

Concessione di Stoccaggio di Gas Naturale “Cornegliano Stoccaggio”

Monitoraggio sismico e delle deformazioni superficiali

Anno di esercizio 2026 – Prima relazione semestrale 2026.1

Struttura Preposta al Monitoraggio:

Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale
Centro di Ricerche Sismologiche (CRS) - OGS
Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente (IREA)
Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) – IREA-CNR

Sgonico, 31 luglio 2026

A cura di:

Mariangela Guidarelli¹, Ivana Zinno², Manuela Bonano², Claudio De Luca², Eduardo Rafael Diez Zaldivar¹, Riccardo Lanari², Andrea Magrin¹, Luca Moratto¹, Laura Peruzza¹, Matteo Picozzi¹, Nikolas Potleka¹, Marco Romanelli¹, Maria Adelaide Romano¹, Denis Sandron¹, Marco Santulin¹, Lavinia Tunini¹, Giovanni Zeni², David Zuliani¹.

¹OGS - Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale

Centro di Ricerche Sismologiche (CRS)

²IREA-CNR – Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente (IREA)

Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR)

La relazione può essere citata come:

Guidarelli M., Zinno I., Bonano M., De Luca C., Diez Zaldivar E.R., Lanari R., Magrin A., Moratto L., Peruzza L., Picozzi, M., Potleka N., Romanelli M., Romano M.A., Sandron D., Santulin M., Tunini L., Zeni G., Zuliani D., (2026) Concessione di stoccaggio di gas naturale "Cornegliano Stoccaggio". Monitoraggio sismico e delle deformazioni superficiali - Anno di esercizio 2026 – Prima relazione semestrale. Rapporto interno OGS-2026/xx, Trieste, (82 pp., <https://ricerca.ogs.it/handle/20.500.14083/53003>)

Coordinatore della Struttura Preposta al Monitoraggio:

Prof. Matteo Picozzi

Responsabile scientifico per l'OGS:

Dott.ssa Mariangela Guidarelli

Responsabile scientifico per l'IREA-CNR:

Dott.ssa Ing. Ivana Zinno

Visto e approvato:



MATTEO PICOZZI
22.09.2026 19:02:58 GMT+02:00

Per l'OGS

il Direttore del CRS

Prof. Matteo Picozzi

Per l'IREA-CNR

il Direttore dell'IREA-CNR

Dott. Ing. Francesco Soldovieri

FRANCESCO
SOLDOVIERI
23.09.2026
10:59:22
GMT+02:00



Sommario

<i>Elenco delle abbreviazioni</i>	2
<i>Indice delle figure</i>	3
<i>Indice delle tabelle</i>	5
<i>Introduzione</i>	7
1. MONITORAGGIO SISMICO	8
1.1. La Rete di Monitoraggio di Cornegliano Laudense	8
1.2. Operatività della rete sismica	14
1.3. Eventi rilevati dalla RMCL e attività di stoccaggio	16
2. MONITORAGGIO DELLE DEFORMAZIONI SUPERFICIALI	21
2.1. Elaborazione dei dati della stazione GNSS LODI	21
2.1.2. Risultati	24
2.2. Analisi interferometrica delle deformazioni del suolo relative al periodo 2015-2025 (dati SENTINEL-1)	35
2.2.1. Analisi SBAS Sentinel-1: orbite discendenti (periodo marzo 2015 – aprile 2026).....	37
2.2.2. Analisi SBAS Sentinel-1: orbite ascendenti (periodo marzo 2015 – aprile 2026).....	40
2.2.3. Analisi SBAS Sentinel-1: mappe delle componenti verticale ed Est-Ovest della deformazione superficiale 44	
2.2.4. Analisi SBAS Sentinel-1: uno zoom sull'area in deformazione in prossimità del sito di stoccaggio di Cornegliano Laudense	48
3. CONCLUSIONI	52
<i>Bibliografia</i>	54
<i>Appendice A – Disponibilità dei dati registrati dalla RMCL</i>	56
<i>Appendice B – Lista degli eventi sismici riconosciuti nell'intera area di rilevazione</i>	63
<i>Appendice B – Serie temporali della Rete GNSS LODI nel sistema di riferimento ITRF14</i>	66
<i>Appendice D - Statistica degli accessi al sito della Rete di Monitoraggio di Cornegliano Laudense</i>	74
<i>Appendice E – Stazione geodetica a basso costo LOZ1</i>	78

Elenco delle abbreviazioni

AE	Area Esterna di rilevazione della rete di monitoraggio
BSI	Bollettino Sismico Italiano
CPTI15	Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15)
CSI1.1	Catalogo della Sismicità Italiana (https://csi.rm.ingv.it/)
DBMI15	Database Macrosismico Italiano (https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/)
DE	Dominio Interno di rilevazione della rete di monitoraggio RMCL (MiSE-UNMIG, 2014)
DI	Dominio Esteso di rilevazione della rete di monitoraggio RMCL (MiSE-UNMIG, 2014)
DInSAR	Differential SAR Interferometry
DISS	Database delle Sorgenti Sismiche Italiane (https://diss.ingv.it/)
EMSC	European-Mediterranean Seismological Centre
GAMIT/GLOBK	suite di programmi sviluppato dal MIT per analizzare dati GPS, principalmente per studiare la deformazione della crosta terrestre
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
LOS	Line of sight
MiSE-UNMIG	Ministero per lo sviluppo economico - Ufficio nazionale minerario per gli idrocarburi e le georisorse
ML	Magnitudo locale
NHNM	New High Noise Model (McNamara and Buland, 2004)
NLNM	New Low Noise Model (McNamara and Buland, 2004)
PDF	Probability Density Function
PSD	Power Spectral Density
RMCL	Rete di Monitoraggio di Cornegliano Laudense
RSNC	Rete Sismica Nazionale Centralizzata (gestita da INGV)
RSNI	Regional Seismic network of Northwest Italy (gestita dall'Università di Genova)
SAR	Synthetic Aperture Radar
SBAS	Small BAseline Subset
SMINO	Sistema di monitoraggio terrestre dell'Italia Nord Orientale
SPIN	Servizio di Posizionamento Interregionale GNSS Piemonte-Lombardia

Indice delle figure

Figura 1. Mappa della RMCL. I triangoli indicano le stazioni della RMCL (in blu) e della Rete Sismica Nazionale Centralizzata (RSNC) dell'INGV (in verde) usate per integrare le rilevazioni. L'area gialla al centro indica la proiezione in superficie della parte più produttiva del serbatoio. Le linee rosse indicano i perimetri del Dominio Interno (DI, linea spessa) e del Dominio Esteso (DE, linea sottile) di rilevazione. La linea tratteggiata indica la distanza di 30 km dal sito di stoccaggio e definisce l'Area Esterna.	10
Figura 2. - Insieme delle stazioni sismometriche utilizzate dal sistema di monitoraggio sismico in cui è inserita la RMCL. Nell'area della Pianura Padana e nell'area Occidentale si riconoscono le stazioni di INGV e RSNI più vicine alla RMCL. Nell'area Orientale si distinguono invece le stazioni appartenenti alle reti gestite da OGS anche per conto delle Regioni Veneto e Friuli-Venezia Giulia, oltre alle stazioni della Provincia Autonoma di Trento. Il rettangolo punteggiato rappresenta l'area di riconoscimento dei terremoti regionali, indispensabile. Per evitare false identificazioni di eventi locali.....	14
Figura 3. Distribuzione spaziale degli eventi sismici rilevati dalla RMCL nel periodo 1/1/2017-30/4/2026, posti a distanza epicentrale ≤ 30 km dal sito di stoccaggio. Gli epicentri sono rappresentati dai cerchi con dimensione proporzionale alla magnitudo, oppure da quadrati laddove privi di tale valore. I triangoli colorati indicano le stazioni appartenenti alle diverse reti sismiche attive nell'area. Il cerchio nero tratteggiato, centrato sul sito di stoccaggio e con raggio pari a 30 km, delimita l'Area Esterna di rilevazione.	17
Figura 4. Dettaglio ingrandito della distribuzione spaziale di cui in Figura 3.....	18
Figura 5. Distribuzione 3D degli eventi sismici rilevati dalla RMCL nel periodo 1/1/2017-30/4/2026, posti a distanza epicentrale ≤ 30 km dal sito di stoccaggio. La dimensione dei simboli è proporzionale alla magnitudo di ciascun evento.	18
Figura 6. Dati medi orari relativi alle attività di stoccaggio del gas naturale presso il sito di Cornegiano Laudense. (a) Pressione media misurata al collettore dei pozzi. (b) Portata di gas (unità in milioni di metri cubi standard al giorno (Msm3/giorno) durante le attività dell'impianto; i valori in ingresso e in uscita sono rappresentati rispettivamente in verde e in rosso. (c) Volume complessivo del gas contenuto nel serbatoio naturale, normalizzato rispetto al volume massimo I valori assoluti del volume sono stati omessi in quanto informazioni commerciali sensibili e riservate.	20
Figura 7. Localizzazione delle stazioni GNSS della rete locale di LODI. Queste stazioni sono CREA (Crema), CREM (Cremona), MIL2 (Milano), PAVI (Pavia). La posizione della stazione MILA, rimasta attiva fino al 8/2/2019, è indistinguibile da quella di MIL2 o MIL3 in questo grafico.	22
Figura 8. Serie temporale di LODI (nel sistema di riferimento ETRF14) nelle tre componenti: Nord-Sud (grafico in alto), Est-Ovest (in centro), e verticale (in basso). Ogni punto sul grafico indica lo spostamento stimato giornaliero in mm, mentre la barra di errore rappresenta la dispersione delle 2880 stime giornaliere. La retta interpolante sui grafici fornisce una stima di velocità con il relativo errore, visibile anche in alto a sinistra (rate(mm/year)). Sono presenti, inoltre, il NRMS (errore quadratico medio normalizzato) e il WRMS (errore quadratico medio pesato).	27
Figura 9. Serie temporale della stazione CREA secondo il sistema di riferimento ETRF14. La linea tratteggiata rossa rappresenta il cambiamento di antenna avvenuto il giorno 28/9/2021. Dalla serie temporale è stato rimosso il salto stimato dovuto al cambio antenna. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di Figura 8.	28
Figura 10. Serie temporale della stazione CREM secondo il sistema di riferimento ETRF14. La linea tratteggiata rossa rappresenta il cambiamento di antenna avvenuto il giorno 15/10/2021. Dalla serie temporale è stato rimosso il salto stimato dovuto al cambio antenna. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di Figura 8.	29
Figura 11. Serie temporale della stazione MILA secondo il sistema di riferimento ETRF14. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di Figura 8.	30
Figura 12. Serie temporale della stazione MIL2 secondo il sistema di riferimento ETRF14. La linea tratteggiata rossa rappresenta il cambiamento di antenna avvenuto il giorno 26/1/2022. Dalla serie	

