profondità.
2. L'algoritmo di localizzazione prevede l'esplorazione diretta dello spazio dei parametri ipocentrali, consentendo una valutazione rigorosa della distribuzione delle incertezze.

Queste ultime includono sia gli errori di picking dei tempi di arrivo delle fasi P e S, che le incertezze nel calcolo dei tempi di tragitto teorici dovute alle approssimazioni dei modelli di velocità.

7.7.1 Calcolo delle librerie dei tempi di tragitto

Per il calcolo dei tempi di tragitto teorici, il pacchetto NonLinLoc sfrutta il principio di reciprocità, determinando i tempi di propagazione delle onde P ed S tra ogni stazione e i nodi della griglia in cui è stato discretizzato il volume da investigare. Questo approccio offre il notevole vantaggio di eseguire il calcolo una tantum: le tabelle (o librerie) così generate vengono poi riutilizzate per tutte le successive procedure di localizzazione. Nel caso in esame, per ciascun canale del cavo ottico sono stati calcolati i tempi di tragitto verso nodi equispaziati di 500 m, disposti su un intervallo di distanze epicentrali e profondità rispettivamente pari a 100 km e 50 km. Il calcolo è stato effettuato adottando il modello di velocità a strati piani e paralleli di Tabella 5.2 (Figura 7.17).

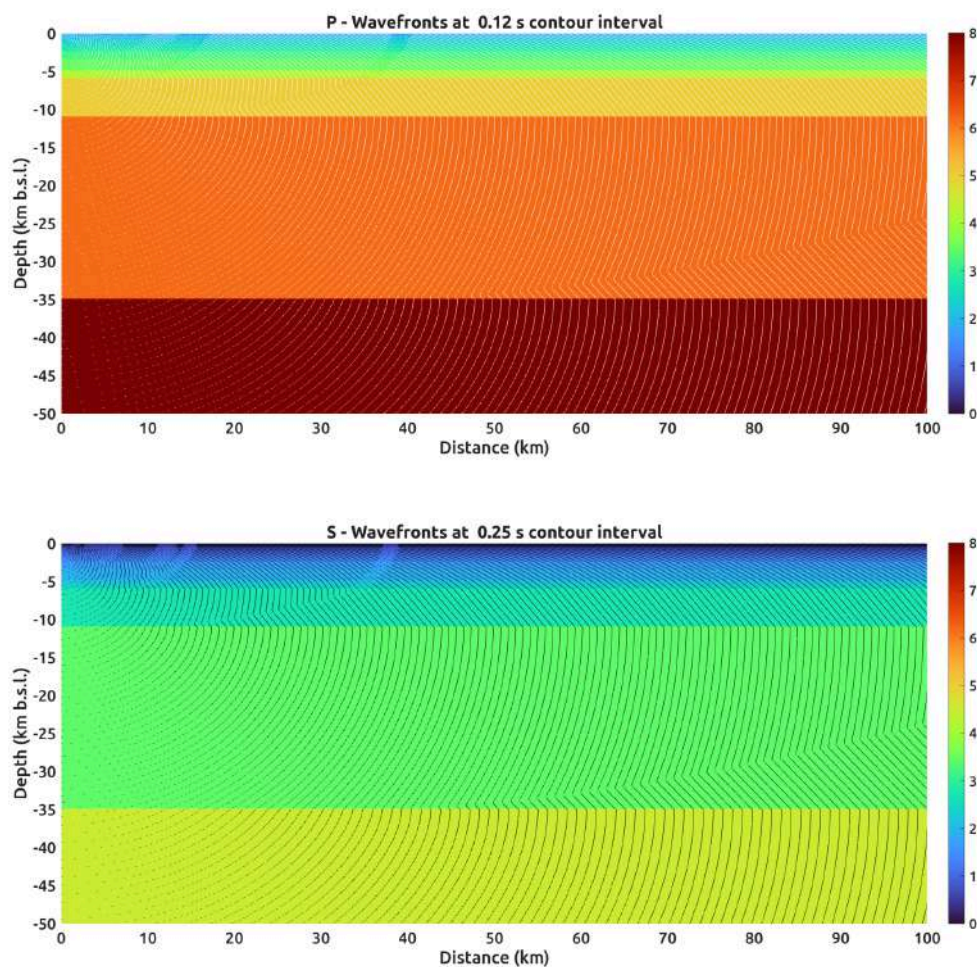


Figura 7.17 Calcolo dei tempi di tragitto nel modello di velocità utilizzato per il presente monitoraggio. I colori indicano la velocità di propagazione in accordo con la scala riportata alla destra. Le linee bianche rappresentano i fronti d'onda (linee isocrone) per un'onda che si propaga dal canale 1 della fibra, posto all'origine del sistema di riferimento. I pannelli superiore ed inferiore si riferiscono alle onde P e S, rispettivamente.

7.7.2 Definizione del volume di ricerca

Il primo passo nella procedura di localizzazione non lineare consiste nella definizione di un volume entro il quale ricercare le soluzioni. Abbiamo stabilito un volume esteso 100x100 km sul piano orizzontale e 40 km in direzione verticale, centrato sulla piattaforma PCWC (coordinate 44.50920°N, 12.37300°E; Figura 7.18). Questo volume è stato poi discretizzato con un reticolo di elementi cubici con lato 500m.

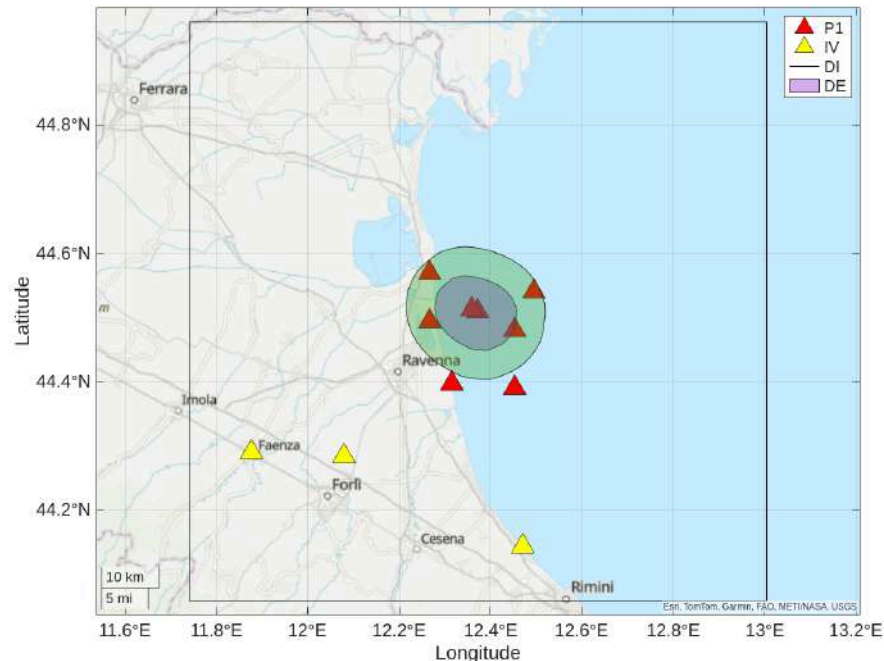


Figura 7.18 Proiezione orizzontale del volume di ricerca delle soluzioni ipocentrali. il volume si estende fino alla profondità di 40 km sotto il livello del mare.

7.8 Considerazioni conclusive

L'obiettivo principale di questo secondo rapporto è l'implementazione di un metodo di riconoscimento automatico di eventi basato sulla coerenza delle registrazioni ottenute su un tratto intermedio di Fibra. Il metodo è stato applicato dall'inizio delle registrazioni (fine maggio 2024), sino alla fine del mese di marzo 2025. Sono stati omessi dall'analisi i mesi di dicembre 2024 e gennaio - febbraio 2025, in quanto i dati risultavano fortemente contaminati dal rumore generato da macchinari posizionati a bordo piattaforma.

Oltre ai terremoti a distanza locale (< 100km) e regionale (<1000km) già riportati nel bollettino INGV, il metodo di detezione ha evidenziato l'occorrenza di numerosi eventi di origine sconosciuta, le cui caratteristiche morfologiche (mancanza di fasi P ed S distinte) e/o velocità di propagazione non sono compatibili con un meccanismo sorgente relazionato ad un processo di fratturazione.

Sono stati individuati tre eventi microsismici non riconosciuti precedentemente né dalla rete Nazionale INGV né da quella integrata utilizzata dalla SPM nell'ambito del presente AQ; tutti e tre gli eventi sono occorsi prima dell'inizio delle operazioni di stoccaggio.

Infine, è stato implementato un metodo di localizzazione probabilistica basato sull'inversione non lineare dei tempi di tragitto delle onde di volume. Questi ultimi sono stati calcolati in modalità reciproca tra i canali DAS e le stazioni della rete integrata verso tutti i nodi del volume di ricerca delle soluzioni. Le librerie dei tempi di tragitto così ottenute sono già predisposte per utilizzi futuri, come l'inversione congiunta dei dati della rete sismica e del sistema DAS. Come prima applicazione del metodo, è stato localizzato l'evento #2 di quelli elencati in Tabella 7.3, ottenendo una stima ben vincolata delle coordinate ipocentrali che, pur considerando le incertezze di localizzazione, pongono l'evento all'interno del Dominio Interno, come mostrato in Figura 7.19.

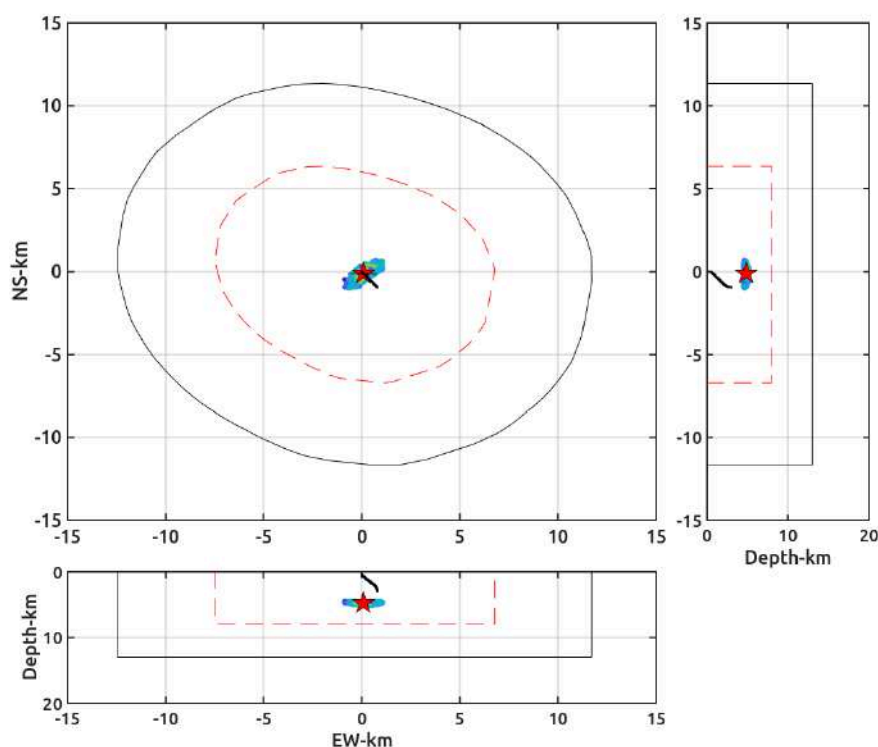


Figura 7.19 Localizzazione probabilistica dell'evento #2 di Tabella 7.3. I punti colorati rappresentano campioni estratti casualmente dalla funzione di probabilità della localizzazione ipocentrale. Il colore è proporzionale alla probabilità; l'insieme dei punti definisce l'intervallo di confidenza al 99.6% (3σ). La stella rossa rappresenta la soluzione di massima verosomiglianza. Le linee rosse e nere identificano i domini di monitoraggio.

8 Analisi dei dati di pressione e portata

Durante il secondo semestre di monitoraggio (ottobre 2025 - aprile 2026), l'impianto di cattura ed iniezione di CO₂ è rimasto fermo.

In data 25 maggio 2026, il Concessionario ha trasmesso le misure della pressione di giacimento acquisite nel pozzo di monitoraggio PCMWB-09D mediante profilo statico e *memory gauge*, e riferite al secondo semestre di monitoraggio. Tali misure sono un aggiornamento di misure precedentemente trasmesse e acquisite tra gennaio 2023 e marzo 2025 mediante profili statici di pressione, riferite sia al medesimo pozzo di monitoraggio sia ad altri pozzi del campo (PCMWC-23D, PCMWC-30D e PCMWB-08D). Tutte le misure disponibili sono rappresentative del livello che è stato interessato dall'iniezione (PL2-C).

La Figura 8.1 mostra le misure di pressione nel tempo disponibili per il pozzo di monitoraggio PCMWB-09D. L'interpolazione mediante un modello lineare caratterizzato da un coefficiente di determinazione $R^2 > 0,9$ evidenzia che, in tutto il periodo di analisi (2023-2026), non si sono registrati incrementi significativi della pressione riconducibili all'attività di iniezione di gas.



Figura 8.1 Misure di pressione di giacimento relative al pozzo di monitoraggio PCMWB-09D e riferite al livello PL2-C. Le misure (croci nere) sono confrontate con un modello di interpolazione lineare (linea rossa).

In data 1° luglio 2026, il Concessionario ha trasmesso i valori medi orari della pressione di fondo pozzo (*Bottom-Hole Pressure*, BHP), acquisiti mediante *permanent gauge* nel pozzo iniettore PCMWB-30DB. I dati, riferiti al periodo 1° ottobre 2025 – 30 giugno 2026, documentano l'evoluzione della pressione successivamente alla conclusione dell'iniezione, avvenuta il 31 agosto 2025.

Come mostrato in Figura 8.2, la BHP diminuisce rapidamente dall'inizio di settembre 2025 fino alla seconda metà di ottobre 2025. Successivamente e in tutto il semestre di monitoraggio, la pressione aumenta gradualmente.

La fase iniziale di diminuzione della pressione è compatibile con la dissipazione delle sovrappressioni generate durante l'iniezione. Il successivo incremento della BHP non trova un'immediata interpretazione sulla base dei dati disponibili e richiede ulteriori approfondimenti.