<i>temporale è stato rimosso il salto stimato dovuto al cambio antenna. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di Figura 8.</i>	31
Figura 13. Serie temporale della stazione MIL3 secondo il sistema di riferimento ETRF14. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di Figura 8.	32
Figura 14. Serie temporale della stazione PAVI secondo il sistema di riferimento ETRF14. La linea tratteggiata rossa rappresenta il cambiamento di antenna avvenuto il giorno 20/1/2022. Dalla serie temporale è stato rimosso il salto stimato dovuto al cambio antenna. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di Figura 8.	33
Figura 15. Residui delle serie temporali Nord-Sud (dN), Est-Ovest (dE), Verticale (dU) delle stazioni GNSS considerate nell'analisi. In colore sullo sfondo, i residui delle stazioni di riferimento: CREA, punti azzurri; CREM, punti arancioni; PAVI, punti rossi; MILA, MIL2 e MIL3 punti verdi (MILA, MIL2 e MIL3 sono state unite assieme per ricoprire l'intero arco temporale 2017-2025). In viola, in primo piano, la stazione LODI a cui è stato tolto il trend delle altre stazioni. In nero la media dei residui delle stazioni di riferimento. Per evidenziare graficamente l'anomalia di LODI abbiamo considerato come zero la media di LODI calcolata sul periodo precedente all'inizio delle attività di stoccaggio.	34
Figura 16. Distribuzione nel piano tempo/baseline-perpendicolare dei dati SAR S-1 acquisiti sull'area di interesse. Ogni crocetta rappresenta un'immagine SAR acquisita da orbite discendenti, ogni rombo un'immagine SAR ottenuta da orbite ascendenti.	35
Figura 17. Distribuzione nel piano tempo/baseline perpendicolare dei dati SAR S-1 acquisiti da orbite discendenti sull'area di interesse. I triangoli neri, rossi e blu rappresentano rispettivamente i dati S-1A, S-1B e S-1C. Si segnala l'assenza di acquisizioni S-1B a partire dal dicembre 2021 e la presenza di dati S-1C a partire da aprile 2025.	38
Figura 18. Mappa di velocità di deformazione in LOS, geocodificata ed espressa in cm/anno, sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area di interesse. L'immagine si riferisce alla elaborazione dei dati S-1 acquisiti da orbite discendenti nel periodo marzo 2015 – aprile 2026. La stellina rossa nel riquadro bianco indica il sito dell'impianto di stoccaggio. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni GNSS identificate sulla mappa tramite stelline nere, i grafici dei confronti tra le serie temporali di deformazione GNSS proiettate nella linea di vista del sensore radar (asterischi rossi) e quelle ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri). Il rettangolo bianco fa riferimento alla zona analizzata in dettaglio in Figura 16.	38
Figura 19. Zoom della mappa di velocità media di deformazione di Figura 18 in corrispondenza dell'area identificata dal rettangolo bianco, incentrato sull'area che comprende i comuni di Cornegliano Laudense e di Turano Lodigiano. La stellina con contorno rosso indica la posizione dell'impianto di stoccaggio (Cluster A). I grafici riportano l'andamento temporale dello spostamento superficiale in LOS per tre punti localizzati nei pressi di Cornegliano Laudense (P1, P2 e P3) e un punto localizzato nell'area di Turano Lodigiano (P4). L'immagine si riferisce alla elaborazione dei dati S-1 acquisiti da orbite discendenti nel periodo marzo 2015 - aprile 2026.	40
Figura 20. Distribuzione nel piano tempo/baseline perpendicolare dei dati SAR S-1 acquisiti da orbite ascendenti sull'area di interesse. I triangoli neri, rossi e blu rappresentano rispettivamente i dati S-1A, S-1B e S-1C. Si segnala l'assenza di acquisizioni S-1B a partire dal Dicembre 2021 e la presenza di dati S-1C a partire da aprile 2025.	41
Figura 21. Mappa di velocità di deformazione in LOS, geocodificata ed espressa in cm/anno, sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area di interesse. L'immagine si riferisce alla elaborazione dei dati S-1 acquisiti da orbite ascendenti nel periodo marzo 2015 – aprile 2026. La stellina rossa nel riquadro bianco indica il sito dell'impianto di stoccaggio. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni GNSS identificate sulla mappa tramite stelline nere, i grafici dei confronti tra le serie storiche di deformazione GNSS proiettate nella linea di vista del sensore radar (asterischi rossi) e quelle ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri). Il rettangolo bianco fa riferimento alla zona analizzata in dettaglio in Figura 21.	42
Figura 22. Zoom della mappa di velocità media di deformazione di Figura 21 in corrispondenza dell'area identificata dal rettangolo bianco, incentrato sull'area che comprende i comuni di Cornegliano Laudense e di Turano Lodigiano. La stellina con contorno rosso indica la posizione dell'impianto di stoccaggio (Cluster A). I grafici riportano l'andamento temporale dello spostamento superficiale in LOS per tre punti localizzati nei pressi di Cornegliano Laudense (P1, P2 e P3) e un punto localizzato nell'area di Turano Lodigiano (P4).	

<i>L'immagine si riferisce alla elaborazione dei dati S-1 acquisiti da orbite ascendenti nel periodo marzo 2015 – aprile 2026.</i>	43
Figura 23. Mappa della componente verticale della velocità di deformazione, geocodificata ed espressa in cm/anno, sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area di interesse. La stellina rossa nel riquadro bianco indica il sito dell'impianto di stoccaggio. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni GNSS identificate sulla mappa tramite stelline nere, i grafici dei confronti tra la componente verticale delle serie storiche di deformazione GNSS (asterischi rossi) e quella ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri). Il rettangolo bianco fa riferimento alla zona analizzata in dettaglio in Figura 25.	45
Figura 24. Mappa della componente Est-Ovest della velocità di deformazione, geocodificata ed espressa in cm/anno, sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area di interesse. La stellina rossa nel riquadro bianco indica il sito dell'impianto di stoccaggio. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni GNSS identificate sulla mappa tramite stelline nere, i grafici dei confronti tra le serie storiche di deformazione GNSS in direzione Est-Ovest (asterischi rossi) e quelle ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri). Il rettangolo bianco fa riferimento alla zona analizzata in dettaglio in Figura 26.	46
Figura 25. Zoom della mappa della componente verticale della velocità media di deformazione di Figura 23 in corrispondenza del riquadro bianco, incentrato sull'area che comprende i comuni di Cornegliano Laudense e di Turano Lodigiano. La stellina rossa indica la posizione dell'impianto di stoccaggio (Cluster A). I grafici riportano l'andamento temporale della componente verticale dello spostamento superficiale per tre punti localizzati in prossimità di Cornegliano Laudense (P1, P2 e P3) e un punto localizzato nell'area di Turano Lodigiano (P4).	47
Figura 26. Zoom della mappa della componente Est-Ovest della velocità media di deformazione Figura 24 in corrispondenza del riquadro bianco, incentrato sull'area che comprende i comuni di Cornegliano Laudense e di Turano Lodigiano. La stellina rossa indica la posizione dell'impianto di stoccaggio (Cluster A). I grafici riportano l'andamento temporale della componente Est-Ovest dello spostamento superficiale per tre punti localizzati in prossimità di Cornegliano Laudense (P1, P2 e P3) e un punto localizzato nell'area di Turano Lodigiano (P4).	48
Figura 27. Zoom della mappa della componente verticale della velocità di deformazione sull'area di Cornegliano Laudense situata in prossimità del sito di stoccaggio (la stellina bianca corrisponde al Cluster A). Sono inoltre mostrate le serie temporali della componente verticale dello spostamento superficiale di tutti i pixel evidenziati tramite i rettangoli colorati A-F sulla mappa di deformazione.	49
Figura 28. Zoom della mappa della componente Est-Ovest della velocità di deformazione sull'area di Cornegliano Laudense situata in prossimità del sito di stoccaggio (la stellina bianca corrisponde al Cluster A). Sono inoltre mostrate le serie temporali della componente Est-Ovest dello spostamento superficiale di tutti i pixel evidenziati tramite i rettangoli colorati A-F sulla mappa di deformazione.	50

Indice delle tabelle

Tabella 1. Elenco delle stazioni della RMCL. Informazioni dettagliate si trovano nelle singole schede di stazione riportate nell' Appendice B della relazione di consegna della rete (Priolo et al., 2017).	9
Tabella 2. Strumentazione sismologica installata presso le stazioni della RMCL.	10
Tabella 3. Stazioni sismometriche utilizzate a integrazione della RMCL per la localizzazione degli eventi. I codici di rete (NetCode) IV, GU e OX corrispondono rispettivamente alla Rete Sismica Nazionale Centralizzata gestita dall'INGV, alla Rete Sismica Regionale dell'Italia Nord-Occidentale gestita dall'Università di Genova e alla Rete Sismica dell'Italia Nord-Orientale gestita da OGS.	12
Tabella 4. Modello 1D utilizzato in questo studio per le localizzazioni degli eventi sismici. Le colonne indicano da sinistra a destra in successione: il numero di strato, la velocità V_p , la profondità dello strato e il valore di V_p/V_s .	13

Tabella 5. Principali interventi riguardanti la strumentazione sismica nel periodo 01/11/2025-30/04/2026.	15
Tabella 6. Coordinate ETRF2000 (2008.0) delle stazioni CREA, CREM, MILA, MIL2, MIL3, PAVI e del sito LODI. Tra settembre 2021 e gennaio 2022 le antenne e i ricevitori delle stazioni CREA, CREM, MIL2 e PAVI sono state sostituite. Qui sono riportati i modelli di antenna e ricevitore aggiornati, per i periodi precedenti si veda Priolo et al. (2021).	23
Tabella 7. Velocità dei siti della Rete GNSS LODI nei sistemi di riferimento ITRF14 e ETRF14. Le stime ottenute per la stazione LODI sono indicate in grassetto e colore rosso. I valori di velocità di MIL3 non sono da considerarsi attendibili per il momento, in quanto la serie temporale ha meno di un anno di dati. Si ricorda che la migliore accuratezza nella stima delle velocità che si può raggiungere, considerando serie temporali lunghe e monumentazione stabile, è di 0,2 mm/anno sulle componenti orizzontali e 0,5 mm/anno sulla verticale (Masson et al., 2019).	25
Tabella 8. Caratteristiche principali comuni ai due dataset SAR S-1 utilizzati.	36
Tabella 9. Caratteristiche principali relative a ciascuno dei due dataset SAR S-1 utilizzati.	37

Introduzione

Il presente documento descrive le attività effettuate nel periodo compreso tra l'1/11/2025 e il 30/4/2026 per l'esercizio del monitoraggio integrato, svolto da OGS e da IREA-CNR presso la concessione di stoccaggio gas naturale denominata "Cornegliano Stoccaggio". Esso costituisce il primo rapporto previsto per l'anno di esercizio 2026, in conformità con le disposizioni contrattuali. L'attività di monitoraggio integrato è commissionata da IGS S.p.A. a OGS e IREA-CNR con il Contratto del 30/1/2026, il quale disciplina l'esercizio dell'infrastruttura di monitoraggio sismico e la gestione del sistema di monitoraggio integrato. L'infrastruttura di monitoraggio sismico di Cornegliano Laudense (di seguito denominata Rete di Monitoraggio di Cornegliano Laudense – RMCL) e le procedure di acquisizione ed elaborazione dati corrispondono a quelle descritte nella relazione sulle attività iniziali datata 13/11/2018 (Priolo et al., 2018).

In sintesi, il presente rapporto è strutturato come segue:

- il **Capitolo 1** descrive il monitoraggio sismico: le caratteristiche della rete e le procedure di identificazione e localizzazione degli eventi sismici (Cap. 1.1); lo stato di funzionamento della rete e del sistema di acquisizione dati (Cap. 1.2); i risultati del monitoraggio sismico ottenuti per l'intero periodo di osservazione 1/1/2017-30/4/2026 con una descrizione della sismicità rilevata (Cap. 1.3).

- il **Capitolo 2** descrive il monitoraggio delle deformazioni superficiali. La prima parte del capitolo (Cap. 2.1) illustra la gestione della stazione GNSS OL01 e le elaborazioni svolte sui dati acquisiti dalla RETE LODI. La seconda parte (Cap. 2.2) descrive l'analisi interferometrica delle deformazioni del suolo completa fino alla data del 30/4/2026.

- il **Capitolo 3** contiene le Conclusioni.