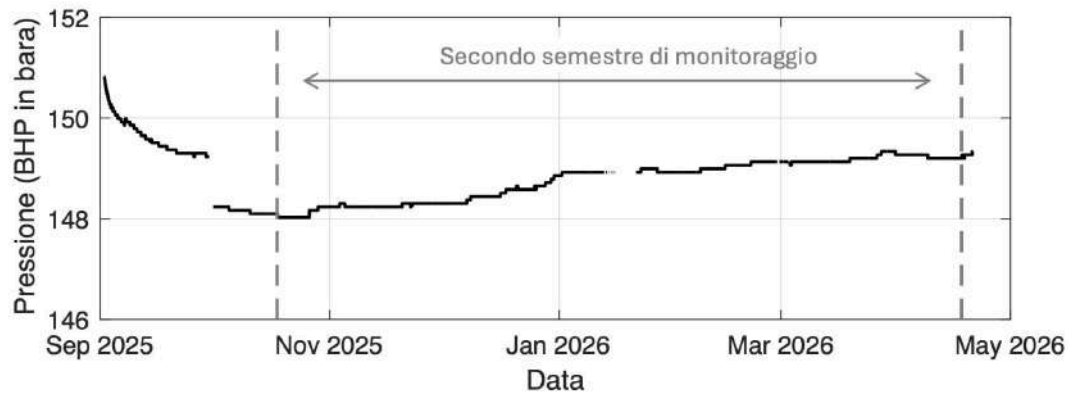


Figura 8.2 Andamento della pressione di fondo pozzo (BHP) misurato nel pozzo iniettore PCMW-30DB fino ad aprile 2026.

9 Considerazioni conclusive

In questo capitolo vengono raccolte e integrate le principali conclusioni emerse nei capitoli precedenti. L'obiettivo è offrire una visione complessiva e coerente dei risultati ottenuti, mettendo in relazione i diversi aspetti affrontati durante le analisi del monitoraggio e fornendo una sintesi organica degli aspetti di maggior forza e di quelli critici del monitoraggio.

Monitoraggio sismico

- Per quanto riguarda la sismicità registrata dalla rete sismica integrata P1 (del Concessionario) e IV (RSN-INGV):
 - 16 eventi sismici sono stati registrati in tutto il periodo di osservazione pre, sin e post iniezione (6 eventi nel Dominio Esteso, 10 eventi fuori dai domini);
 - 1 evento sismico **2023-12-25_05:27:41** (sottolineato in Tabella 6.3) è stato soggetto a revisione critica e risulta, sempre con elevate incertezze, localizzato al di fuori dai domini di rilevazione, mentre nel precedente report risultava essere all'interno del DE;
 - nel periodo relativo all'ultimo semestre (19 Ottobre 2025 - 18 Aprile 2026) oggetto del presente rapporto, nessun evento sismico è stato rilevato nell'area della Concessione e nelle immediate circostanze.
- Per quanto riguarda il funzionamento della rete sismica, integrata con le stazioni della RSN-INGV, è stato notato, a partire dalla fine di Novembre/inizi di Dicembre 2025 e fino ad Aprile 2026, un malfunzionamento delle componenti N e Z del segnale sismico della stazione AGOE, confermate da comunicazione da parte del Concessionario.
- Durante la ri-analisi critica di tutta la sismicità avvenuta nel periodo Aprile 2023 - Aprile 2026 è stato introdotto il calcolo della MLbt seguendo la relazione di Bragato e Tonto (2005) principalmente valida per il Nord-Est italiano, in aggiunta alle altre relazioni già adottate MLbj (Bakun and Joyner) e ML (Richter standard). Permangono tuttavia i problemi legati all'elevato livello di rumore di fondo a ciascuna stazione della rete e la difficoltà sistematica nel calcolo della ML e delle incertezze associate.

Monitoraggio delle deformazioni del suolo

- Come già evidenziato nel precedente rapporto, la rete di monitoraggio geodetico GNSS segue la maggior parte delle indicazioni riportate negli ILG, dal momento che: la strumentazione utilizzata è adatta a scopi geofisici, la maggior parte delle stazioni è ancorata al substrato roccioso, le stazioni GNSS sono posizionate in modo ottimale ai fini dell'acquisizione, registrando dati con una buona qualità e continuità temporale.
- Tenendo presente che l'area di monitoraggio del campo di Porto Corsini Mare Ovest (PCMW CCS) è circondata da altre concessioni di coltivazione idrocarburi tuttora attive sulle quali molte stazioni GNSS sono installate, sono state analizzate le acquisizioni giornaliere GNSS dell'ultimo periodo a partire dal 2018 per le stazioni di lunga data (dal 2020 per FIUN), per minimizzare possibili influenze dovute alle attività residue delle

concessioni adiacenti e allo stesso tempo massimizzare la capacità di identificare gli spostamenti eventualmente legati al campo di PCMW CCS.

- Dall'elaborazione dei dati GNSS di PCWC e PCWT, che sono ubicate esattamente sopra il campo di PCMW CCS, non si osservano particolari anomalie nelle serie temporali di spostamento in corrispondenza e successivamente al periodo delle operazioni di iniezione nel campo.
- L'analisi dei dati GNSS in termini di velocità di spostamento per il periodo più recente di acquisizione (a partire dal 2018) mostra un andamento abbastanza coerente in termini di intensità e direzione rispetto al campo di convergenza atteso in direzione Nord-Nord Est / Sud-Sud Ovest, soprattutto per le velocità stimate su un intervallo di anni ridotto, evidenziando un miglior allineamento dei trend rispetto alla convergenza attesa. Stessa omogeneità vale per le velocità di abbassamento, registrando valori di 4-5 mm/anno.
- Per le stazioni GNSS di recente installazione (AGOC, CABO, DICS e PCWT) sono stati stimati in via preliminare i termini di velocità di spostamento con lo scopo di avere una prima valutazione della bontà di acquisizione dei siti e i risultati sembrano in buon accordo con le stime ottenute per le stazioni adiacenti. Risulta comunque necessario validare e verificare questo risultato nelle prossime relazioni, avendo al momento acquisito dati per un intervallo temporale relativamente breve (~2.3 anni).
- L'analisi delle deformazioni del suolo tramite tecniche InSAR, applicate ai dati radar Sentinel-1 in entrambe le geometrie di acquisizione ascendente e discendente, mostra a larga scala deformazioni basse entro i -1.5 - 1.5 mm/anno. Si osservano valori di subsidenza del suolo generalmente bassi e localizzati, entro i 3 mm/anno, che solo localmente arrivano a valori di circa -10 mm/anno, nel settore compreso tra Ravenna e Marina di Ravenna. Le subsidenze misurate con valori compresi tra 3 e 10 mm/anno mostrano un' estensione spaziale molto limitata nell'area del DE, probabilmente attribuibile a fenomeni estremamente locali. Questi risultati sono generalmente in accordo con le misure ottenute tramite le elaborazioni GNSS, nonostante i periodi di acquisizione dei dati non siano esattamente coincidenti. Dalle analisi GNSS e InSAR finora effettuate non si rilevano comunque evidenti variazioni delle deformazioni del suolo legate alle attività di iniezione eseguita nel campo PCMW CCS.
- I dati di livellazione forniti dal concessionario derivano da una campagna di misura svolta nel 2023 lungo un ampio tracciato che riguarda la costa ravennate, le cui osservazioni rientrano nei limiti di tolleranza previsti. Ad ogni modo i dati disponibili non permettono di valutare eventuali fenomeni deformativi, necessitando di almeno due campagne di misura.

Monitoraggio DAS

- È stato implementato un algoritmo per la detezione di segnali transienti basato sulla metrica di coerenza multicanale *Semblance*. Il metodo è stato testato su sei mesi di

registrazioni (dal 1° giugno 2024 al 31 marzo 2025), escludendo il periodo tra novembre 2024 e febbraio 2025 a causa dell'elevato rumore meccanico ambientale. Oltre ai sismi locali e regionali, il sistema ha rilevato numerosi segnali di natura ignota, ma comunque non riconducibili a processi sismogenetici naturali o innescati / indotti dall'attività antropica.

- Sono stati individuati tre eventi microsismici occorsi prima dell'inizio delle operazioni di stoccaggio, non rilevati precedentemente né dalla rete sismica nazionale INGV né da quella integrata utilizzata dalla SPM.
- Per la localizzazione, è stato implementato un approccio probabilistico basato sull'inversione non lineare dei tempi di tragitto delle onde di volume. A tal fine, sono state predisposte le librerie dei tempi di tragitto sia per il sistema DAS che per la rete sismica integrata, adottando il modello di velocità già in uso per il monitoraggio tradizionale.
- Come prima applicazione, la localizzazione di uno dei tre nuovi eventi microsismici ha fornito una stima vincolata delle coordinate ipocentrali della sorgente che, pur considerando i margini d'incertezza, ricade all'interno del Dominio Interno.
- La continuità del dato (aggiornata ad aprile 2026) si mantiene molto buona (superiore al 95%), sebbene si sia registrato un considerevole aumento della latenza nel caricamento dei dati sul data center del concessionario a seguito del termine delle operazioni di iniezione.

Come precisazione finale, si rammenta che non esistono ancora metodologie standardizzate per la discriminazione, localizzazione e stima della magnitudo di eventi registrati tramite DAS; pertanto, i risultati presentati vanno considerati sperimentali e possibilmente soggetti a future revisioni o miglioramenti.

Monitoraggio delle pressioni di poro

- I dati puntuali riferiti al pozzo di monitoraggio PCMW-09D indicano che la pressione di giacimento, misurata nel livello che è stato interessato fino ad agosto 2025 dall'iniezione di CO₂ (PL2-C), cresce in maniera lenta e continua durante il secondo semestre di monitoraggio e non mostra incrementi significativi. Pertanto, nel periodo osservato che corrisponde alla fase post-iniezione, il fronte di pressione associato all'iniezione non sembra aver raggiunto il pozzo di monitoraggio.
- I dati di pressione di fondo pozzo (BHP), acquisiti in continuo nel pozzo iniettore PCMW-30DB a partire da settembre 2025, mostrano un'iniziale diminuzione, compatibile con la dissipazione delle sovrappressioni generate durante l'iniezione. Il successivo incremento della BHP, osservato durante il secondo semestre del monitoraggio, richiede ulteriori approfondimenti al fine di chiarire i meccanismi da cui è generato.

Glossario

AQ:	Accordo Quadro
BHP:	<i>Bottom Hole Pressure</i>
CCS:	<i>Carbon Capture and Storage</i>
CMS:	Centro di Monitoraggio per le attività di Sottosuolo
DAS:	<i>Distributed Acoustic Sensing</i>
DE:	Dominio Esteso
DGOM:	Documento di Gestione Operativa di Monitoraggio
DI:	Dominio Interno
ETS:	<i>Emission Trading System</i>
FK:	Frequenza - Numero d'Onda
GNSS:	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS:	<i>Global Positioning System</i>
IGS:	<i>International GNSS Service</i>
ILG:	Indirizzi e Linee Guida per il Monitoraggio della sismicità delle Deformazioni del Suolo e delle pressioni di poro nell'ambito delle attività antropiche
InSAR:	<i>Interferometric SAR</i>
INGV:	Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
IV:	Sigla rete (NW-Code) RSN (INGV)
MASE:	Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica
ML:	Magnitudo Locale
MLbj:	Magnitudo Locale Bakun and Joyner
MLbt:	Magnitudo Locale Bragato - Tonto
P1:	Porto Corsini seismic network
PCMW CCS:	Campo di Porto Corsini Mare Ovest
PGA:	<i>Peak Ground Acceleration</i>
PGV:	<i>Peak Ground Velocity</i>
PPSD:	<i>Probability Power Spectral Density</i>
RSN:	Rete Sismica Nazionale (INGV)
SAR:	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
SBAS:	<i>Small BAseline Subset</i>
SPM:	Struttura Preposta al Monitoraggio
TLS:	<i>Traffic Light System</i> - sistema a semaforo
UTC:	<i>Tempo Coordinato Universale (Coordinated Universal Time)</i>

Appendice A - Sismicità e rete sismica nazionale

Data e Ora (Italia)	M	Zona	Z (Km)	Lat	Lon
1985-08-15 04:07:54	Md 3.1	7 km SW Lagosanto (FE)	10	44.722	12.081
1985-12-21 07:41:30	Md 3.1	8 km SW Comacchio (FE)	10	44.629	12.138
1988-03-10 13:07:23	Md 2.7	12 km SW Comacchio (FE)	5	44.597	12.13
1988-05-15 16:29:18	Md 2.7	Costa Ravennate (RA)	10	44.52	12.323
1988-05-22 23:31:03	Md 2.8	Costa Ravennate (RA)	5	44.527	12.446
1988-08-26 22:12:49	Md 2.8	Costa Ferrarese (FE)	5	44.66	12.486
1988-12-24 20:39:48	Md 2.8	9 km SW Comacchio (FE)	10	44.649	12.085
1990-01-19 12:46:16	Md 2.8	4 km E Bagnacavallo (RA)	5	44.424	12.021
1990-10-30 19:41:52	Md 2.6	Costa Ravennate (RA)	5	44.583	12.475
1991-02-20 13:53:30	Md 3.3	3 km S Russi (RA)	5	44.347	12.038
1991-03-04 05:08:11	Md 2.9	Costa Ferrarese (FE)	15	44.626	12.541
1992-06-25 20:19:54	Md 2.7	9 km NE Ravenna (RA)	7	44.48	12.269
1993-02-09 10:22:25	Md 2.3	Costa Ravennate (RA)	10	44.384	12.339
1993-03-11 22:43:56	Md 2.5	6 km S Russi (RA)	10	44.322	12.031
1993-05-01 21:53:23	Md 2.2	10 km S Ravenna (RA)	10	44.33	12.172
1993-07-04 19:50:52	Md 2.3	Costa Ravennate (RA)	10	44.349	12.468
1993-10-17 17:08:47	Md 2.6	Costa Ravennate (RA)	10	44.391	12.454
1993-11-14 21:26:24	Md 2.2	4 km NE Russi (RA)	5	44.409	12.059
1994-02-15 13:17:58	Md 2.6	8 km S Russi (RA)	10	44.305	12.026
1994-11-27 18:02:05	Md 2.9	11 km NE Alfonsine (RA)	8	44.594	12.107
1994-11-29 09:20:20	Md 2.3	9 km NW Cervia (RA)	10	44.337	12.306
1995-02-26 20:22:40	Md 3.0	8 km NW Ravenna (RA)	5	44.477	12.14
1995-08-09 23:35:10	Md 2.9	5 km E Alfonsine (RA)	11	44.489	12.102