Le Appendici, poste al termine del documento, riportano i seguenti contenuti:

- **Appendice A:** grafici dello stato di funzionamento della rete;
- **Appendice B:** catalogo della sismicità rilevata a partire dal 1/1/2017;
- **Appendice C:** serie temporali delle stazioni GNSS della RETE LODI secondo il sistema di riferimento ITRF08.
- **Appendice D:** statistiche delle visite al sito della Rete di Monitoraggio di Cornegliano Laudense.
- **Appendice E:** Stazione geodetica a basso costo LOZ1.

Come anticipato, il presente rapporto è stato redatto dai ricercatori e tecnologi di OGS e IREA-CNR. I Capitoli 1 e 2.1 sono stati redatti da OGS; il Capitolo 2.2 è stato curato da IREA-CNR mentre le conclusioni (Capitolo 3) sono state elaborate congiuntamente.

1. MONITORAGGIO SISMICO

1.1. La Rete di Monitoraggio di Cornegliano Laudense

La RMCL è composta da dieci stazioni sismometriche e da una stazione geodetica GNSS permanente. Le stazioni sono identificate con la sigla OL01-OL10, in conformità con il codice internazionale di registrazione della rete stessa (OL). La Tabella 1 ne riassume le informazioni principali, mentre la Figura 1 mostra la mappa con la posizione delle stazioni. La data ufficiale di inizio operatività della RMCL è il giorno 1/1/2017.

La RMCL è integrata da alcune stazioni appartenenti alle reti regionali e alla rete nazionale gestite da OGS, dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) e da altri enti, che ne completano il perimetro esterno a una distanza di alcune decine di chilometri nelle varie direzioni. I dati delle stazioni non gestite direttamente da OGS sono acquisiti in modalità off-line.

Tutte le stazioni sismometriche della RMCL sono dotate di un sismometro installato in pozzo, a una profondità media di 75 m, al fine di ridurre i disturbi di carattere antropico e il rumore sismico che si propaga nello strato superficiale del suolo. La Tabella 2 illustra la strumentazione in dotazione alla RMCL. I dati sono acquisiti con una frequenza di campionamento pari a 200 Hz per i sismometri e a 100 Hz per gli accelerometri. Tutte le stazioni sono dotate di apparati di teletrasmissione dei dati e di antenne GPS per la sincronizzazione precisa del tempo. I dati acquisiti dalle stazioni vengono inviati ai centri di acquisizione presso le sedi OGS di Sgonico (Trieste) e Udine.

I dati sismometrici così raccolti sono archiviati in tempo reale in formato mseed sui dischi dei server dedicati all'acquisizione e successivamente memorizzati in modo permanente su un'unità di archiviazione di rete (NAS QNAP). Tale unità ha una capacità complessiva di circa 50 TB ed è montata direttamente come *file system* dai sistemi di acquisizione ed elaborazione. La rete RMCL accumula approssimativamente 1.2 GB di dati al giorno, pari a circa 0.5 TB all'anno. Per garantire la continuità operativa e ridurre i tempi di ripristino da inizio 2026 è stato attivato un flusso di dati parallelo dalle stazioni della rete ai due server OGS, dislocati rispettivamente presso la sede di Trieste e la sede di Udine. Inoltre, è stato implementato un nuovo sistema di backup che collega le unità di archiviazione delle infrastrutture delle due sedi. Questa architettura incrementa la resilienza e la sicurezza dei dati, fornendo una replica geograficamente dislocata a tutela da eventuali guasti o sinistri locali.

A seguito del trasferimento dell'intero volume dei dati residente sui sistemi QNAP a Trieste, i processi sono passati alla modalità di mantenimento; il sistema esegue in background esclusivamente le sincronizzazioni

periodiche di allineamento per la gestione dei delta temporali (ovvero i soli dati modificati o aggiunti di recente).

Tutte le informazioni relative ai siti e alla strumentazione installata sono inoltre caricate nel database di gestione dei dati sismologici strumentali di OGS. Il precedente portale OASIS (oasis.crs.inogs.it), descritto in Priolo et al. (2012; 2015a), non è più operativo e sta per essere sostituito da una nuova infrastruttura per il download dei dati. Quest'ultima prevede un'interfaccia web attraverso la quale è possibile effettuare la richiesta e il successivo download dei dati previa autenticazione tramite token. Allo stato attuale, tale interfaccia è in fase di completamento e non ancora pienamente attiva.

CODICE	LAT	LON	QUOTA (m s.l.m.)	NOME
OL01	45.291	9.464	72	Cornegliano Laudense (Cluster A)
OL02	45.266	9.485	71	Massalengo
OL03	45.266	9.453	70	Cascina Castagna
OL04	45.290	9.435	78	Cascina Taietta
OL05	45.293	9.526	75	Cascina Caviglio
OL06	45.309	9.464	77	Cascina Bracca
OL07	45.291	9.325	77	Gugnano
OL08	45.362	9.539	75	Dovera
OL09	45.170	9.438	70	Miradolo
OL10	45.274	9.604	67	Cavenago d'Adda

Tabella 1. Elenco delle stazioni della RMCL. Informazioni dettagliate si trovano nelle singole schede di stazione riportate nell'Appendice B della relazione di consegna della rete (Priolo et al., 2017).

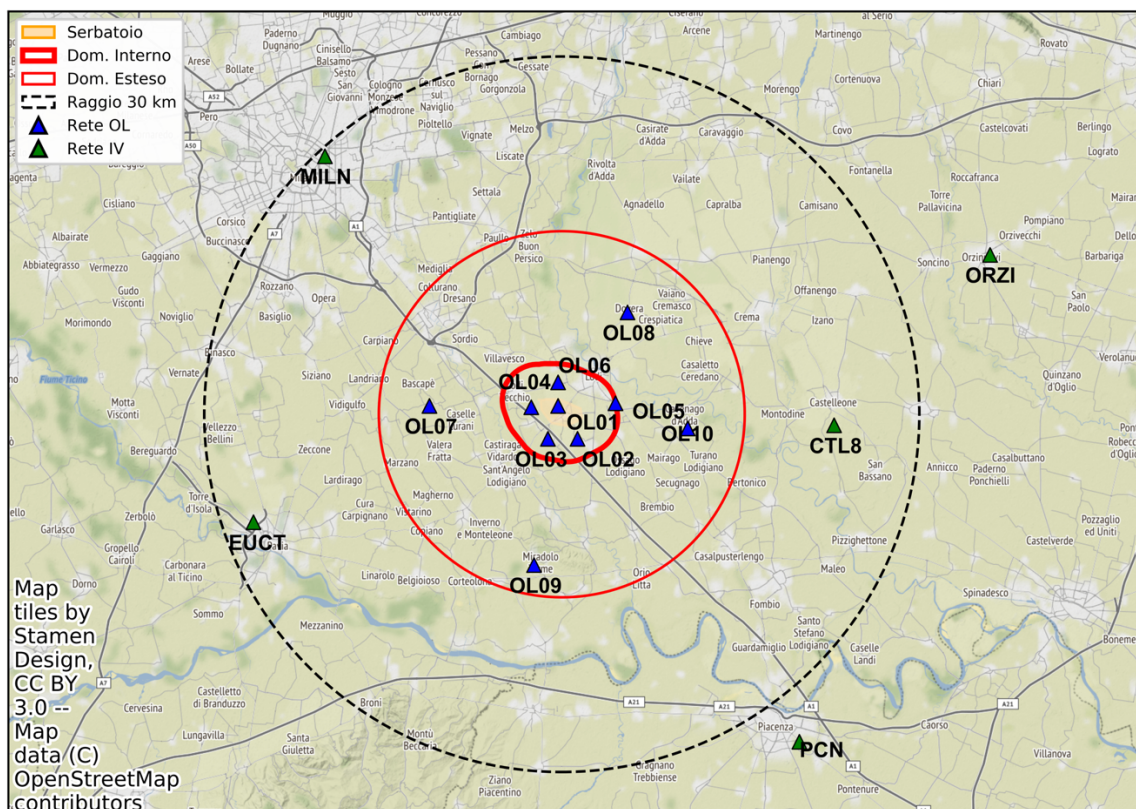


Figura 1. Mappa della RMCL. I triangoli indicano le stazioni della RMCL (in blu) e della Rete Sismica Nazionale Centralizzata (RSNC) dell'INGV (in verde) usate per integrare le rilevazioni. L'area gialla al centro indica la proiezione in superficie della parte più produttiva del serbatoio. Le linee rosse indicano i perimetri del Dominio Interno (DI, linea spessa) e del Dominio Esteso (DE, linea sottile) di rilevazione. La linea tratteggiata indica la distanza di 30 km dal sito di stoccaggio e definisce l'Area Esterna.

Acquisitore: Guralp-Minimus Caratteristiche: 6 canali, 24 bit		Accelerometro: Guralp-Fortis Componenti: 3 Fondo scala: ± 2.0 g Banda: DC-200 Hz
Sismometro da pozzo: Guralp-Radian Componenti: 3 Sensibilità: 2000 V/m/s Banda: 0.00833-200 Hz (120-0.05 s)		

Tabella 2. Strumentazione sismologica installata presso le stazioni della RMCL.

Al fine di ottimizzare la rilevazione e la localizzazione degli eventi sismici locali, le stazioni della RMCL sono integrate da alcune stazioni della Rete Sismica Nazionale Centralizzata (RSNC, codice IV), gestita da INGV, e della Rete Sismica Regionale dell'Italia Nord-occidentale (RSNI), afferente al laboratorio di sismologia dell'Università di Genova (Tabella 3). I dati di tali stazioni sono acquisiti in modalità off-line e, pertanto, non concorrono direttamente al sistema di localizzazione in tempo reale. Inoltre, per discriminare con maggiore efficacia gli eventi lontani - sebbene di scarso interesse per l'area della concessione di stoccaggio - vengono utilizzate numerose stazioni appartenenti ad altre reti attive nel Nord Italia, quali la Rete Sismica dell'Italia Nord-Orientale (SMINO, codice OX), gestita da OGS anche per conto delle Regioni Veneto e Friuli-Venezia Giulia, e la Rete Sismica del Trentino (codice ST) della Provincia Autonoma di Trento.

Per il monitoraggio della sismicità di interesse per lo stoccaggio di Cornegliano Laudense sono state individuate due aree di riferimento che corrispondono ai domini di rilevazione indicati dagli ILG del MASE (MiSE-UNMIG, 2014). Il Dominio Interno (DI) circonda il serbatoio fino a una distanza di 3 km, mentre il Dominio Esteso (DE) si estende fino a 15 km dal perimetro esterno del serbatoio stesso. Le aree corrispondenti in superficie ai due domini sono evidenziate con linee rosse in Figura 1.

Le procedure di elaborazione dei dati di basso livello (fasi di acquisizione dei dati dalle stazioni), di archiviazione dei file dei dati e di elaborazione per il riconoscimento automatico in tempo quasi-reale (*real-time*) della sismicità sono già state descritte nel rapporto di consegna della rete (Priolo et al., 2017). Di seguito viene delineato brevemente lo svolgimento dell'analisi dei dati; il dettaglio completo delle procedure e delle operazioni è riportato in Garbin e Priolo (2013) e Priolo et al. (2015b).

Le procedure di acquisizione, elaborazione e analisi dei dati sono basate sul sistema software Antelope®, sviluppato da BRTT, e integrate da procedure e funzioni interne sviluppate dai ricercatori e tecnologi di OGS.

Code	Name	Latitude	Longitude	Altitude(m)	Net Code
BALD	Monte Baldo (VR)	45.6830	10.8187	1911	OX
BOB	Bobbio (PC)	44.7679	9.4478	910	IV
CAPR	Capriolo (BS)	45.6372	9.9345	215	IV
CTL8	Castelleone (CR)	45.2763	9.7622	60	IV
EUCT	Pavia	46.1516	12.3630	598	IV
GORR	Gorreto (GE)	44.6071	9.2926	572	GU
GRAM	Graiana (PR)	44.4904	10.065	844	GU
MARN	Marana (VI)	45.6378	11.2099	785	OX
MERA	Merate (LC)	45.7054	9.4291	338	IV
MDI	Monte di Nese (BG)	45.7697	9.7160	954	IV
MILN	Milano	45.4803	9.2321	125	IV
MONC	Moncucco Torinese (AT)	45.0739	7.9271	480	IV
ORZI	Orzinuovi (BS)	45.4056	9.9307	83	IV
PCN	Piacenza	45.0353	9.7247	55	IV
PRMA	Parma	44.7637	10.3131	78	IV
QUIN	Quinzano d'Oglio (BS)	45.2982	10.0337	121	OX
ROTM	Rocchetta Tanaro (AT)	44.8493	8.3523	186	GU
SARZ	Sarezzano (AL)	44.8673	8.9136	266	IV
SATI	Passo dei Salati (AO)	45.8754	7.8685	2935	GU
TRAV	Traversella (TO)	45.5122	7.7461	973	GU
VARA	Monte Varagna (TN)	45.8260	10.8965	1735	OX
VARE	Varese (VA)	45.8677	8.7700	1219	IV

Tabella 3. Stazioni sismometriche utilizzate a integrazione della RMCL per la localizzazione degli eventi. I codici di rete (NetCode) IV, GU e OX corrispondono rispettivamente alla Rete Sismica Nazionale Centralizzata gestita dall'INGV, alla Rete Sismica Regionale dell'Italia Nord-Occidentale gestita dall'Università di Genova e alla Rete Sismica dell'Italia Nord-Orientale gestita da OGS.

Il sistema di elaborazione si divide in due parti:

- **real-time:** la parte di elaborazione che comprende il riconoscimento e la localizzazione automatica degli eventi sismici, con eventuale notifica di eventi locali al personale di reperibilità;
- **off-line:** la componente che comprende la rielaborazione di tutti i dati mediante controllo manuale, effettuata con cadenza periodica o, in caso di evento locale, nelle ore successive al suo verificarsi.

La rilevazione di un evento sismico avviene, per entrambi i rami di elaborazione, attraverso le seguenti operazioni standard:

- **detezione (detection):** operazione con cui la registrazione viene analizzata per riconoscere e marcare la presenza di anomalie di ampiezza del segnale (definite, in terminologia tecnica, *trigger*) rispetto al rumore di fondo. Questa operazione viene effettuata in base a criteri predeterminati per tutte le tracce acquisite dal sistema;
- **associazione:** operazione con cui un evento viene classificato come tale sulla base della rilevazione sincrona di *trigger* da parte di più stazioni. L'associatore valuta questa coincidenza temporale per una serie di localizzazioni di prova all'interno di un volume ben definito e delimitato in superficie dall'area di interesse; se una o più di queste superano i test di attendibilità, l'algoritmo conferma la soluzione ottimale.

Le operazioni svolte dai due rami di elaborazione si differenziano in funzione dei rispettivi obiettivi. Il sistema *real-time*, in caso di evento con magnitudo superiore a una soglia prestabilita, esegue le procedure di notifica (invio di un messaggio di allerta al personale reperibile e aggiornamento della tabella degli eventi in tempo reale sul sito web); il ramo *off-line* prosegue invece con operazioni mirate a qualificare in modo più accurato gli eventi rilevati. Per questo motivo, i due rami di elaborazione utilizzano configurazioni distinte.

Per il ramo *off-line* l'obiettivo è identificare la microsismicità e, di conseguenza, rilevare tutti gli eventi sismici nell'area studio, nei limiti della capacità di rilevazione della rete. È in questa fase che vengono integrate nel sistema le stazioni acquisite da altri enti e non disponibili in tempo reale. Gli strumenti di elaborazione vengono configurati per consentire l'identificazione dei segnali più deboli sfruttando al limite la sensibilità della rete; ciò, tuttavia, aumenta sensibilmente il carico computazionale e la rilevazione di falsi eventi a causa del ridotto numero di trigger richiesti. Per questo motivo, a valle delle operazioni di detezione e associazione, è necessario l'intervento di un sismologo che riconosca gli eventi reali e li discrimini da quelli falsi. Questa operazione prende il nome di *tagging*. In pratica, in questa fase gli eventi di interesse per il monitoraggio sismico di Cornegliano Laudense vengono marcati in modo permanente nel sistema. Per i soli eventi marcati vengono effettuate le seguenti operazioni specifiche:

- estrazione delle forme d'onda relative all'evento per tutte le stazioni;

- *picking* manuale, ovvero l'operazione con cui il sismologo rileva i tempi di arrivo delle fasi *P* e, ove possibile, delle fasi *S*;
- localizzazione, sulla base delle fasi rilevate manualmente;
- stima della magnitudo locale.

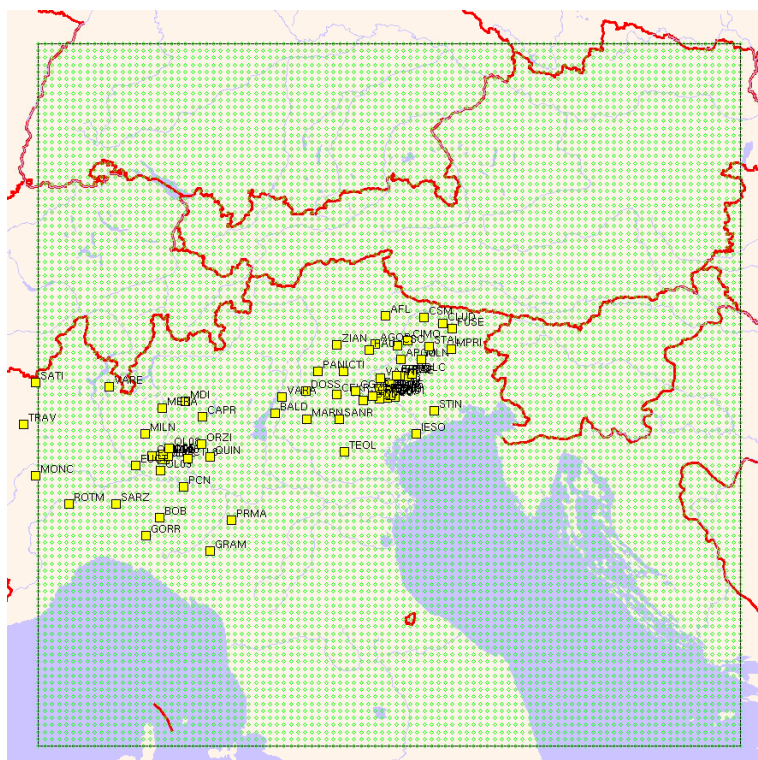
Le localizzazioni fornite in uscita dal sistema di elaborazione e analisi sono ottenute tramite il metodo Hypoellipse (Lahr, 1984). Quest'ultimo utilizza un modello 1D della crosta terrestre a strati piani e paralleli, descritto in termini di velocità delle onde *P* (V_p), spessore degli strati e rapporto tra le velocità delle onde sismiche *P* ed *S* (V_p/V_s) in ciascuno strato. Il modello adottato (Tabella 4) rappresenta la geologia a scala sub-regionale, caratterizzata da una spessa copertura di depositi alluvionali sopra la base rocciosa; tale configurazione si ripercuote in una variazione evidente, nei primi due strati, sia delle velocità V_p sia del rapporto V_p/V_s . Il rapporto V_p/V_s influenza direttamente la profondità dell'ipocentro. Maggiori dettagli sono riportati nella relazione completa sulle attività iniziali (Priolo et al., 2018).

Per quanto riguarda la magnitudo, viene calcolata la magnitudo locale (M_L) con la formula di attenuazione di Bragato e Tonto (2005).

Le informazioni riguardanti la rete di monitoraggio sismico e le procedure adottate per il riconoscimento e la stima dei parametri degli eventi sismici sono pubblicate anche sul sito web all'indirizzo rete-cornegliano.crs.inogs.it.

	V_p (km/s)	Profondità (km)	V_p/V_s [Hypoellipse]
1	2.35	0.0-1.4	2.38
2	3.5	1.4-3.0	1.85
3	5.0	3.0-6.0	1.78
4	6.0	6.0-12.0	1.78
5	6.7	12.0-35.0	1.78
6	7.5	> 35.0	1.78

Tabella 4. Modello 1D utilizzato in questo studio per le localizzazioni degli eventi sismici. Le colonne indicano da sinistra a destra in successione: il numero di strato, la velocità V_p , la profondità dello strato e il valore di V_p/V_s .



1.2. Operatività della rete sismica

Per quanto concerne l'esercizio delle stazioni, è stata eseguita la manutenzione quotidiana da remoto, mentre gli interventi *in situ* che hanno comportato delle variazioni della strumentazione o dei componenti

accessori sono riportati nella Tabella 5. Non vengono qui elencati, invece, gli interventi di ordinario controllo e pulizia delle stazioni in regime di funzionamento regolare.

Per quanto riguarda i principali interventi in sito sulla strumentazione di stazione, si segnala la temporanea disinstallazione del GNSS secondario LZero per attività di manutenzione e aggiornamento, seguita dal successivo ripristino. Quest'ultimo è stato tuttavia interrotto poco dopo a causa di un inaspettato guasto al modulo di alimentazione. Ulteriori anomalie di lieve entità hanno interessato la componentistica accessoriaria e hanno richiesto alcuni interventi manutentivi, tra cui:

- l'aggiornamento di alcuni sistemi di controllo remoto;
- la sostituzione di due gruppi batterie: uno presso la stazione OL10, già previsto nel programma di manutenzione, e uno presso la stazione OL08, resosi necessario a causa della ridotta insolazione durante il periodo invernale;
- la sostituzione di un regolatore di carica fotovoltaico.

Le stazioni sono inoltre soggette a periodici interventi di manutenzione del verde e a verifiche dello stato di conservazione degli armadi e delle recinzioni. Tali attività vengono effettuate con maggiore frequenza nel periodo estivo, mediamente ogni 30 giorni, e con cadenza bimestrale nel periodo invernale. Recentemente, a seguito della scadenza del precedente accordo, è stato attivato un nuovo contratto con una diversa impresa incaricata della manutenzione del verde.

Data	Stazione	Intervento
2025.12.18	OL05	Sostituzione e verifica relè, test controllo remoto
2025.12.18	OL10	Verifica dell'impianto fotovoltaico, pannelli, regolatore e gruppo batterie
2025.12.19	OL01	Disinstallazione GNSS Lzer0 per aggiornamento e manutenzione
2025.12.19	OL10	Sostituzione gruppo batterie
2026.02.04	OL05	Sostituzione regolatore di carica, ricarica batterie
2026.02.05	OL08	Sostituzione gruppo batterie
2026.02.05	OL01	Reinstallazione e test GNSS Lzer0 SN#1020

Tabella 5. Principali interventi riguardanti la strumentazione sismica nel periodo 01/11/2025-30/04/2026.