1995-10-07 15:47:59	Md 2.3	Costa Ravennate (RA)	10	44.362	12.349
1996-01-11 10:40:36	Md 2.5	7 km E Alfonsine (RA)	5	44.482	12.125
1996-01-28 16:21:59	Md 2.4	Costa Ravennate (RA)	5	44.334	12.477
1996-03-18 02:15:52	Md 2.9	7 km E Alfonsine (RA)	5	44.506	12.133
1996-04-18 10:45:09	Md 3.4	1 km SE Ravenna (RA)	9,9	44.409	12.205
1996-08-23 05:03:51	Md 2.8	Costa Ravennate (RA)	5	44.534	12.419
1997-08-02 14:00:48	Md 2.5	5 km S Russi (RA)	11	44.329	12.031
1997-10-02 19:42:23	Md 2.4	7 km E Ravenna (RA)	42	44.417	12.284
2000-01-18 19:55:42	Md 2.4	9 km S Comacchio (FE)	5	44.615	12.16
2000-04-26 20:28:50	Md 2.7	1 km E Russi (RA)	5	44.375	12.049
2000-05-11 00:02:59	Md 2.9	7 km SW Russi (RA)	15	44.317	12.009
2000-10-16 21:58:11	Md 2.7	3 km W Alfonsine (RA)	5	44.513	12.007
2000-12-06 03:49:58	Md 3.2	10 km N Alfonsine (RA)	5	44.599	12.04
2000-12-06 04:39:51	Md 2.4	3 km N Alfonsine (RA)	10	44.53	12.048
2001-01-11 18:22:55	Md 2.6	7 km NW Alfonsine (RA)	5	44.564	12.002
2001-01-23 12:11:22	Md 2.7	9 km SE Ravenna (RA)	4	44.341	12.245
2001-04-17 22:35:27	Md 2.2	Costa Ravennate (RA)	10	44.426	12.324
2002-07-26 02:01:27	Md 2.9	15 km SE Comacchio (FE)	9	44.571	12.255
2002-08-12 22:50:37	Md 3.3	13 km SE Comacchio (FE)	5	44.596	12.262
2002-10-21 19:42:46	Md 2.5	9 km NW Ravenna (RA)	10	44.49	12.16
2002-11-02 10:57:44	Md 4.1	15 km SE Comacchio (FE)	9	44.576	12.263
2002-11-21 17:23:33	Md 3.1	14 km SE Comacchio (FE)	5	44.573	12.243
2002-12-25 23:40:36	Md 2.8	Costa Ferrarese (FE)	5	44.799	12.505
2003-02-01 08:51:54	Md 2.9	Costa Ravennate (RA)	5	44.579	12.294
2003-02-01 09:24:37	Md 3.2	13 km S Comacchio (FE)	7	44.584	12.225
2003-05-30 12:30:21	Md 2.7	7 km W Comacchio (FE)	6	44.691	12.092
2003-09-28 08:32:34	Md 2.5	Costa Ferrarese (FE)	5	44.622	12.289
2004-01-23 10:40:11	Md 2.2	6 km SE Russi (RA)	10	44.32	12.065

2004-02-06 19:02:38	Md 2.1	11 km S Ravenna (RA)	10	44.319	12.174
2004-02-12 09:13:28	Md 3.5	Costa Ravennate (RA)	5	44.484	12.579
2004-02-13 06:18:10	Md 2.4	4 km E Bagnacavallo (RA)	10	44.433	12.028
2004-02-18 23:37:19	Md 2.8	11 km SW Comacchio (FE)	5	44.634	12.07
2004-03-07 17:58:07	Md 2.6	Costa Ravennate (RA)	5	44.504	12.584
2004-03-10 09:24:26	Md 2.2	8 km S Comacchio (FE)	5	44.628	12.195
2004-07-20 11:33:46	Md 2.4	Costa Ravennate (RA)	10	44.462	12.437
2005-03-08 08:41:53	Md 2.3	Costa Ravennate (RA)	10	44.44	12.378
2005-03-26 16:59:18	Md 2.4	9 km NE Alfonsine (RA)	13	44.548	12.138
2005-04-11 01:32:18	Md 2.7	Costa Ravennate (RA)	5	44.363	12.333
2005-09-06 22:17:36	ML 1.7	6 km S Comacchio (FE)	12	44.641	12.193
2006-03-24 08:51:59	ML 2.3	12 km S Ravenna (RA)	10	44.307	12.181
2006-05-04 13:18:47	ML 2.3	11 km E Ravenna (RA)	12	44.369	12.322
2006-10-17 23:32:15	ML 2.1	12 km SW Comacchio (FE)	2	44.627	12.072
2006-12-12 22:08:25	ML 2.0	8 km N Alfonsine (RA)	12	44.575	12.056
2007-01-24 04:06:00	Md 2.2	8 km SE Ravenna (RA)	29	44.351	12.236
2007-01-27 19:41:56	ML 1.5	10 km NW Cervia (RA)	10	44.312	12.253
2007-02-14 23:10:54	ML 3.3	7 km S Russi (RA)	18	44.306	12.029
2007-02-15 00:27:30	Md 2.0	3 km SW Russi (RA)	10	44.351	12.016
2007-02-18 12:02:01	ML 1.5	6 km SE Russi (RA)	10	44.34	12.09
2007-05-11 16:20:55	ML 2.1	11 km S Ravenna (RA)	31	44.325	12.227
2008-03-29 15:12:11	ML 1.5	Costa Ravennate (RA)	10	44.309	12.358
2009-02-13 19:08:17	ML 1.8	12 km SE Ostellato (FE)	1	44.656	12.034
2009-02-18 10:14:35	ML 1.9	Costa Ravennate (RA)	10	44.302	12.446
2009-02-23 20:53:26	ML 1.5	6 km W Ravenna (RA)	5	44.403	12.124
2009-03-30 17:43:01	ML 2.0	9 km NE Ravenna (RA)	8	44.487	12.267
2009-04-06 01:03:34	ML 1.4	5 km S Russi (RA)	10	44.328	12.043
2009-07-22 03:30:56	ML 1.2	10 km NW Cervia (RA)	36	44.347	12.306

2009-09-01 22:07:13	ML 2.6	11 km N Alfonsine (RA)	32	44.603	12.04
2010-03-25 00:14:43	ML 2.3	3 km W Comacchio (FE)	1	44.691	12.146
2010-03-29 11:34:12	ML 1.9	3 km NE Comacchio (FE)	1	44.717	12.209
2010-06-29 08:05:30	ML 1.7	4 km E Russi (RA)	15	44.364	12.08
2010-08-24 13:25:35	ML 2.4	Costa Ravennate (RA)	31	44.445	12.582
2011-01-05 12:16:27	M 0.8	Costa Ravennate (RA)	10	44.3	12.55
2011-01-28 12:54:56	M 0.6	Costa Ravennate (RA)	10	44.4	12.36
2011-05-07 22:53:53	ML 1.2	Costa Ravennate (RA)	30	44.517	12.339
2011-08-11 06:34:55	ML 1.4	2 km NW Russi (RA)	10	44.382	12.018
2011-08-17 14:13:32	ML 2.5	Costa Ravennate (RA)	21	44.481	12.538
2011-11-06 20:12:07	Md 1.9	1 km E Russi (RA)	25	44.374	12.044
2012-03-15 02:00:50	ML 1.8	Costa Ravennate (RA)	22	44.542	12.557
2012-04-06 04:51:06	ML 1.2	8 km SE Russi (RA)	9	44.319	12.109
2012-06-03 02:32:42	ML 2.3	11 km E Ravenna (RA)	34	44.3742	12.3177
2012-06-06 04:08:31	Mw 4.0	Costa Ravennate (RA)	31	44.3995	12.3222
2012-06-06 04:11:47	Md 2.3	4 km E Ravenna (RA)	32	44.41	12.2512
2012-06-06 05:14:49	ML 2.1	4 km NE Ravenna (RA)	33	44.4533	12.2193
2012-06-06 09:57:06	ML 2.1	Costa Ravennate (RA)	29	44.471	12.3483
2012-06-08 01:11:39	ML 2.6	8 km NE Ravenna (RA)	21	44.4722	12.2687
2012-06-08 20:30:04	ML 2.1	Costa Ravennate (RA)	30	44.4282	12.3367
2012-06-09 02:13:57	ML 2.3	Costa Ravennate (RA)	22	44.4158	12.3263
2012-06-14 20:48:29	ML 1.3	12 km SE Russi (RA)	27	44.305	12.1482
2012-07-09 03:28:55	ML 1.6	5 km NW Cervia (RA)	40	44.301	12.3333
2012-08-29 02:27:22	ML 1.5	Costa Ravennate (RA)	29	44.4787	12.3158
2012-10-09 04:24:36	ML 2.4	Costa Ravennate (RA)	26	44.4172	12.5348
2012-11-25 17:03:28	ML 2.0	3 km SW Ravenna (RA)	36	44.3945	12.1802
2013-04-04 20:34:15	ML 2.6	6 km E Ostellato (FE)	24	44.7225	12.0153
2013-07-15 17:05:38	ML 2.2	8 km N Ravenna (RA)	20	44.4893	12.1893

2014-01-22 06:24:05	ML 2.6	Costa Ravennate (RA)	23	44.3832	12.3515
2014-06-14 22:53:25	ML 1.8	5 km S Russi (RA)	31	44.3272	12.0428
2014-08-29 19:23:58	ML 2.2	4 km E Alfonsine (RA)	33	44.5107	12.0943
2014-09-16 06:50:07	ML 1.7	3 km E Ravenna (RA)	35	44.4052	12.2377
2015-09-15 00:49:00	ML 2.2	4 km NE Bagnacavallo (RA)	31	44.4485	12.0013
2016-03-30 01:52:57	ML 1.9	Costa Ravennate (RA)	20	44.446	12.3978
2016-04-07 18:25:56	ML 3.2	11 km SW Comacchio (FE)	3	44.6453	12.0667
2016-12-11 21:54:00	ML 2.2	13 km E Argenta (FE)	9	44.6353	12.0008
2017-01-14 11:24:36	ML 2.6	Costa Ravennate (RA)	36	44.5417	12.4108
2017-04-21 00:55:33	ML 2.6	Costa Ravennate (RA)	32	44.4573	12.4117
2017-08-13 20:54:05	ML 1.7	3 km E Bagnacavallo (RA)	25	44.416	12.0142
2018-07-02 12:40:30	ML 2.5	Costa Ravennate (RA)	32	44.4053	12.3622
2019-01-14 23:03:57	Mw 4.3	10 km SE Ravenna (RA)	21	44.3467	12.2857
2019-01-14 23:17:48	ML 1.9	7 km SE Ravenna (RA)	24	44.358	12.2377
2019-01-14 23:29:07	ML 3.0	9 km E Ravenna (RA)	21	44.3773	12.3018
2019-01-15 03:44:13	ML 2.1	11 km S Ravenna (RA)	23	44.323	12.2028
2019-01-17 07:15:56	ML 2.1	8 km E Russi (RA)	23	44.3705	12.1288
2019-01-20 23:24:16	ML 2.1	5 km S Ravenna (RA)	23	44.3718	12.1893
2019-02-05 11:47:55	ML 2.1	6 km SE Ravenna (RA)	19	44.3882	12.2617
2020-01-24 17:02:35	ML 2.5	6 km E Ravenna (RA)	10	44.4282	12.2772
2020-01-24 17:02:48	ML 3.4	Costa Ravennate (RA)	9	44.4213	12.3182
2020-01-24 23:17:04	ML 2.7	10 km E Ravenna (RA)	8	44.3782	12.3125
2020-01-24 23:41:01	ML 3.0	8 km E Ravenna (RA)	8	44.4213	12.3028
2020-01-25 00:56:08	ML 1.9	7 km S Ravenna (RA)	25	44.3527	12.2043
2020-01-26 06:04:52	ML 1.9	8 km E Ravenna (RA)	21	44.4033	12.2988
2020-01-28 04:15:40	ML 2.3	5 km E Ravenna (RA)	22	44.4168	12.2593
2020-01-28 04:15:54	ML 2.5	5 km E Ravenna (RA)	18	44.399	12.2635
2020-02-23 15:39:59	ML 3.1	7 km S Ravenna (RA)	23	44.3523	12.213

2020-04-19 03:27:05	ML 2.8	Costa Ravennate (RA)	10	44.4193	12.3313
2020-04-25 18:35:27	ML 1.5	6 km S Ravenna (RA)	25	44.3638	12.2067
2020-05-08 03:17:00	ML 1.0	4 km SW Russi (RA)	25	44.3422	12.0172
2020-12-09 01:02:04	ML 2.5	Costa Ravennate (RA)	18	44.3007	12.3987
2021-05-24 04:21:35	ML 2.6	Costa Ferrarese (FE)	38	44.7543	12.5878
2021-06-05 07:06:52	ML 1.7	10 km NW Cervia (RA)	33	44.3368	12.2922
2021-07-16 18:10:37	ML 1.9	13 km E Alfonsine (RA)	24	44.5397	12.2028
2021-07-24 20:59:16	ML 1.8	2 km NE Lagosanto (FE)	23	44.7792	12.1508
2021-08-11 22:31:05	ML 1.5	9 km SE Russi (RA)	21	44.317	12.1208
2021-09-17 20:05:27	ML 1.2	1 km W Russi (RA)	22	44.3752	12.019
2022-01-29 06:55:09	ML 1.5	11 km S Ravenna (RA)	36	44.319	12.2308
2022-12-03 03:49:36	ML 2.3	Costa Ferrarese (FE)	32	44.7613	12.3237
2023-07-28 19:58:44	ML 2.3	Costa Ferrarese (FE)	24	44.6602	12.2917
2023-09-18 18:44:37	ML 2.4	Costa Ravennate (RA)	31	44.4023	12.3393
2023-09-29 23:24:59	ML 2.7	12 km N Alfonsine (RA)	15	44.613	12.0542
2023-09-30 02:52:07	ML 2.7	10 km N Alfonsine (RA)	22	44.5933	12.0608
2023-10-18 20:05:35	ML 2.0	11 km SE Russi (RA)	23	44.3243	12.1507
2023-10-19 03:08:46	ML 2.3	9 km E Russi (RA)	23	44.3432	12.1342
2024-01-17 20:32:51	ML 2.2	7 km SW Ravenna (RA)	18	44.3578	12.163
2024-04-01 05:01:08	ML 1.9	5 km S Russi (RA)	26	44.3243	12.039
2024-05-12 10:03:21	ML 2.4	8 km W Ravenna (RA)	25	44.4228	12.1038
2024-06-06 05:54:25	ML 1.6	8 km SE Russi (RA)	21	44.3297	12.1113
2024-12-20 00:23:00	ML 2.3	Costa Ferrarese (FE)	6	44.7613	12.589
2024-12-20 00:35:16	ML 3.0	Costa Ferrarese (FE)	33	44.7545	12.4877
2025-02-10 02:08:57	ML 1.6	Costa Ravennate (RA)	36	44.3627	12.5593
2025-04-29 20:43:02	ML 1.5	Costa Ravennate (RA)	18	44.3082	12.4308
2025-06-25 21:32:23	ML 1.3	Costa Ravennate (RA)	18	44.3328	12.4417

2026-01-13 21:54:22	ML 1.8	7 km S Russi (RA)	23	44.314 8	12.019 8
2026-01-14 02:34:25	ML 1.8	6 km S Russi (RA)	25	44.316 5	12.029 7

Tabella A.1: Elenco dei terremoti strumentali presenti nel bollettino INGV che ricadono nell'area di studio. Gli eventi che ricadono nel DI vengono evidenziati in fucsia, quelli che ricadono nel DE sono evidenziati in rosa.