1.3. Eventi rilevati dalla RMCL e attività di stoccaggio

Nel periodo compreso tra il 1/11/2025 e il 30/4/2026 la rete RMCL ha rilevato due eventi sismici: il primo localizzato nel Dominio Interno e il secondo nell'Area Esterna. Il primo evento sismico (7/11/2025), registrato nell'area di Lodi, ha presentato una magnitudo locale $M_l = 0.8$ e una profondità ipocentrale pari a 1.5 km. L'evento è verosimilmente riconducibile a sorgenti superficiali. Si evidenzia che l'area interessata da tale sismicità presentava fenomenologie di microsismicità anche in epoca antecedente l'avvio delle attività di stoccaggio. Il secondo evento (1/2/2026) è caratterizzato da una magnitudo $M_l = 2.8$ e una profondità stimata di circa 31 km. L'evento si colloca nel quadro della sismicità profonda già documentata in letteratura per l'area in esame (Peruzza et al., 2021). La localizzazione ipocentrale trova riscontro analogo nelle rilevazioni effettuate dalla Rete Sismica Regionale dell'Italia Nord-occidentale (RSI) (<https://distav.unige.it/rsni/pg-man-loca.php?var1=260211081547&lang=it>).

La distribuzione spaziale degli eventi sismici rilevati a partire dal 1° gennaio 2017 è illustrata nella Figura 3 mentre in Figura 4 ne viene riportato un dettaglio ingrandito della medesima area di interesse. L'elenco completo degli eventi e dei relativi parametri è riportato in Appendice B.

Nella Figura 5 sono riportati i dati medi orari relativi alle attività di stoccaggio del gas naturale forniti dalla società IGS. Nei cluster denominati "A" e "B" risultano operativi sei pozzi. I tre grafici illustrano rispettivamente (a) la pressione media misurata al collettore dei pozzi (espressa in bar); (b) la portata di flusso durante l'esercizio dell'impianto (espressa in milioni di Sm^3 giorno); (c) il volume complessivo di gas iniettato nel serbatoio. I grafici sono aggiornati con frequenza giornaliera. Si specifica che i valori numerici relativi ai volumi nel pannello (c) sono stati volutamente mascherati, in quanto classificati come dati commerciali sensibili e soggetti a vincolo di riservatezza.

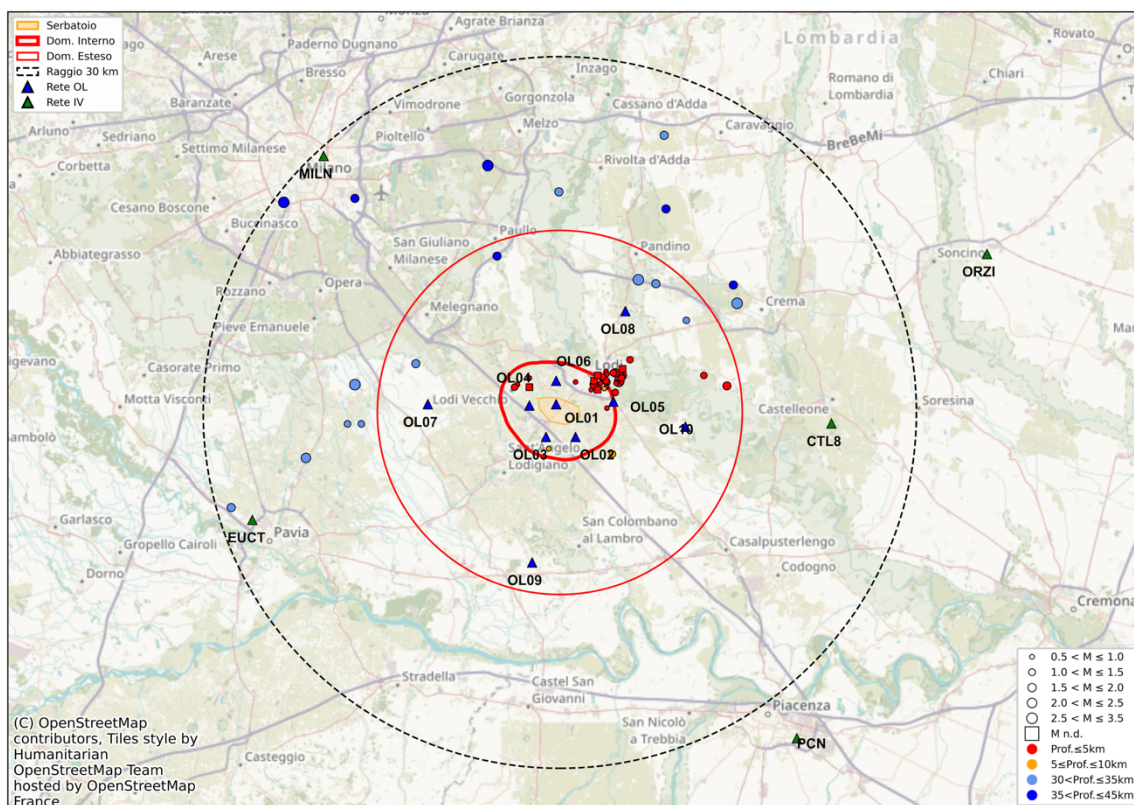


Figura 3. Distribuzione spaziale degli eventi sismici rilevati dalla RMCL nel periodo 1/1/2017-30/4/2026, posti a distanza epicentrale ≤ 30 km dal sito di stoccaggio. Gli epicentri sono rappresentati dai cerchi con dimensione proporzionale alla magnitudo, oppure da quadrati laddove privi di tale valore. I triangoli colorati indicano le stazioni appartenenti alle diverse reti sismiche attive nell'area. Il cerchio nero tratteggiato, centrato sul sito di stoccaggio e con raggio pari a 30 km, delimita l'Area Esterna di rilevazione.

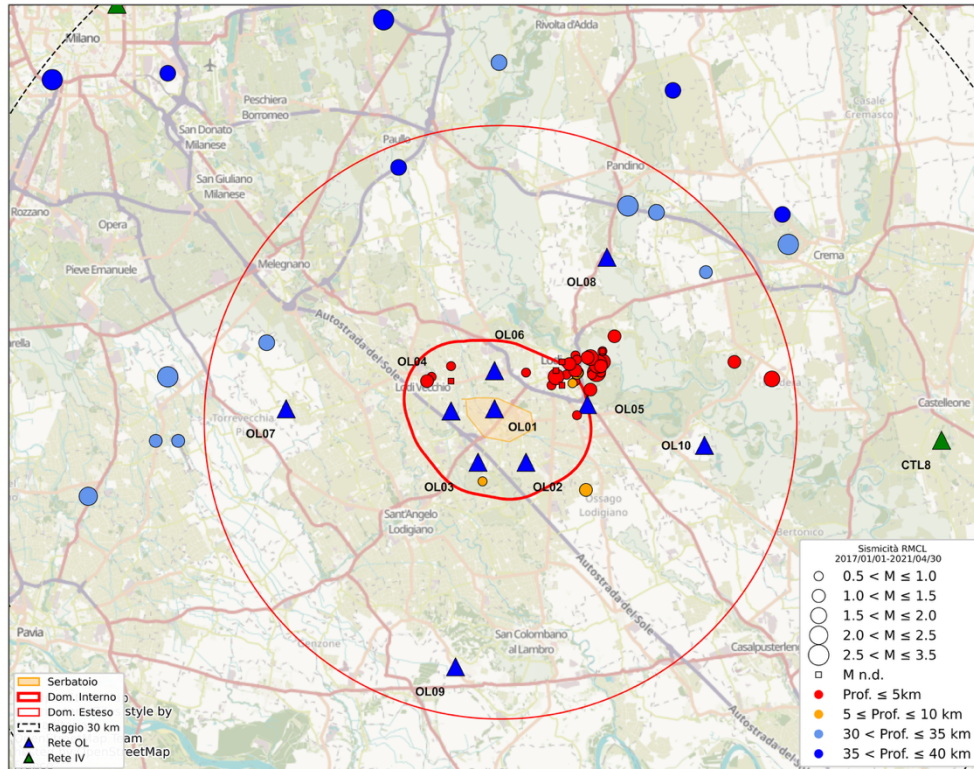


Figura 4. Dettaglio ingrandito della distribuzione spaziale di cui in Figura 3.

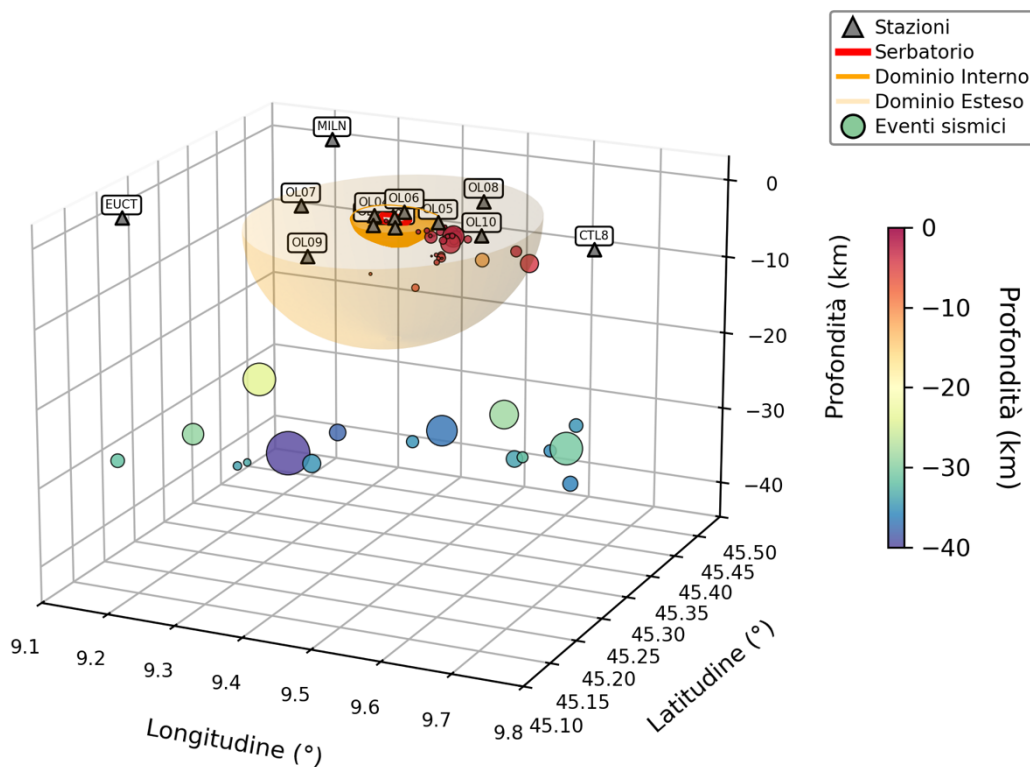
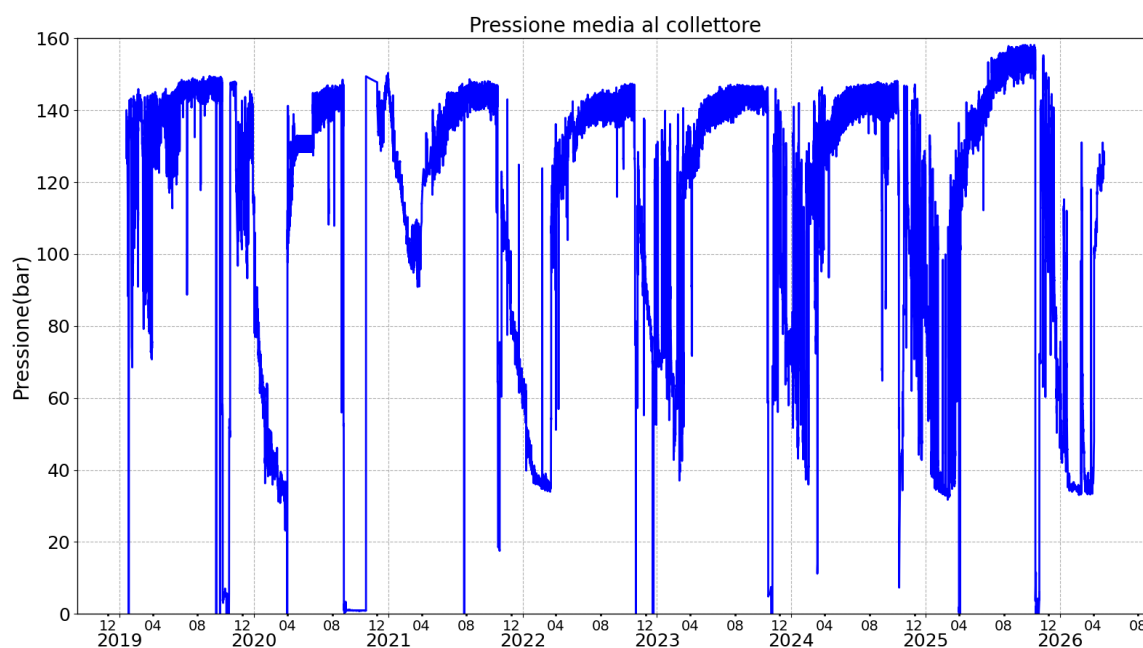
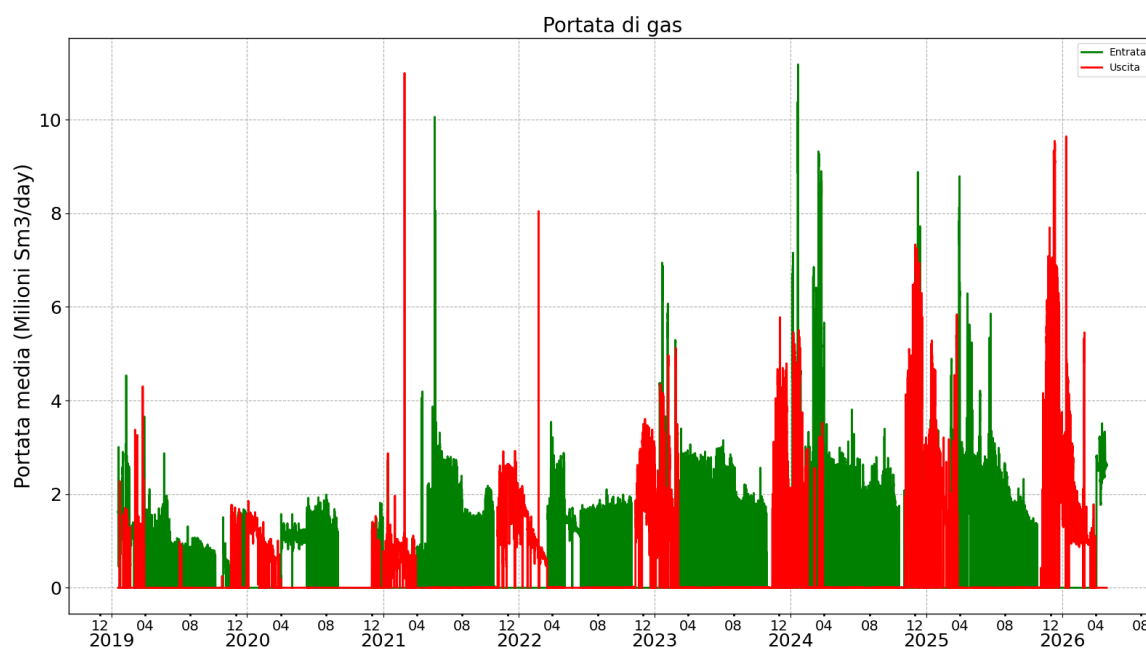