Appendice B - Serie temporali di spostamento GPS

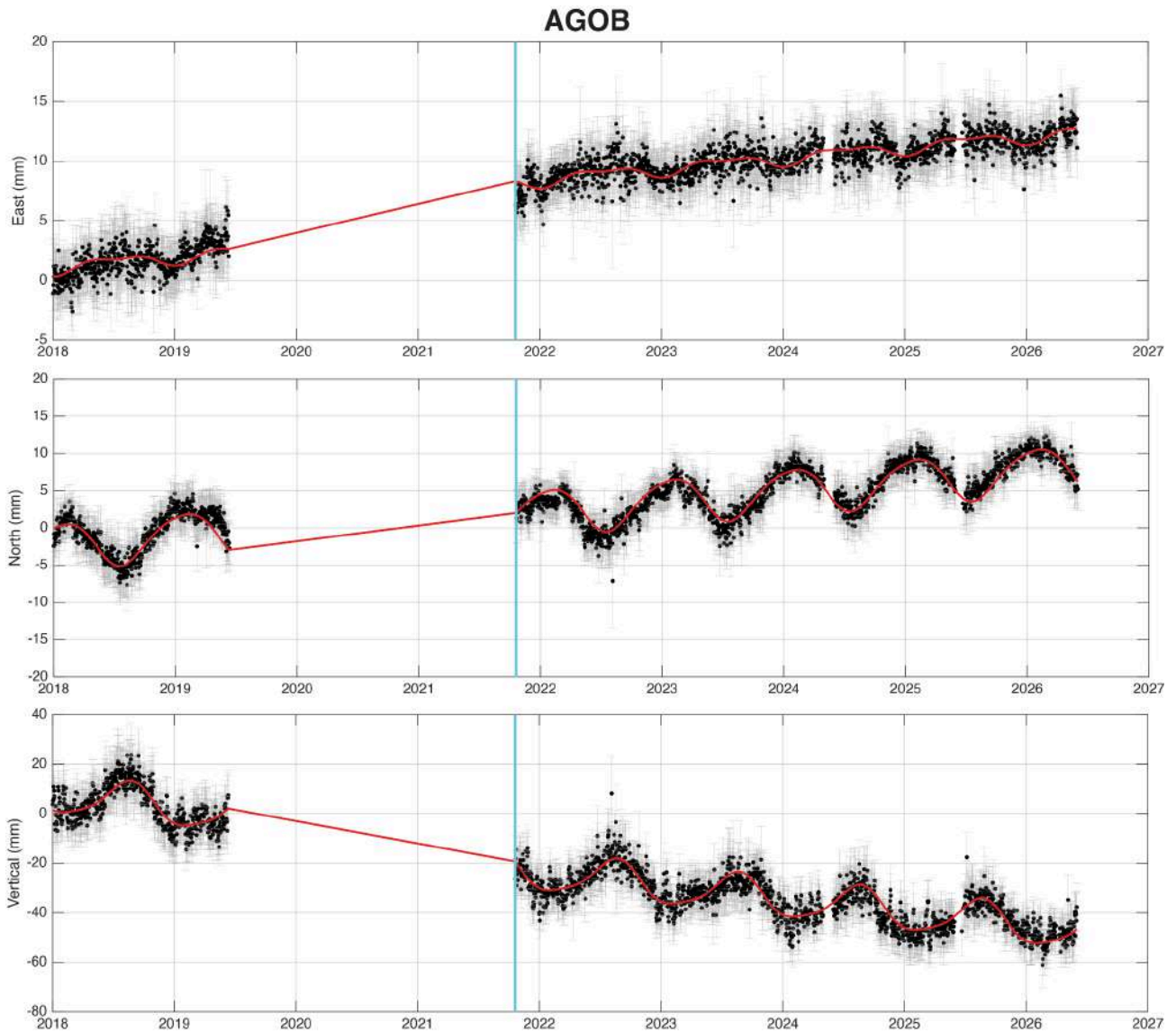


Figura B.1. Serie temporale di spostamento (punti neri) della stazione AGOB nel sistema di riferimento Eurasia-fisso per le componenti Est e Nord e in IGS20 per la componente verticale. Le linee grigie indicano le barre d'errore (1σ) per gli spostamenti e la linea rossa rappresenta il modello analitico atteso. La barra azzurra verticale indica la presenza di un offset di spostamento dovuto ad un cambio strumentale.

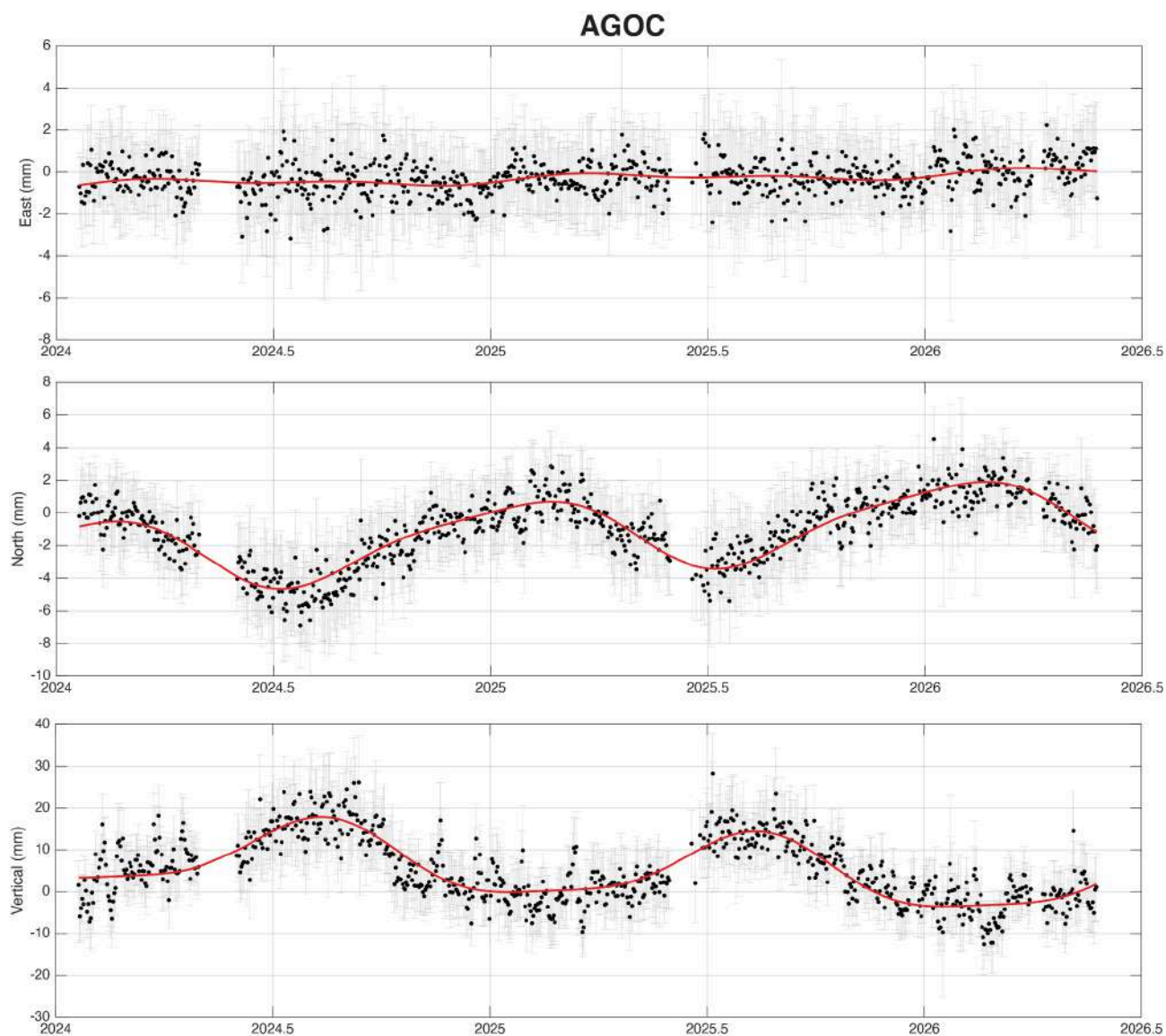


Figura B.2. Serie temporale di spostamento (punti neri) della stazione AGOC nel sistema di riferimento Eurasia-fisso per le componenti Est e Nord e in IGS20 per la componente verticale. Le linee grigie indicano le barre d'errore (1σ) per gli spostamenti e la linea rossa rappresenta il modello analitico atteso.

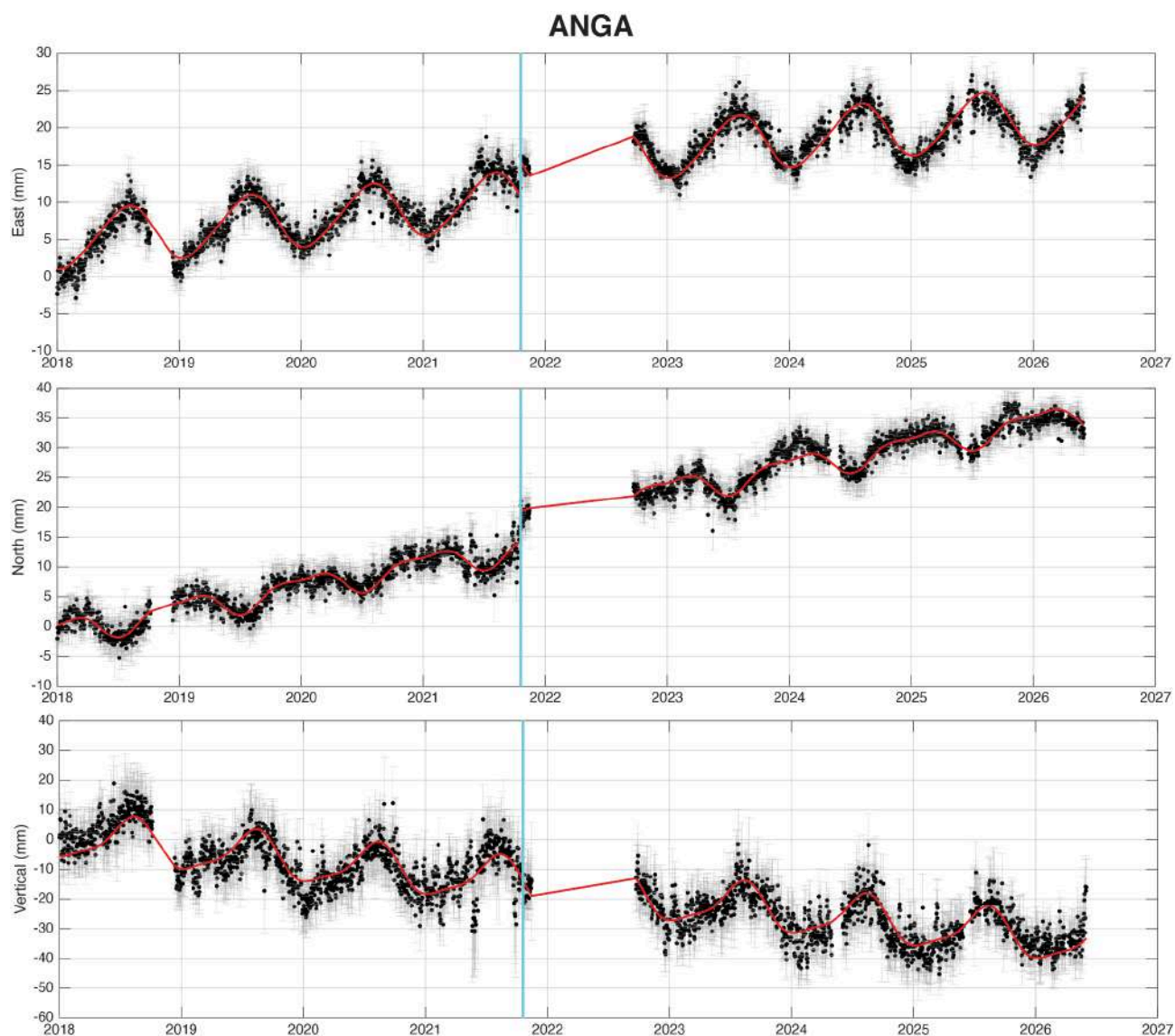


Figura B.3. Serie temporale di spostamento (punti neri) della stazione ANGA nel sistema di riferimento Eurasia-fisso per le componenti Est e Nord e in IGS20 per la componente verticale. Le linee grigie indicano le barre d'errore (1σ) per gli spostamenti e la linea rossa rappresenta il modello analitico atteso. La barra azzurra verticale indica la presenza di un offset di spostamento dovuto ad un cambio strumentale.

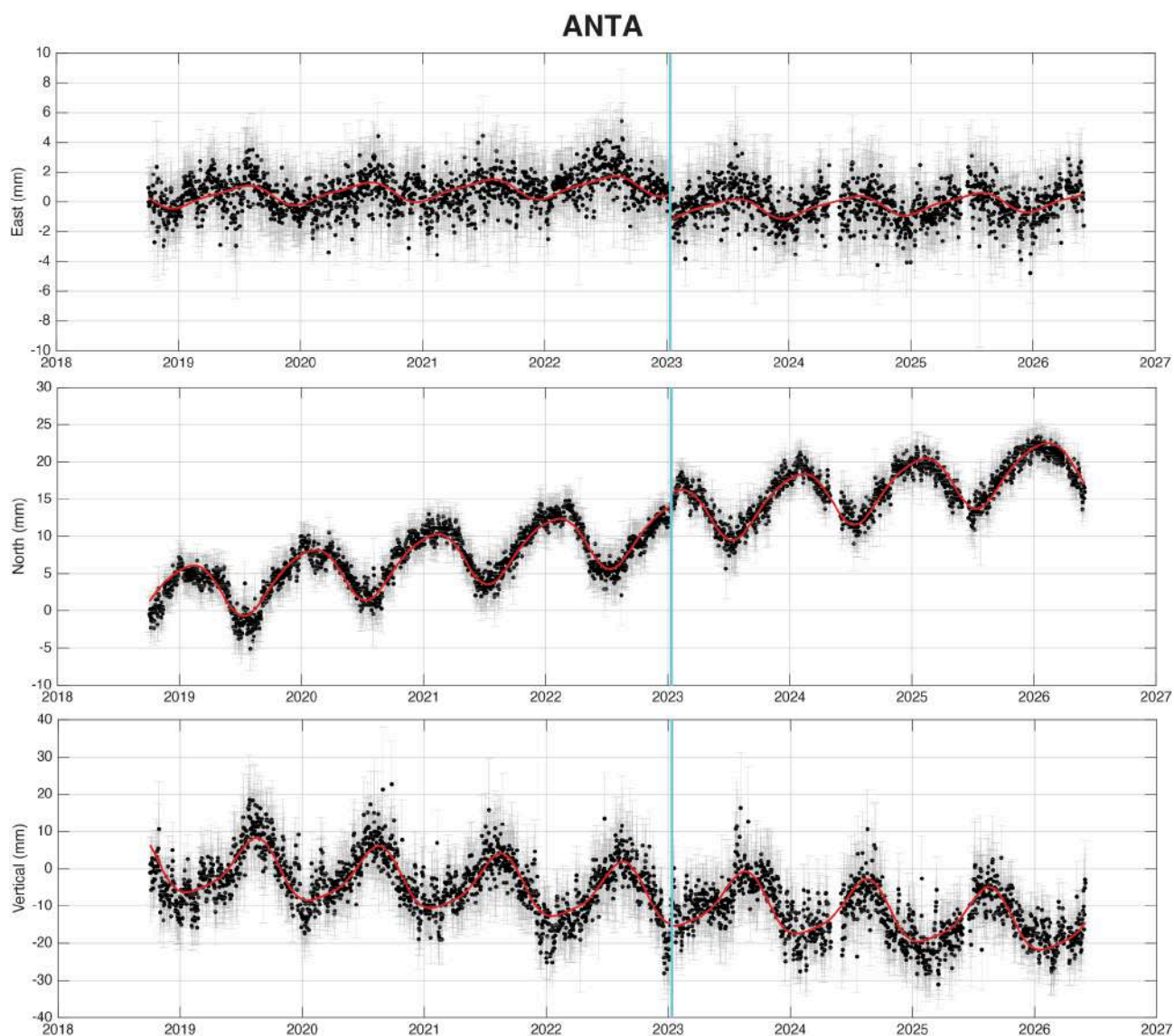


Figura B.4. Serie temporale di spostamento (punti neri) della stazione ANTA nel sistema di riferimento Eurasia-fisso per le componenti Est e Nord e in IGS20 per la componente verticale. Le linee grigie indicano le barre d'errore (1σ) per gli spostamenti e la linea rossa rappresenta il modello analitico atteso. La barra azzurra verticale indica la presenza di un offset di spostamento dovuto ad un cambio strumentale.