Figura 5. Distribuzione 3D degli eventi sismici rilevati dalla RMCL nel periodo 1/1/2017-30/4/2026, posti a distanza epicentrale ≤ 30 km dal sito di stoccaggio. La dimensione dei simboli è proporzionale alla magnitudo di ciascun evento.

(a)



(b)



(continua nella pagina seguente)

(c)

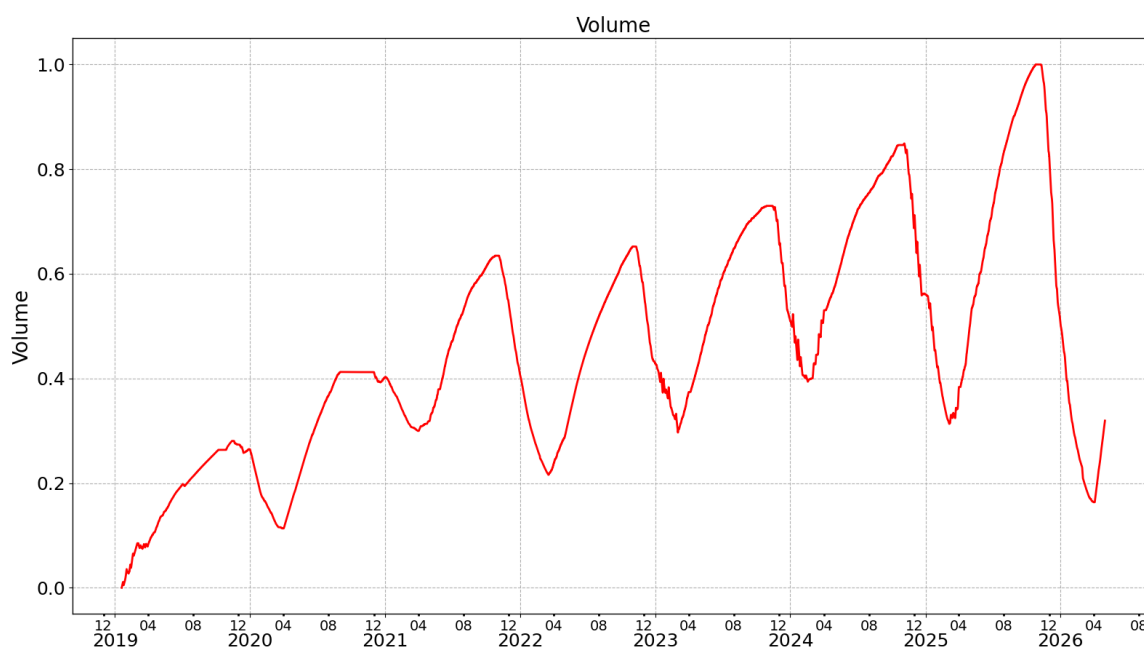


Figura 6. Dati medi orari relativi alle attività di stoccaggio del gas naturale presso il sito di Cornegliano Laudense. (a) Pressione media misurata al collettore dei pozzi. (b) Portata di gas (unità in milioni di metri cubi standard al giorno (Msm3/giorno) durante le attività dell'impianto; i valori in ingresso e in uscita sono rappresentati rispettivamente in verde e in rosso. (c) Volume complessivo del gas contenuto nel serbatoio naturale, normalizzato rispetto al volume massimo I valori assoluti del volume sono stati omessi in quanto informazioni commerciali sensibili e riservate.

2. MONITORAGGIO DELLE DEFORMAZIONI SUPERFICIALI

2.1. Elaborazione dei dati della stazione GNSS LODI

Il periodo di riferimento considerato nella presente relazione si estende dal 01/11/2025 al 30/04/2026. In tale intervallo temporale, la stazione LODI (precedentemente chiamata OL01, Guidarelli et al., 2024), inclusa nella rete geodetica permanente FReDNet dell'OGS, ha fornito dati orari con campionamento a 1 s, dai quali si estrapolano dati giornalieri a 30 s per la successiva elaborazione. La stazione è dotata di un ricevitore Topcon NETG5 e di un'antenna Topcon G5 entrambi multi-costellazione, in grado di tracciare le costellazioni GPS, GLONASS, Galileo, Beidou QZSS e SBAS, e multi-frequenza per l'acquisizione dei segnali L1, L2 e L5.

I dati registrati sono liberamente disponibili per operazioni di post-processing in formato standard RINEX (orari e giornalieri) sul Friuli Regional Deformation Network Data Center (OGS, 2016), accessibile al link <https://doi.org/10.6092/frednet>, e, più in dettaglio, i dati relativi alla stazione LODI sono accessibili all'indirizzo https://frednet.crs.ogs.it/frednet_data/stations/LODI/.

Si ricorda che, come indicato nella relazione precedente, a fianco della stazione LODI è stata installata LOZ1, una stazione geodetica con strumentazione a basso costo. Lo scopo di questa installazione risiede nel testare le performance della strumentazione a basso costo anche per scopi di monitoraggio industriale, visto i promettenti risultati ottenuti in altri esperimenti (Tunini et al., 2022).

Nel corpo principale del presente documento vengono analizzati i dati della stazione LODI, mentre i dati di LOZ1 sono rimandati all'appendice E.

2.1.1. *Analisi dei dati GPS della stazione LODI*

La stazione GNSS (Global Navigation Satellite System) LODI, operativa da fine ottobre 2016, è ubicata vicino al "Cluster A" dell'impianto di Cornegliano Laudense, il quale ospita anche la stazione sismometrica. Il dataset della stazione LODI viene registrato in file di formato RINEX (Receiver Independent Exchange Format) ed è disponibile in sessioni giornaliere e con campionamento a 30 secondi (2880 osservazioni quotidiane).

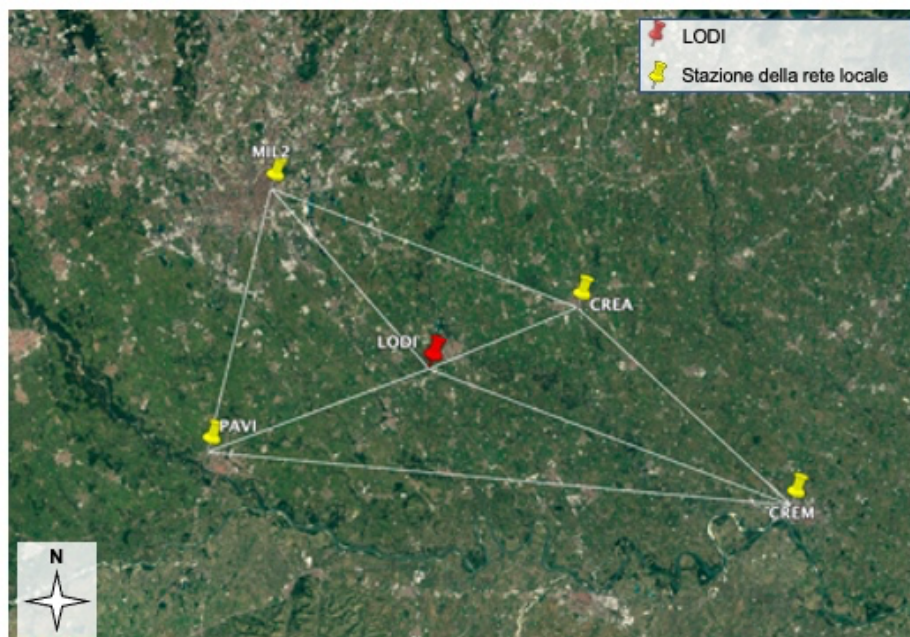


Figura 7. Localizzazione delle stazioni GNSS della rete locale di Lodi. Queste stazioni sono CREA (Crema), CREM (Cremona), MIL2 (Milano), PAVI (Pavia). La posizione della stazione MILA, rimasta attiva fino al 8/2/2019, è indistinguibile da quella di MIL2 o MIL3 in questo grafico.