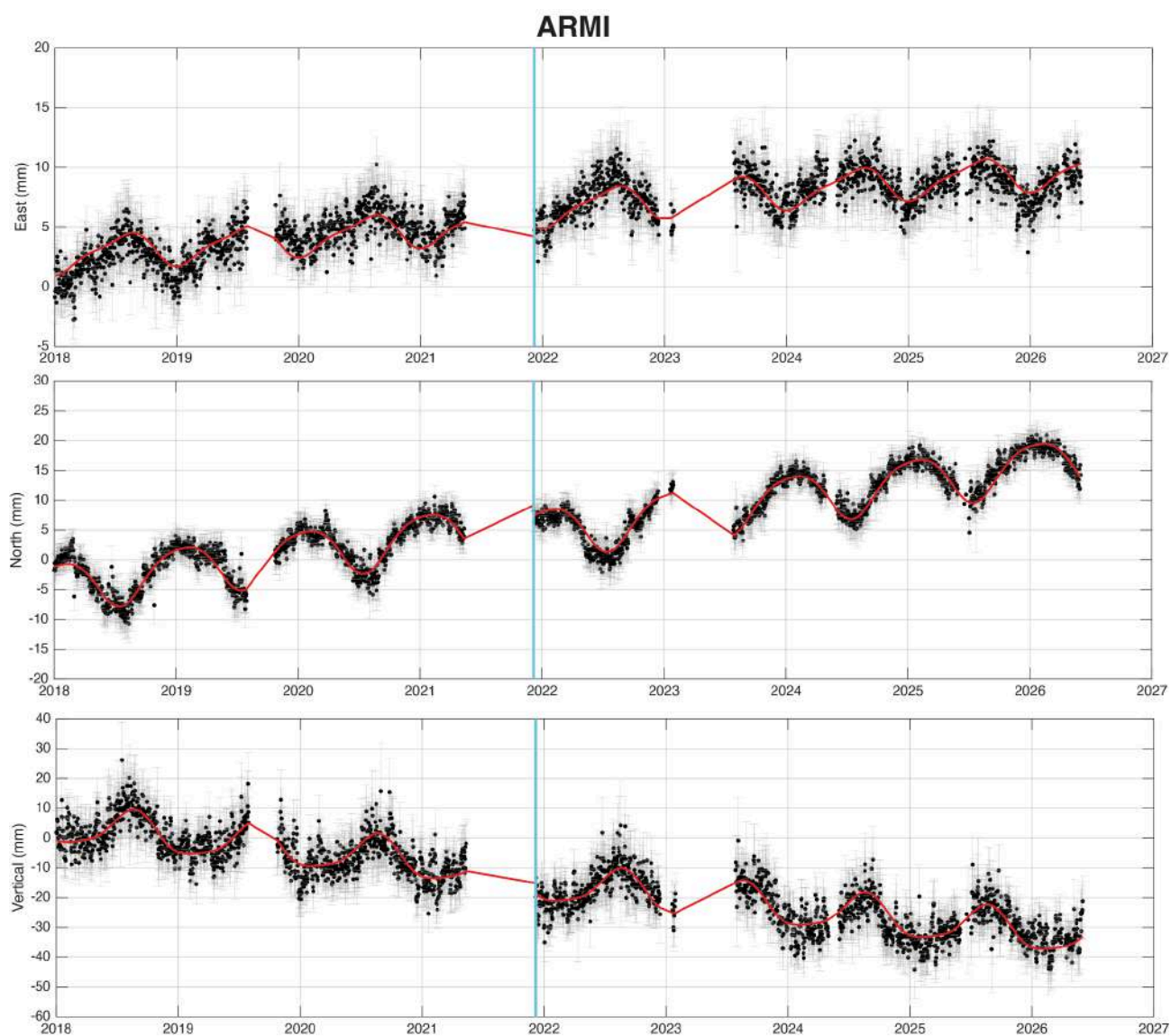


Figura B.5. Serie temporale di spostamento (punti neri) della stazione ARMI nel sistema di riferimento Eurasia-fisso per le componenti Est e Nord e in IGS20 per la componente verticale. Le linee grigie indicano le barre d'errore (1σ) per gli spostamenti e la linea rossa rappresenta il modello analitico atteso. La barra azzurra verticale indica la presenza di un offset di spostamento dovuto ad un cambio strumentale.

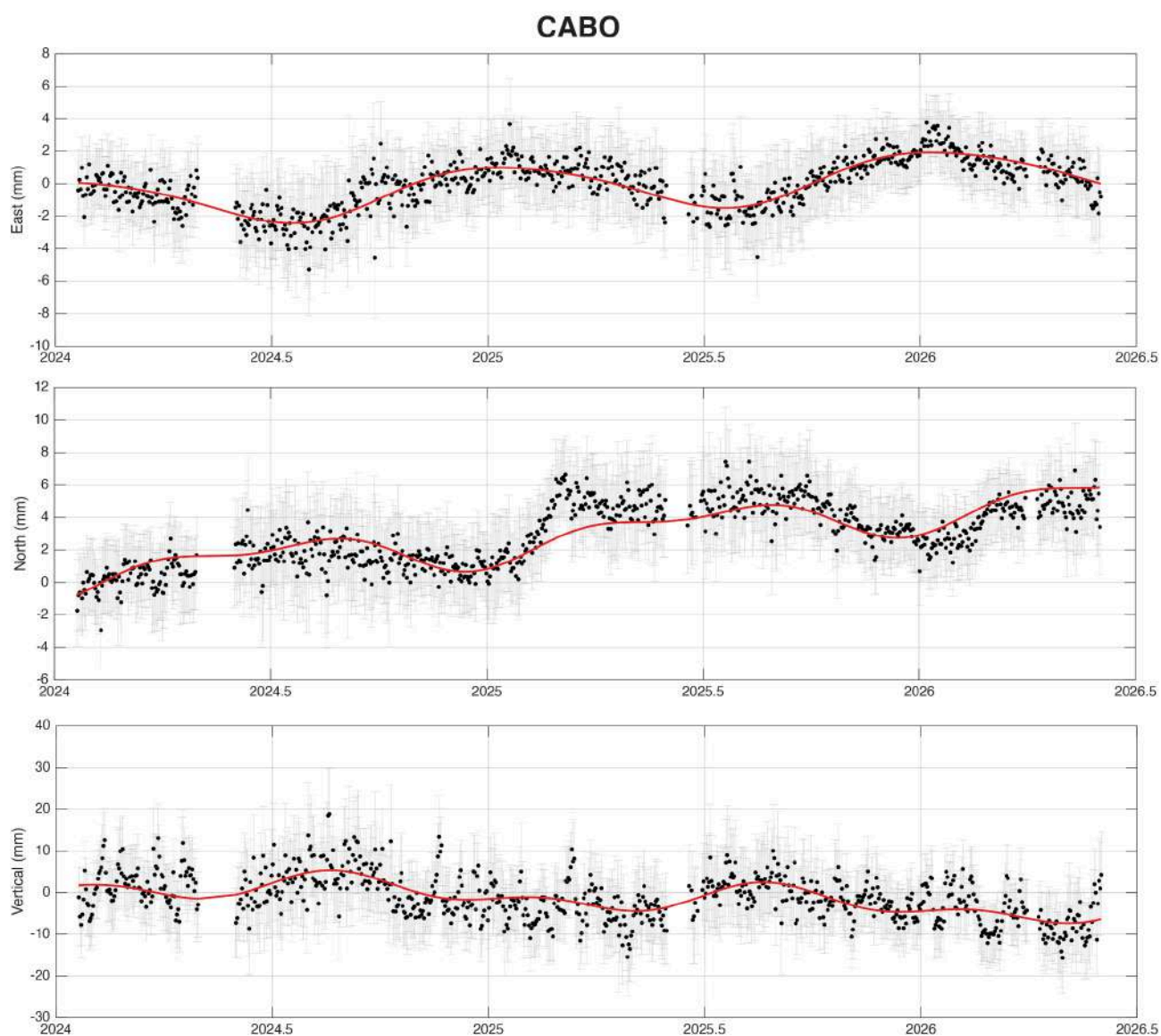


Figura B.6. Serie temporale di spostamento (punti neri) della stazione CABO nel sistema di riferimento Eurasia-fisso per le componenti Est e Nord e in IGS20 per la componente verticale. Le linee grigie indicano le barre d'errore (1σ) per gli spostamenti e la linea rossa rappresenta il modello analitico atteso.

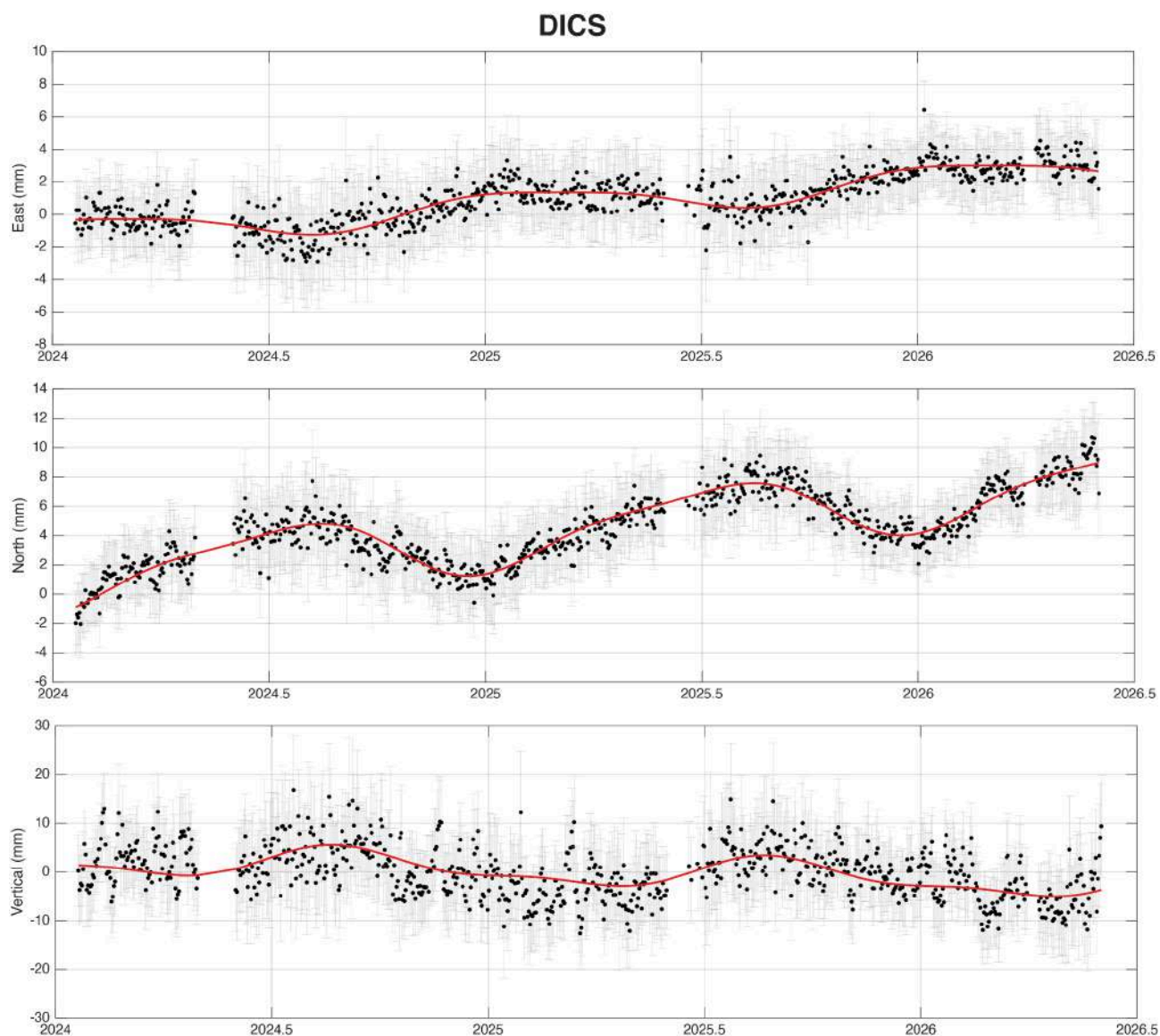


Figura B.7. Serie temporale di spostamento (punti neri) della stazione DICS nel sistema di riferimento Eurasia-fisso per le componenti Est e Nord e in IGS20 per la componente verticale. Le linee grigie indicano le barre d'errore (1σ) per gli spostamenti e la linea rossa rappresenta il modello analitico atteso.