Poiché il nostro obiettivo è monitorare la potenziale deformazione dell'impianto di stoccaggio, è stato stabilito un sistema di riferimento locale utilizzando quattro stazioni del servizio di posizionamento satellitare GNSS interregionale SPIN3 (rete SPIN, <https://www.spingnss.it/>). Questo sistema locale comprende le stazioni CREA, CREM, MIL3 (che sostituisce MIL2 da luglio 2025) e PAVI (Figura 7 e Tabella 6), situate rispettivamente a Crema, Cremona, Milano e Pavia. La stazione MIL3, dotata della stessa strumentazione geodetica che aveva MIL2, è stata installata il 9 luglio c.a. (secondo le informazioni contenute nel logsite della stazione, ovvero nel file che ne specifica strumentazione e caratteristiche tecniche e i loro cambiamenti nel tempo) e i dati RINEX sono disponibili a partire dal 22 luglio. Tutte queste stazioni di riferimento si trovano entro un raggio di 30 km da Lodi e sono operative da più di un decennio (per Milano si considera l'arco temporale che coinvolge MILA, MIL2 e MIL3). L'insieme di stazioni della rete locale e della stazione di Lodi è chiamato con il nome di "Rete GNSS Lodi".

Per il calcolo delle serie temporali, assieme ai siti della Rete GNSS Lodi, sono state utilizzate più di 350 stazioni che coprono le regioni dell'Italia settentrionale e le aree circostanti. Di queste, più di 150 appartengono alla rete europea EUREF (<https://www.epncb.oma.be/>) e più di 30 appartengono alla rete IGS (<https://network.igs.org/>), e favoriscono il corretto inquadramento nei sistemi di riferimento adottati in questo lavoro.

Le osservazioni di Lodi, così come quelli delle altre stazioni GNSS, sono state processate con il pacchetto software GAMIT/GLOBK versione 10.71 (Herring et al., 2018), sviluppato dal Massachusetts Institute of

Technology (web.mit.edu), dall' Harvard University (www.harvard.edu) e dallo Scripps Institution of Oceanography (scripps.ucsd.edu).

SITE CODE	LOCALITA'	RICEVITORE	ANTENNA	LATITUDINE LONGITUDINE	QUOTA [m]
CREA	Crema	STONEX SC2200 (GPS+GLO+GAL)	STXSA1200 STXR	45° 21' 15,592537" N 9° 41' 07,096872" E	129,818
CREM	Cremona	STONEX SC2200 (GPS+GLO+GAL)	STXSA1200 STXR	45° 08' 47.927515" N 10° 00' 07.025904" E	102,733
MILA	Milano	TPS NET-G3 (GPS+GLO)	TPSCR3_GGD CONE	45°28'47,94818"N 9°13'45,62699"E	187,275
MIL2	Milano	STONEX SC2200 (GPS+GLO+GAL)	STXSA1200 STXR	45° 28' 42,127070" N 9° 13' 45,166341" E	191,125
MIL3	Milano	STONEX SC2200 (GPS+GLO+GAL+BD S)	STXSA1200 STXR	45° 28' 42.170692" N 9° 13' 45.165274" E	191,447
PAVI	Pavia	STONEX SC2200 (GPS+GLO+GAL)	STXSA1200 STXR	45° 12' 10.732233" N 9° 08' 10.104212" E	143,638
LODI	Cornegliano Laudense	TPS NET-G5 (GPS+GLO+GAL+BD S+QZSS+SBAS)	TPSCR-G5 (TPSH)	45°17'28,17435"N 9°27'53,47318"E	121,254

Tabella 6. Coordinate ETRF2000 (2008.0) delle stazioni CREA, CREM, MILA, MIL2, MIL3, PAVI e del sito LODI. Tra settembre 2021 e gennaio 2022 le antenne e i ricevitori delle stazioni CREA, CREM, MIL2 e PAVI sono state sostituite. Qui sono riportati i modelli di antenna e ricevitore aggiornati, per i periodi precedenti si veda Priolo et al. (2021).

Maggiori dettagli sulla procedura di elaborazione sono contenuti nella relazione precedente (Guidarelli et al., 2024) e in Tunini et al. (2024). Per questa relazione sono stati usati parametri meno stringenti per la pulizia delle soluzioni. Sono stati definite come outlier le posizioni con residui rispetto al trend stimato sull'intera serie temporale maggiori di 6 volte il valore quadratico medio ponderato della distribuzione, invece di maggiori di 3 volte come nelle relazioni precedenti. In questo modo non sono state eliminate le soluzioni indicanti un fenomeno reale, ovvero la deformazione più accentuata descritta nella prossima sezione, ma che non vengono descritti in modo adeguato dal modello lineare impiegato.

Le stime giornaliere delle coordinate e le serie temporali vengono calcolate secondo due diversi sistemi di riferimento:

- il sistema di riferimento internazionale ITRF14 (International Terrestrial Reference Frame 2014, Altamimi et al., 2016, <https://itrf.ign.fr/en/solutions/ITRF2014/>), riferito al centro di massa della Terra con asse Z passante per l'asse terrestre e assi X e Y giacenti sul piano equatoriale. L'epoca di riferimento per le soluzioni dell'ITRF14 è il 2010;
- il sistema di riferimento europeo ETRF14 (Altamimi et al., 2017), che evidenzia i movimenti della crosta terrestre rispetto alla placca euroasiatica, considerata come un blocco fisso. In questo modo, la rappresentazione dello spostamento non risente del movimento delle grandi placche a livello globale, ma si riferisce alla sola placca europea, permettendo un'analisi dei movimenti tettonici a scala regionale e locale, di maggiore interesse in relazione all'attività di stoccaggio del gas.

La stazione geodetica LODI ha funzionato correttamente per tutto il tempo considerato in questa relazione.

2.1.2. Risultati

I file RINEX di LODI registrati dal 01/01/2017 fino al 30/04/2026 sono 2954, così come le giornate elaborate. L'elaborazione dei dati ha infatti prodotto 2882 soluzioni per LODI, pari all'utilizzo del 98% dei dati iniziali.

In questa sezione, riportiamo le serie temporali stimate per ciascun sito della Rete GNSS LODI. Le serie temporali sono disponibili in due sistemi di riferimento diversi: quello europeo ETRF14 e quello internazionale ITRF14. Le stime di velocità sono stimate attraverso un fit lineare sull'intera serie temporali degli spostamenti e quindi rappresentano un valore medio della velocità nell'intervallo considerato. I valori delle velocità sono abbastanza importanti e, ad esempio, per la componente orizzontale, si attestano su alcune decine di mm/anno per tutti i siti GNSS. Nel sistema ETRF14 (Altamimi et al., 2017), gli spostamenti delle placche vengono stimati rispetto al blocco europeo (o Eurasia), per cui a ciascun sito della rete è sottratto il moto medio della placca europea. Nel sistema ETRF14 quindi le velocità sul piano orizzontale sono nettamente ridotte rispetto a quelle in ITRF14 e sono dell'ordine di alcuni mm/anno. I grafici delle serie temporali consentono un'analisi più dettagliata del comportamento di ciascuna stazione GNSS; in tal modo si ha una stima del movimento della stazione sia prima che dopo l'inizio dell'attività di stoccaggio.

Confrontando le serie temporali delle stazioni della Rete GNSS LODI, si nota che queste hanno un andamento congruente tra i sistemi ITRF14 (Figure in Appendice C) e ETRF14 (Figure 8-14). La stazione LODI presenta uno spostamento marcato verso Nord-Ovest e verso l'alto, presente già nelle precedenti relazioni (Guidarelli et al., 2022; Priolo et al. 2022).

La Tabella 8 mostra le velocità stimate dal fit delle serie temporali con l'algoritmo *real_sigma* (Floyd e Herring, 2019), che consente di tenere conto delle correlazioni temporali nei dati, considerando l'intero periodo di disponibilità dei dati.

Si noti che i valori anomali di MIL3, essendo calcolati su una serie temporale di meno di un anno, non sono da considerarsi attendibili. Sono stati aggiunti alla tabella per completezza, ma non verranno considerati nell'analisi dei dati descritta qui di seguito.

Nel sistema di riferimento ITRF, le velocità stimate nelle componenti orizzontali sono simili (variano meno di 2 mm/anno) per tutte le stazioni GNSS (esclusa MIL3), con valori dai 16,0 mm/anno di MIL2, ai 17,6 mm/anno di LODI in direzione Nord, e dai 19,9 mm/anno di LODI ai 20,9 mm/anno di CREM in direzione Est. Nella direzione verticale, il range di variazione fra le stazioni è di circa 4 mm/anno, con valori che vanno da -1,5 mm/anno di MIL2 ai 2,6 mm/anno di LODI.

Nel riferimento europeo (ETRF14), i valori di velocità stimati nelle componenti orizzontali sono compresi, nella direzione Nord, fra 0,2 mm/anno (MIL2) e 1,7 mm/anno (LODI), e fra -0,6 mm/anno (LODI) e 0,3 (CREM) mm/anno nella direzione Est. Nella direzione verticale, i valori di spostamento vanno da -1,6 mm/anno di MIL2 ai 2,5 mm/anno di LODI.

La stazione LODI, rispetto ai valori indicati nella relazione precedente, mostra valori stabili, con differenze minime di 0.1 mm/anno sulla componente est e su quella verticale. Anche la stazione geodetica LOZ1 rileva questo cambiamento (vedi Appendice E).

	ITRF14			ETRF14		
	Vel. Nord [mm/anno]	Vel. Est [mm/anno]	Vel. Up [mm/anno]	Vel. Nord [mm/anno]	Vel. Est [mm/anno]	Vel. Up [mm/anno]
LODI	17,6	19,9	2,6	1,7	-0,6	2,5
CREA	16,3	20,7	-0,4	0,4	0,1	-0,4
CREM	16,6	20,9	-0,6	0,9	0,3	-0,7
MILA	16,2	20,3	0,7	0,4	-0,1	0,6
MIL2	16,0	20,1	-1,5	0,2	-0,3	-1,6
MIL3	10,6	6,5	-7,8	0,1	-3,2	-1,9
PAVI	16,4	20,2	-0,7	0,5	-0,2	-0,7

Tabella 7. Velocità dei siti della Rete GNSS LODI nei sistemi di riferimento ITRF14 e ETRF14. Le stime ottenute per la stazione LODI sono indicate in grassetto e colore rosso. I valori di velocità di MIL3 non sono da considerarsi attendibili per il momento, in quanto la serie temporale ha meno di un anno di dati. Si ricorda che la migliore accuratezza nella stima delle velocità che si può raggiungere, considerando serie temporali lunghe e monumentazione stabile, è di 0,2 mm/anno sulle componenti orizzontali e 0,5 mm/anno sulla verticale (Masson et al., 2019).

Come nelle relazioni precedenti, è stato analizzato l'andamento dei residui di LODI rispetto al trend tettonico medio delle stazioni di riferimento per mettere in luce eventuali anomalie locali sulla stazione LODI che potessero essere messe in relazione con lo stoccaggio di gas nel serbatoio. Ipotizzando che il moto delle stazioni attorno a LODI, ovvero delle stazioni CREA, CREM, PAVI, MILA, MIL2 e MIL3 sia rappresentativo del

trend tettonico della zona, abbiamo stimato il trend di queste stazioni, ne abbiamo calcolato la media, e l'abbiamo sottratta alla serie temporale di LODI, giorno per giorno nelle tre componenti. In questo modo, il segnale residuo su LODI rappresenta il comportamento locale della stazione stessa. Il risultato è riportato in Figura 15.

Dalla figura si può notare che continua a emergere il discostamento della stazione di LODI rispetto alle stazioni circostanti, evidenziando uno spostamento orizzontale in direzione Nord-Ovest e verticale verso l'alto a partire dal 2019, e che persiste tutt'oggi.