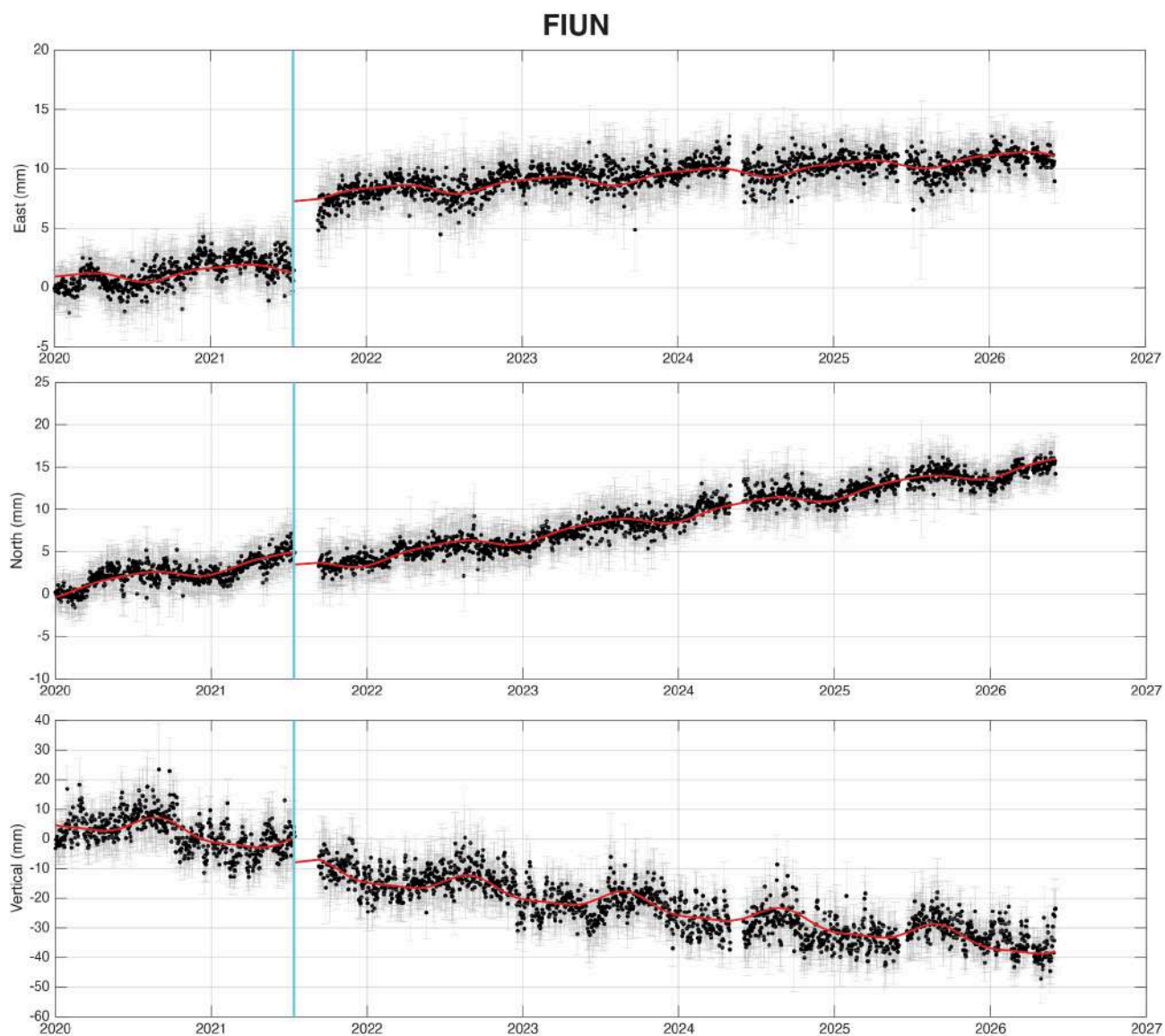


Figura B.8. Serie temporale di spostamento (punti neri) della stazione FIUN nel sistema di riferimento Eurasia-fisso per le componenti Est e Nord e in IGS20 per la componente verticale. Le linee grigie indicano le barre d'errore (1σ) per gli spostamenti e la linea rossa rappresenta il modello analitico atteso. La barra azzurra verticale indica la presenza di un offset di spostamento dovuto ad un cambio strumentale.

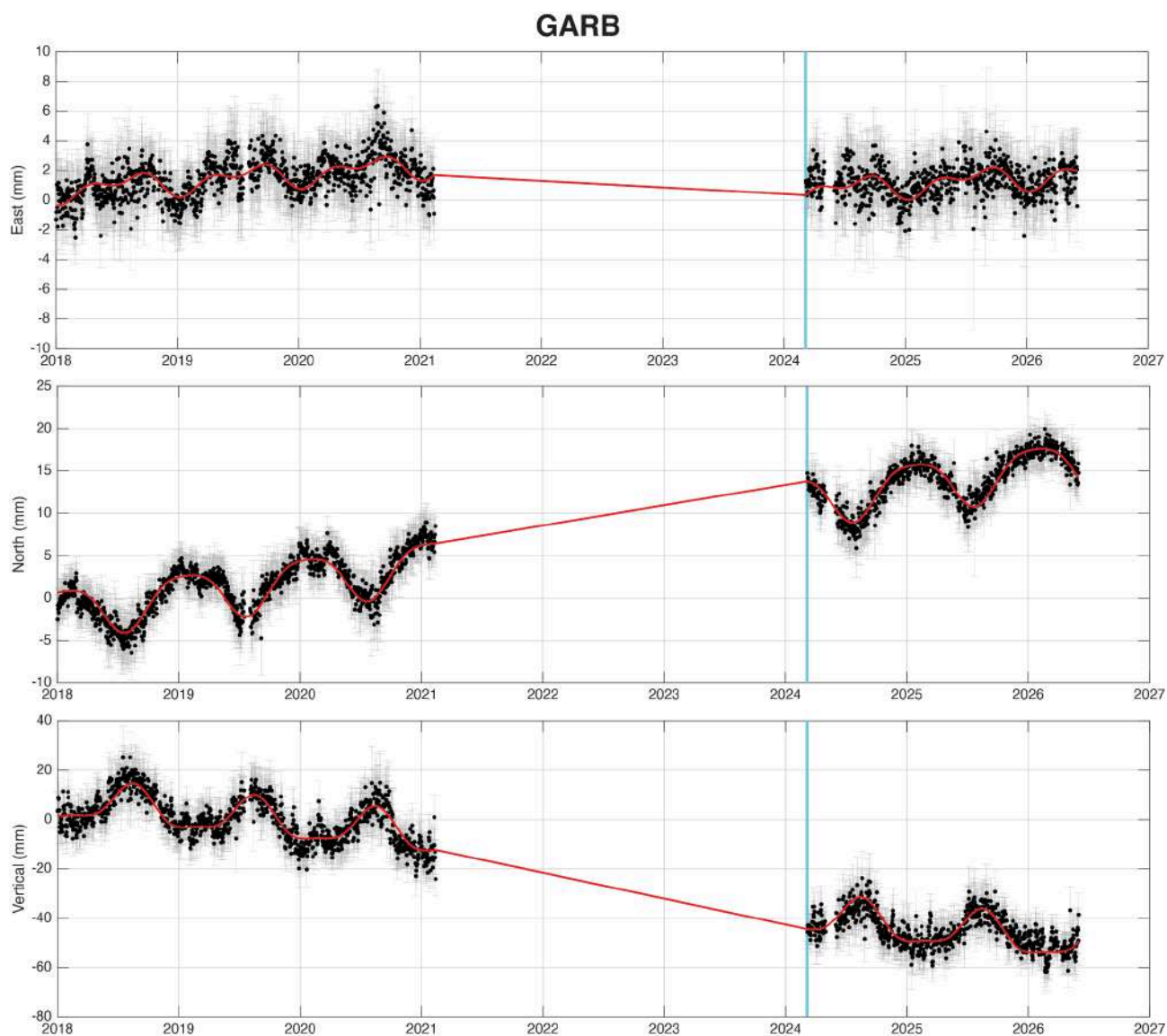


Figura B.9. Serie temporale di spostamento (punti neri) della stazione GARB nel sistema di riferimento Eurasia-fisso per le componenti Est e Nord e in IGS20 per la componente verticale. Le linee grigie indicano le barre d'errore (1σ) per gli spostamenti e la linea rossa rappresenta il modello analitico atteso. La barra azzurra verticale indica la presenza di un offset di spostamento dovuto ad un cambio strumentale.

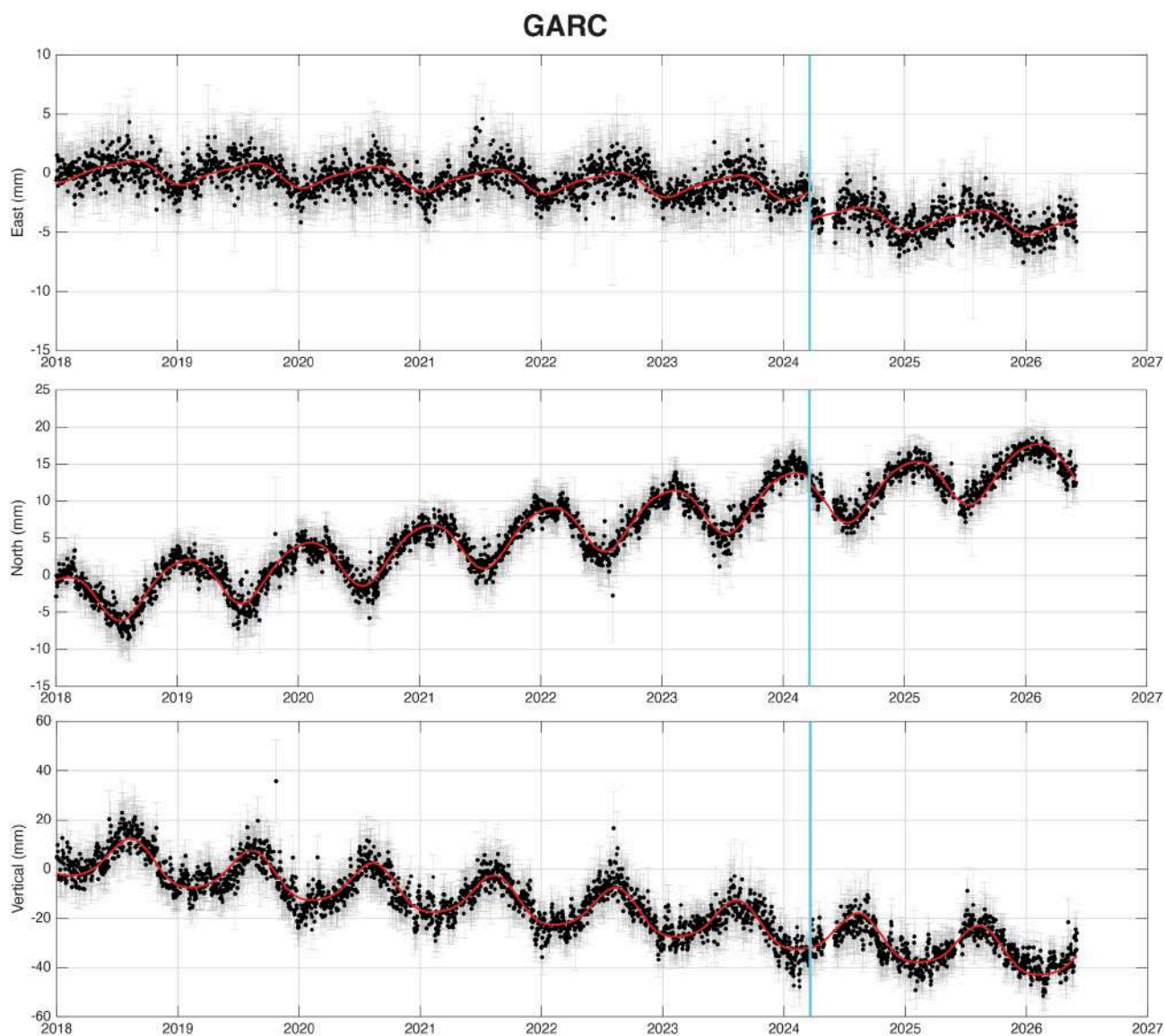


Figura B.10. Serie temporale di spostamento (punti neri) della stazione GARC nel sistema di riferimento Eurasia-fisso per le componenti Est e Nord e in IGS20 per la componente verticale. Le linee grigie indicano le barre d'errore (1σ) per gli spostamenti e la linea rossa rappresenta il modello analitico atteso. La barra azzurra verticale indica la presenza di un offset di spostamento dovuto ad un cambio strumentale.

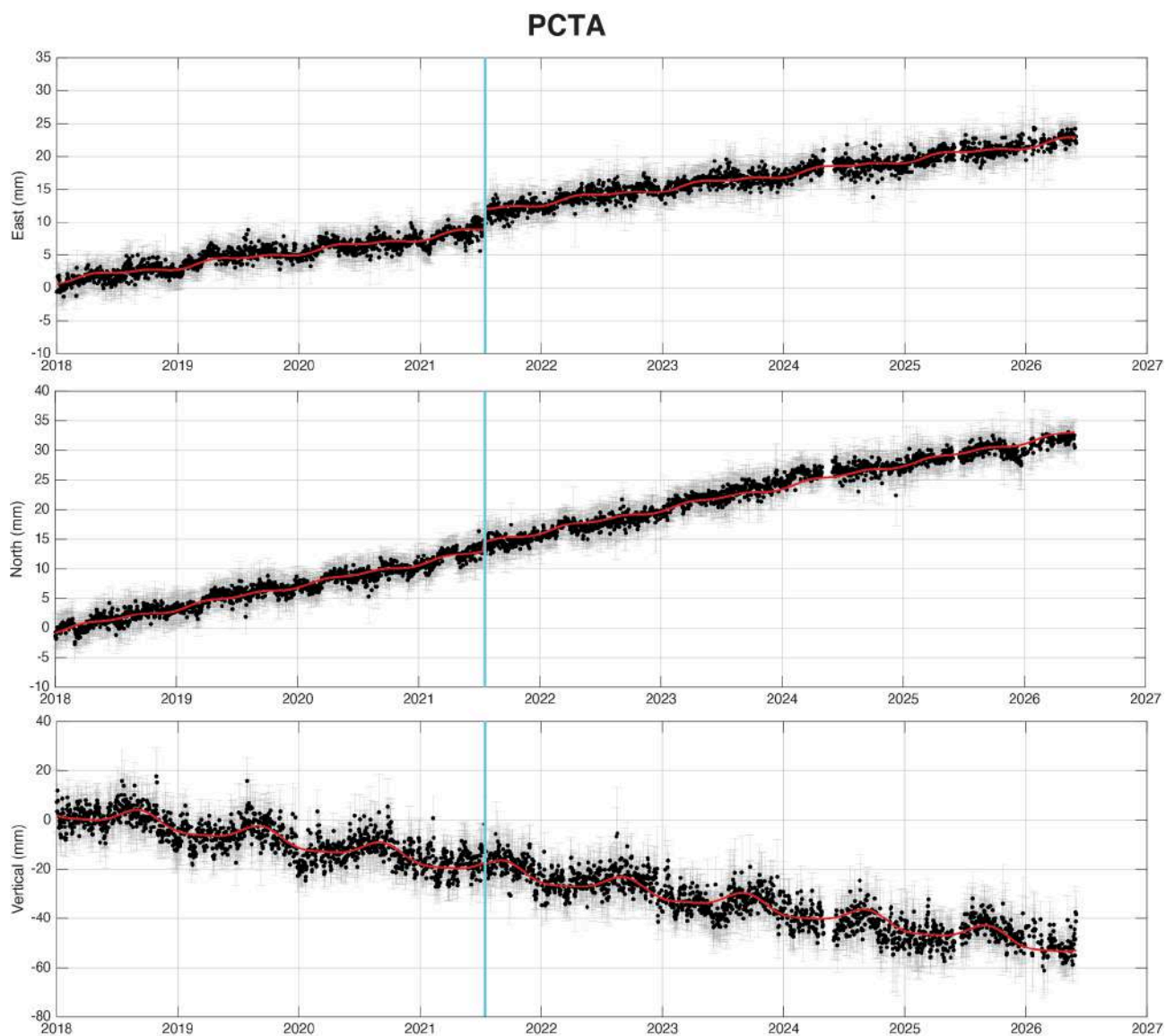


Figura B.11. Serie temporale di spostamento (punti neri) della stazione PCTA nel sistema di riferimento Eurasia-fisso per le componenti Est e Nord e in IGS20 per la componente verticale. Le linee grigie indicano le barre d'errore (1σ) per gli spostamenti e la linea rossa rappresenta il modello analitico atteso. La barra azzurra verticale indica la presenza di un offset di spostamento dovuto ad un cambio strumentale.

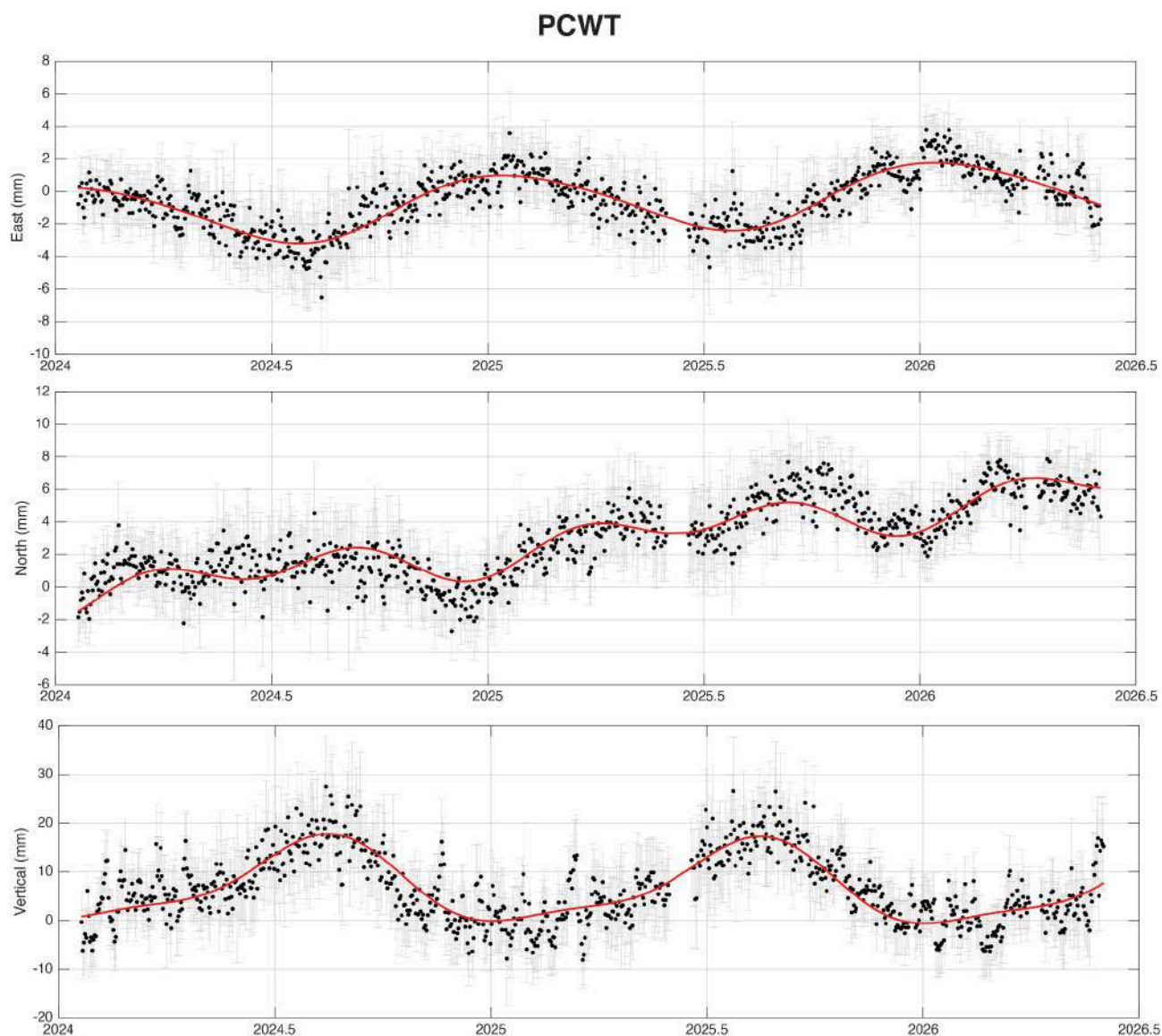


Figura B.12. Serie temporale di spostamento (punti neri) della stazione PCWT nel sistema di riferimento Eurasia-fisso per le componenti Est e Nord e in IGS20 per la componente verticale. Le linee grigie indicano le barre d'errore (1σ) per gli spostamenti e la linea rossa rappresenta il modello analitico atteso.

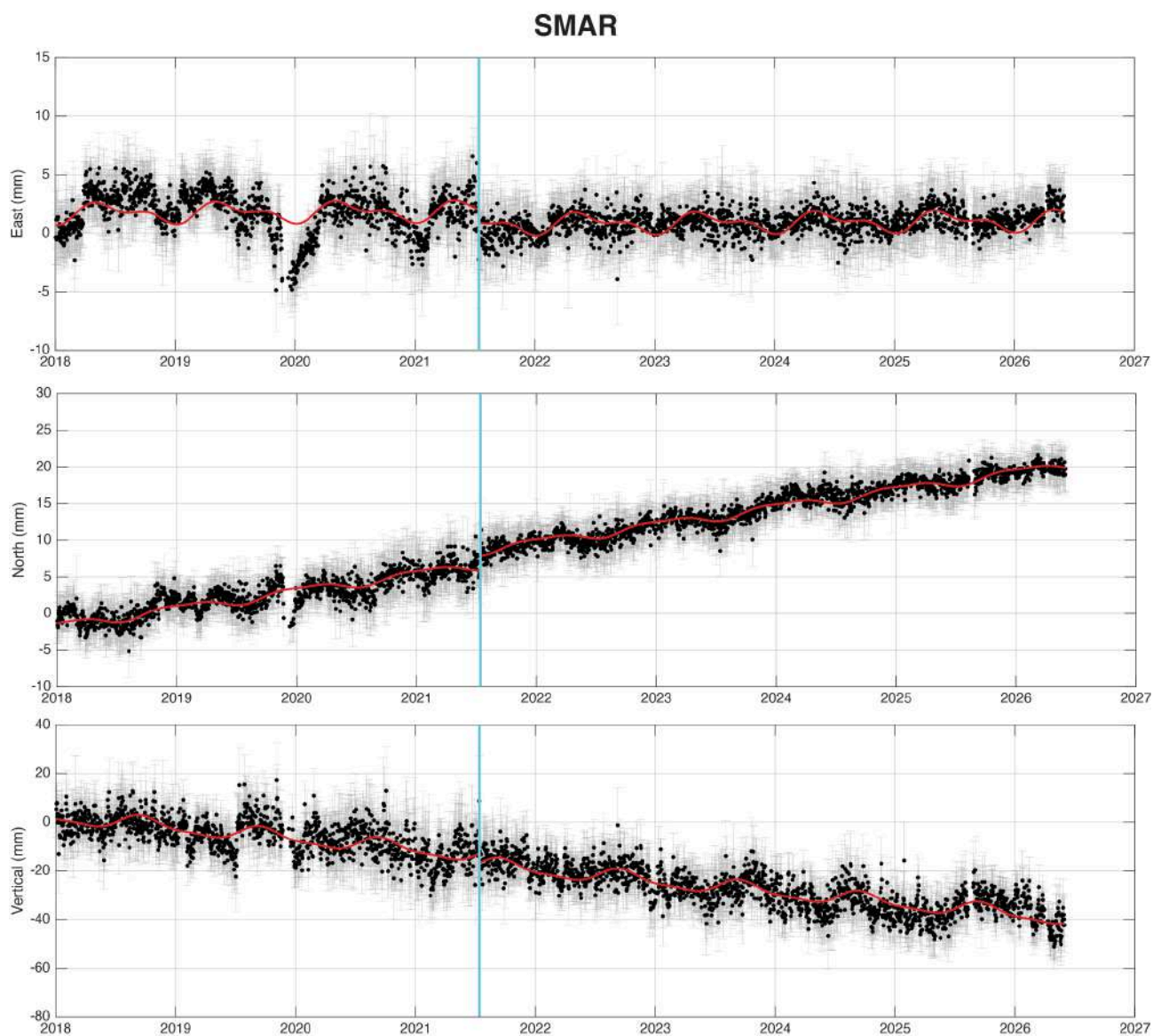


Figura B.13. Serie temporale di spostamento (punti neri) della stazione SMAR nel sistema di riferimento Eurasia-fisso per le componenti Est e Nord e in IGS20 per la componente verticale. Le linee grigie indicano le barre d'errore (1σ) per gli spostamenti e la linea rossa rappresenta il modello analitico atteso. La barra azzurra verticale indica la presenza di un offset di spostamento dovuto ad un cambio strumentale.

Appendice C Deriva nella temporizzazione del sistema DAS.

Tabella C.1 - Eventi utilizzati per il calcolo della deriva nella sincronizzazione dell'interrogatore DAS.

Tempo Origine	Lat °N	Lon °E	Profondità (km)	Mag	Tempo DAS misurato	Tempo DAS calcolato
2024-06-12T21:03:16	44.046	12.711	9.1	3.5	2024-06-12T21:03:16	2024-06-12T21:03:26
2024-07-15T03:27:11	44.146	11.73	53	2.7	2024-07-15T03:27:24	2024-07-15T03:27:26
2024-07-24T01:26:34	44.130	13.169	7.3	2.6	2024-07-24T01:26:49	2024-07-24T01:26:47
2024-08-24T11:34:43	44.190	11.567	21.8	3.2	2024-08-24T11:33:37	2024-08-24T11:34:56
2024-08-24T11:36:55	44.204	11.576	16	2.5	2024-08-24T11:35:49	2024-08-24T11:37:08
2024-08-25T23:45:42	44.209	11.545	24.5	3.8	2024-08-25T23:44:38	2024-08-25T23:45:56
2024-08-26T00:02:06	44.279	11.591	25.1	2.4	2024-08-26T00:01:02	2024-08-26T00:02:19
2024-10-01T21:12:59	43.988	11.834	32.6	2.1	2024-10-01T21:10:41	2024-10-01T21:13:13
2024-10-29T16:48:24	43.927	13.333	8.5	3.4	2024-10-29T16:45:09	2024-10-29T16:48:42
2024-11-28T14:10:21	44.687	12.627	0	2.1	2024-11-28T14:05:55	2024-11-28T14:10:26
2024-12-16T09:15:47	44.083	11.724	23.6	2.8	2024-12-16T09:11:30	2024-12-16T09:16:00
2024-12-16T09:16:42	44.055	11.709	24.1	3	2024-12-16T09:12:25	2024-12-16T09:16:55
2025-01-15T15:34:39	44.861	11.267	7.9	3.5	2025-01-15T15:34:39	2025-01-15T15:34:56
2025-04-05T23:50:57	44.174	11.524	21.4	2.4	2025-04-05T23:51:13	2025-04-05T23:51:11
2025-05-26T08:38:31	44.459	11.96	10	2.2	2025-05-26T08:38:36	2025-05-26T08:38:37

Appendice D

D.1 Metodo per la rilevazione automatica di segnali transienti

D.1.1 Identificazione di segnali coerenti tramite la funzione *Semblance*

La **Semblance** è una misura di coerenza multicanale utilizzata per stimare la velocità apparente (V_a) con cui un fronte d'onda attraversa un array lineare composto da N sensori equispaziati. A differenza di una semplice correlazione incrociata tra coppie di sensori, la Semblance valuta simultaneamente l'energia coerente su tutti i canali all'interno di una finestra temporale definita.

Il Modello Fisico

Consideriamo un array lineare di N sensori equispaziati posizionati lungo l'asse X , con coordinate x_i ($i = 1 \dots N$). Un fronte d'onda che viaggia con una velocità apparente V_a raggiungerà ogni sensore con un ritardo temporale relativo Δt_i rispetto al primo sensore (o a un punto di riferimento x_0):

$$\Delta t_i = \frac{x_i - x_0}{V_a} = (x_i - x_0) \cdot s \quad [A2.1]$$

Dove $s = \frac{1}{V_a}$ è la **lentezza apparente** (*slowness*) del segnale.

La verifica di un'ipotesi di lentezza s avviene applicando una correzione temporale ai segnali registrati, definita come $\Delta t_j(s) = (x_j - x_0)s$. Tale correzione ha lo scopo di allineare le tracce sulla base della lentezza di prova. Quando s corrisponde alla reale lentezza apparente, i picchi e le valli delle forme d'onda sui vari canali si sovrappongono in fase, portando al valore massimo di mutua coerenza.

Una efficiente metrica per quantificare la coerenza fra un insieme di M canali è la *Semblance*, definita come il rapporto tra l'energia della somma (*stack*) dei segnali e la somma delle energie dei singoli segnali. Per una data finestra temporale, la formula è:

$$S(s) = \frac{\sum_{i=1}^T \left(\sum_{j=1}^M u_j(t_i + \Delta t_j(s)) \right)^2}{M \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^M u_j^2(t_i)} \quad [A2.2]$$

dove T è il numero di campioni della finestra di analisi e u è l'ampiezza della j -esima traccia al tempo t_i . $\Delta t_j(s)$ è un ritardo assegnato alla j -esima traccia per una data lentezza di prova s , ai sensi dell'**equazione (A2.1)**. Nell'**equazione A2.2**, il termine al numeratore rappresenta l'energia della somma dei singoli canali, ciascuno ritardato (anticipato) per il termine $\Delta t_j(s)$. Se i segnali sono in fase (coerenti), la loro somma avviene in costruzione di fase, assumendo quindi valori massimi. Il termine al denominatore rappresenta l'energia totale associata agli M canali. La Semblance varia tra 0 e 1; valori prossimi a 1 indicano una coerenza perfetta per la corrispondente lentezza di prova; valori vicini a 0 indicano rumore incoerente o una lentezza di prova errata. Il rilevatore identifica gli eventi sismici valutando la coerenza delle forme d'onda per un determinato set di lentezze di prova, ripetendo la procedura su finestre temporali consecutive. Il risultato finale è visualizzato in una rappresentazione in cui il valore di Semblance è mappato in funzione del tempo e della lentezza, $S(s,t)$. Il valore di s che

massimizza la Semblance viene identificato come la velocità apparente del segnale in quella determinata finestra temporale.

Tabella D.1 Parametri per l'individuazione automatica di eventi

Filtro (Hz)	1-10
Finestra calcolo Kurtosis (s)	0.5
Finestra calcolo semblance (s)	2
Overlap Finestra calcolo semblance (s)	1
Slowness minima (s/km)	-5
Slowness massima (s/km)	5
Numero di slowness	51
DBScan - epsilon (s)	30
DBscan - Nmin	1

D.1.2 La funzione caratteristica

Una funzione caratteristica (CF) del segnale sismico è una trasformazione matematica applicata ai dati sismici grezzi per migliorare il rapporto segnale-rumore ed evidenziare caratteristiche salienti quali variazioni di ampiezza o frequenza. Queste funzioni, delle quali la più conosciuta è quella basata sul rapporto di medie del segnale calcolate su finestre temporali di breve e lunga durata (STA/LTA; Short-Term over Long-Term Average; Allen, 1978), trasformano segnali sismici complessi o rumorosi in una forma semplificata, più appropriata per il rilevamento automatico di eventi transienti (**Bormann, 2012**). . Nel presente caso, abbiamo utilizzato la funzione *Curtosi* (**Langet et al., 2014**), in quanto soddisfa entrambe le condizioni di semplicità di calcolo e robustezza nella stima di componenti non-stazionarie. La curtosi è il quarto momento statistico di una distribuzione (il primo e il secondo momento statistico sono rispettivamente la media e la varianza). Si tratta di una grandezza adimensionale che misura l'"acutezza" (valori positivi di curtosi) o la "piattezza" (valori negativi di curtosi), di una distribuzione rispetto a una distribuzione normale. La definizione standard della Curtosi K è

$$Kurt[x_1 \dots x_n] = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left[\frac{x_j - \mu}{\sigma} \right]^4 \quad [A2.3]$$

dove μ e σ sono rispettivamente la media e la deviazione standard della distribuzione.

Appendice E

E.1 Registrazioni alla rete P1 dei microsismi individuati dal sistema DAS

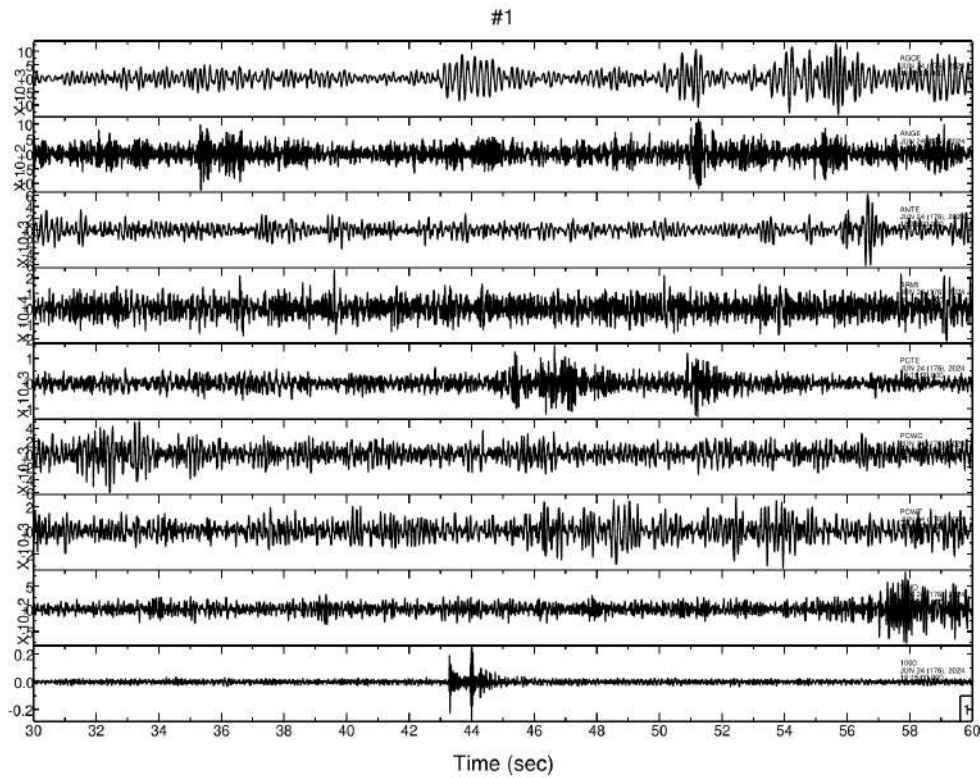


Figura E.1 Registrazioni dell'evento #1 di Tabella 7.3 alle componenti verticali delle 8 stazioni della rete P1 (tracce in alto) ed al canale 1000 del sistema DAS (ultima traccia in basso). L'evento non risulta visibile a nessuna delle tracce della rete sismica.

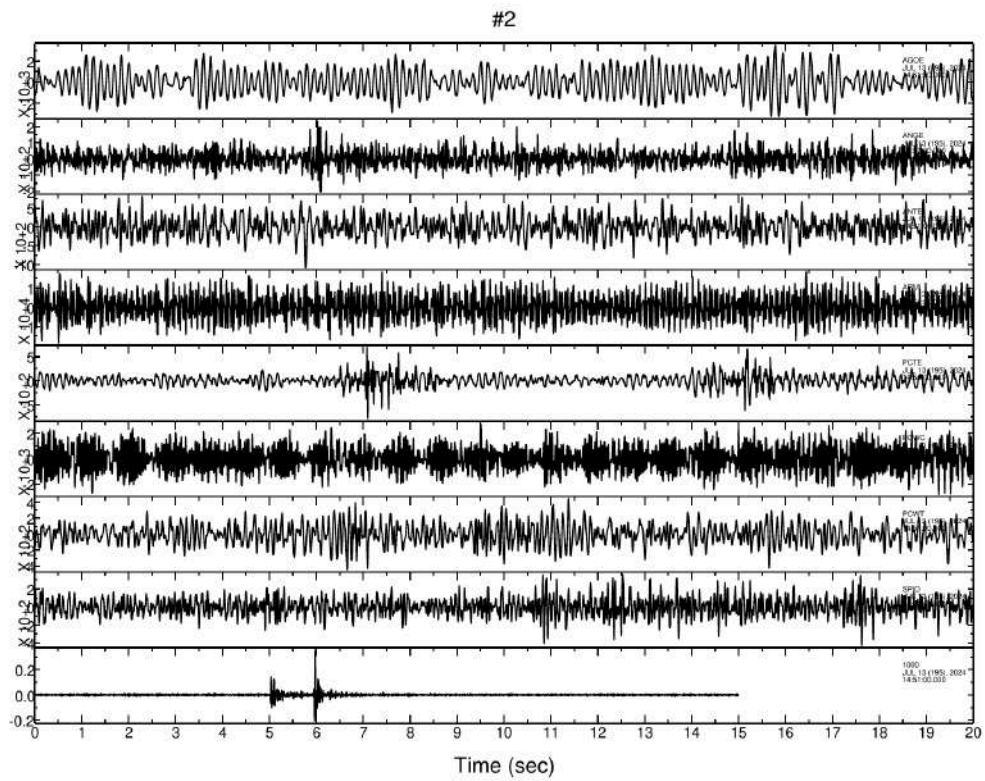


Figura E.2 RegISTRAZIONI dell'evento #2 di Tabella 7.3 alle componenti verticali delle 8 stazioni della rete P1 (tracce in alto) ed al canale 1000 del sistema DAS (ultima traccia in basso). L'evento probabilmente è visibile alla sola stazione PCTE

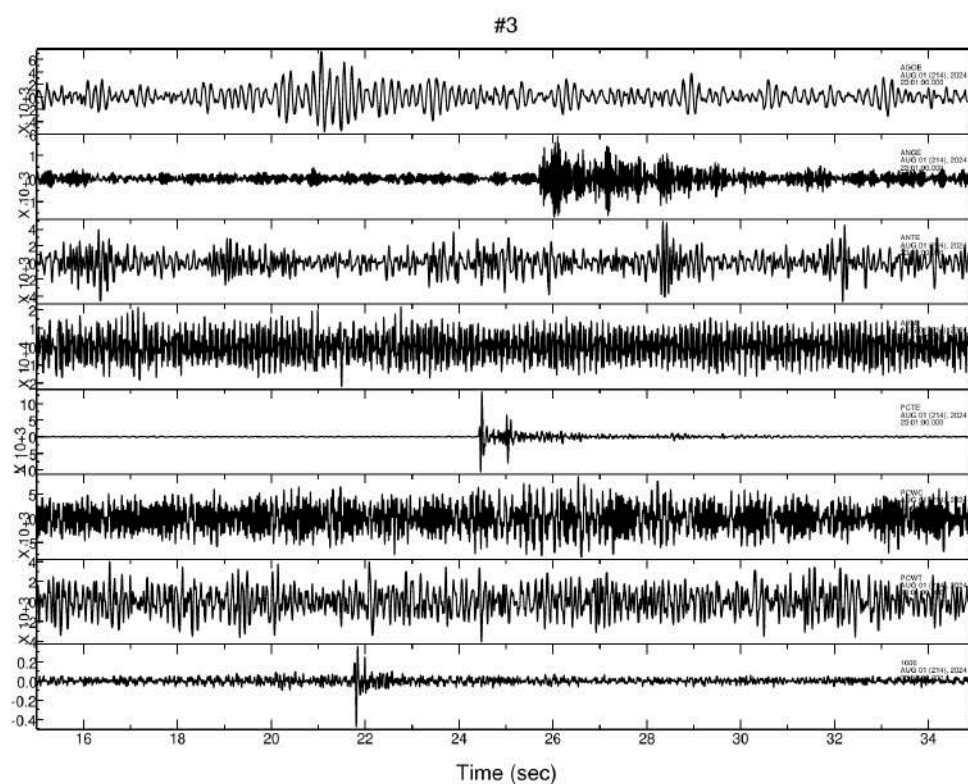


Figura E.3 Registrazioni dell'evento #3 di Tabella 7.3 alle componenti verticali delle 8 stazioni della rete P1 (tracce in alto) ed al canale 1000 del sistema DAS (ultima traccia in basso). L'evento risulta ben visibile alle stazioni ANGE e PCTE.

Bibliografia

1. Allen, R. V. (1978). Automatic earthquake recognition and timing from single traces. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 68, 1521-1532.
2. Altamimi, Z., Métivier, L., Rebischung, P., Collilieux, X., Chanard, K., & Barnéoud, J. (2023). ITRF2020 plate motion model. *Geophysical Research Letters*, 50, e2023GL106373. <https://doi.org/10.1029/2023GL106373>
3. Argnani, A. (1998). Structural elements of the Adriatic foreland and their relationships with the front of the Apennine fold-and-thrust belt. *Memorie della Società Geologica Italiana*, 52, 647-654
4. Bormann, P. (Ed.) (2012). *New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2)*, IASPEI, GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam; <http://nmsop.gfz-potsdam.de>; DOI: 10.2312/GFZ.NMSOP-2
5. 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>
6. Blewitt, G., and Lavallée, D. (2002). Effect of Annual Signals on Geodetic Velocity. *J. Geophys. Res.* 107 (B7), 9-1. doi:10.1029/2001JB000570
7. Bragato P.L., Alberto Tento; Local Magnitude in Northeastern Italy. *Bulletin of the Seismological Society of America* 2005; 95 (2): 579-591. doi: <https://doi.org/10.1785/0120040100>
8. Comunicato Eni-Snam (2024): Eni e Snam avviano Ravenna CCS, primo progetto di cattura e stoccaggio della CO₂ in Italia. San Donato Milanese, 3/9/2024. Disponibile al link: <https://www.snam.it/it/media/news-e-comunicati-stampa/comunicati-stampa/2024/eni-e-snam-avviano-ravenna-cs-in-italia.html> (Ultimo accesso: 22/10/2025).
9. Decreto Ministeriale del 26 gennaio 2023. Disponibile sul BUIG del 31 gennaio 2023 al link: <https://unmig.mase.gov.it/wp-content/uploads/67-1.pdf> (Ultimo accesso: 22/10/2025).
10. Ester, M., H.-P. Kriegel, J. Sander, and X. Xu (1996). A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise, *The Second International Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD'96)*, 226-231.
11. Langet, N., A. Maggi, A. Michelini and F. Brenguier (2014). Continuous Kurtosis-Based Migration for Seismic Event Detection and Location, with Application to Piton de la Fournaise Volcano, La Réunion. *Bulletin of the Seismological Society of America* 2014;; 104 (1): 229-246. doi: <https://doi.org/10.1785/0120130107>
12. Lomax A., Virieux J., Volant P., Berge-Thierry C. (2000) Probabilistic Earthquake Location in 3D and Layered Models. In: Thurber C.H., Rabinowitz N. (eds) *Advances in Seismic Event Location. Modern Approaches in Geophysics*, vol 18. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-015-9536-0_5
13. Lomax A., Michelini A., Curtis A. (2014) Earthquake Location, Direct, Global-Search Methods. In: Meyers R. (eds) *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-3-642-27737-5_150-2
14. MATLAB version: 9.13.0 (R2022b), Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc.; 2022.
15. McNamara, D., and R. Buland (2004). Ambient noise levels in the Continental United States, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 94, 1517-1527, doi: 10.1785/012003001
16. Peterson J.R. (1993): Observations and modeling of seismic background noise *Open-File Report 93-322*. <https://doi.org/10.3133/ofr93322>
17. Pezzo, G., Petracchini, L., Devoti, R., Maffucci, R., Anderlini, L., Antoncicchi, I., et al. (2020). Active fold-thrust belt to foreland transition in northern Adria, Italy, tracked by seismic reflection profiles and GPS offshore data. *Tectonics*, 39, e2020TC006425. <https://doi.org/10.1029/2020TC006425>
18. Relazione conclusiva DICAM (2024): Supervisione di campagna, controllo delle misure, certificazione di qualità, omogeneizzazione dei dati e calcolo della nuova rete di livellazione geometrica, di 250 Km lineari circa, opportunamente progettata per il monitoraggio della costa adriatica, tra le Valli di Comacchio e Cervia, durante l'esecuzione del progetto pilota Eni CCS.
19. Report Eni (2024): Eni a Ravenna - Report locale di sostenibilità. Disponibile al link: <https://www.eni.com/content/dam/enicom/documents/ita/sostenibilita/2024/local-report/Eni-Local-Report-Ravenna-2024.pdf> (Ultimo accesso: 22/10/2025).

20. Serpelloni, E., Cavaliere, A., Martelli, L., Pintori, F., Anderlini, L., Borghi, A., Randazzo, D., Bruni, S., Devoti, R., Perfetti, P., 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
21. Teatini, P., M. Ferronato, G. Gambolati, and M. Gonella (2006), Groundwater pumping and land subsidence in the Emilia- Romagna coastland, Italy: Modeling the past occurrence and the future trend, *Water Resour. Res.*, 42, W01406, doi:10.1029/2005WR004242.
22. Vannoli, P., Basili, R., & Valensise, G. (2004). New geomorphic evidence for anticlinal growth driven by blind-thrust faulting along the northern Marche coastal belt (central Italy). *Journal of Seismology*, 8(3), 297–312. <https://doi.org/10.1023/B:JOSE.0000038456.00574.e3>