LODI

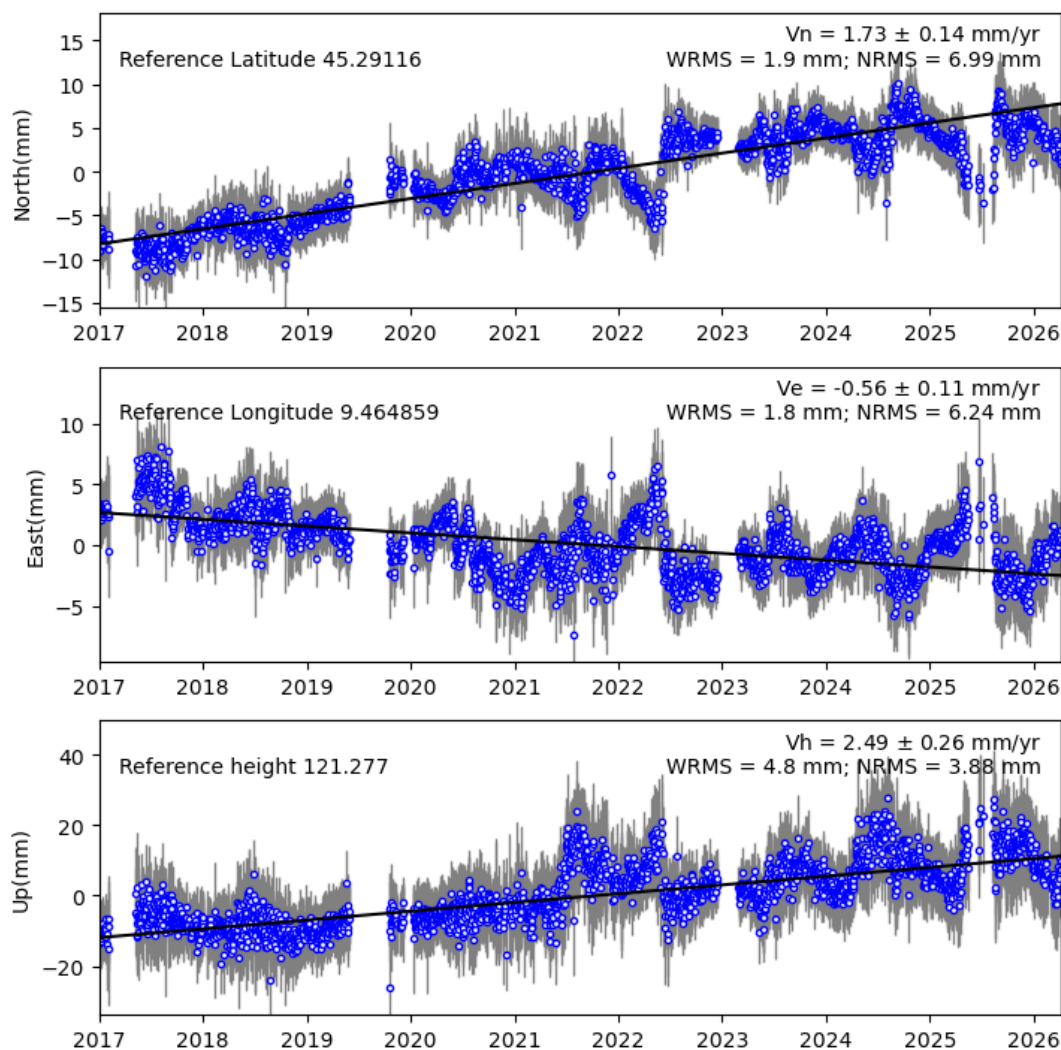


Figura 8. Serie temporale di Lodi (nel sistema di riferimento ETRF14) nelle tre componenti: Nord-Sud (grafico in alto), Est-Ovest (in centro), e verticale (in basso). Ogni punto sul grafico indica lo spostamento stimato giornaliero in mm, mentre la barra di errore rappresenta la dispersione delle 2880 stime giornaliere. La retta interpolante sui grafici fornisce una stima di velocità con il relativo errore, visibile anche in alto a sinistra (rate(mm/year)). Sono presenti, inoltre, il NRMS (errore quadratico medio normalizzato) e il WRMS (errore quadratico medio pesato).

CREA

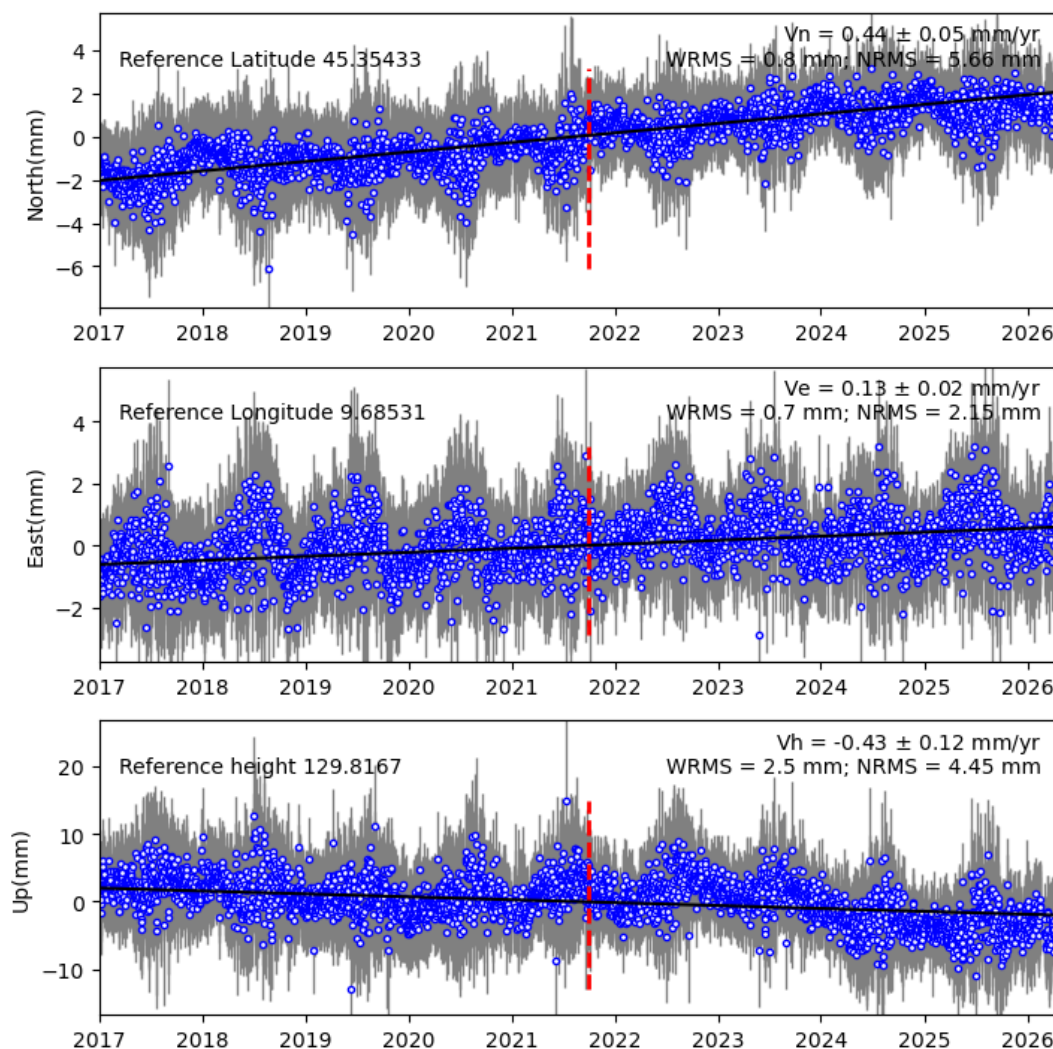


Figura 9. Serie temporale della stazione CREA secondo il sistema di riferimento ETRF14. La linea tratteggiata rossa rappresenta il cambiamento di antenna avvenuto il giorno 28/9/2021. Dalla serie temporale è stato rimosso il salto stimato dovuto al cambio antenna. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di Figura 8.

CREM

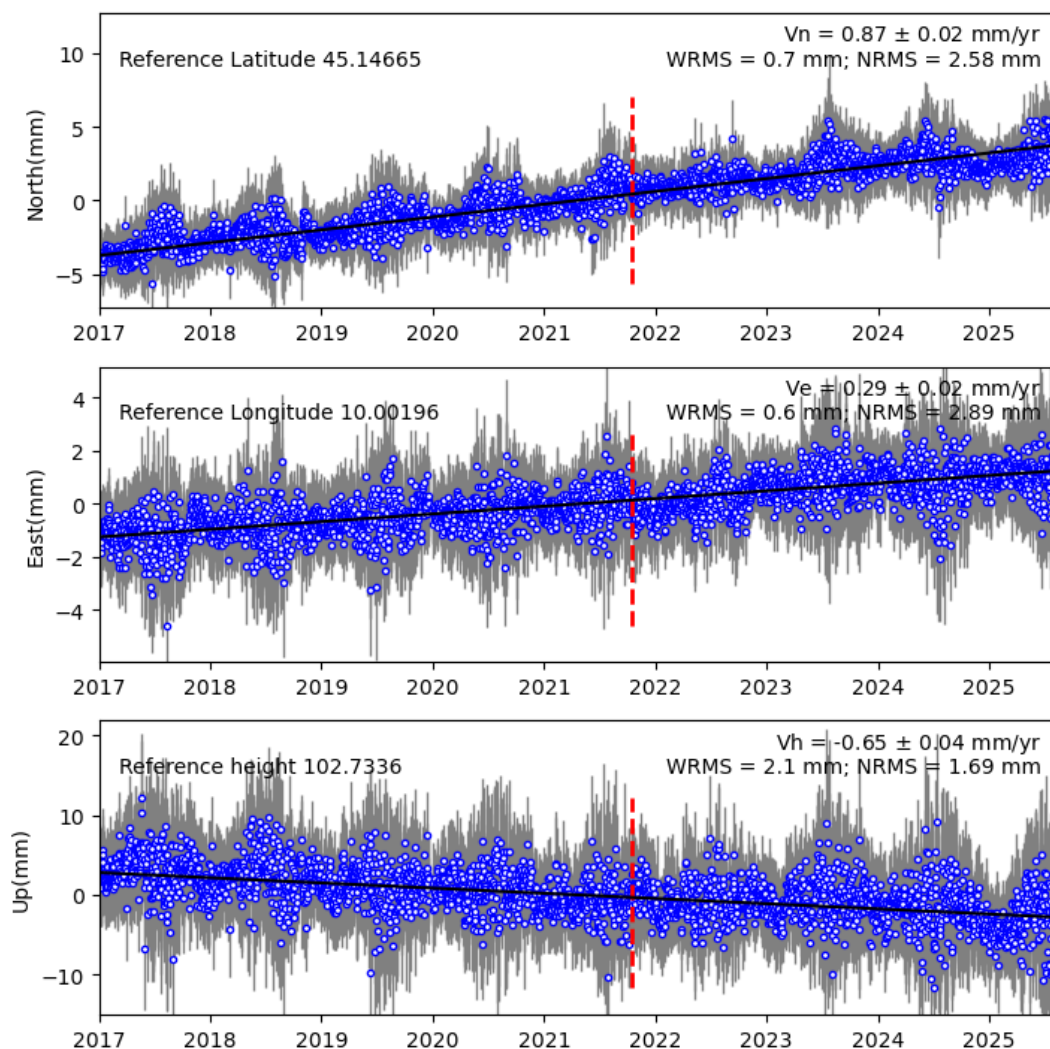


Figura 10. Serie temporale della stazione CREM secondo il sistema di riferimento ETRF14. La linea tratteggiata rossa rappresenta il cambiamento di antenna avvenuto il giorno 15/10/2021. Dalla serie temporale è stato rimosso il salto stimato dovuto al cambio antenna. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di Figura 8.

MILA

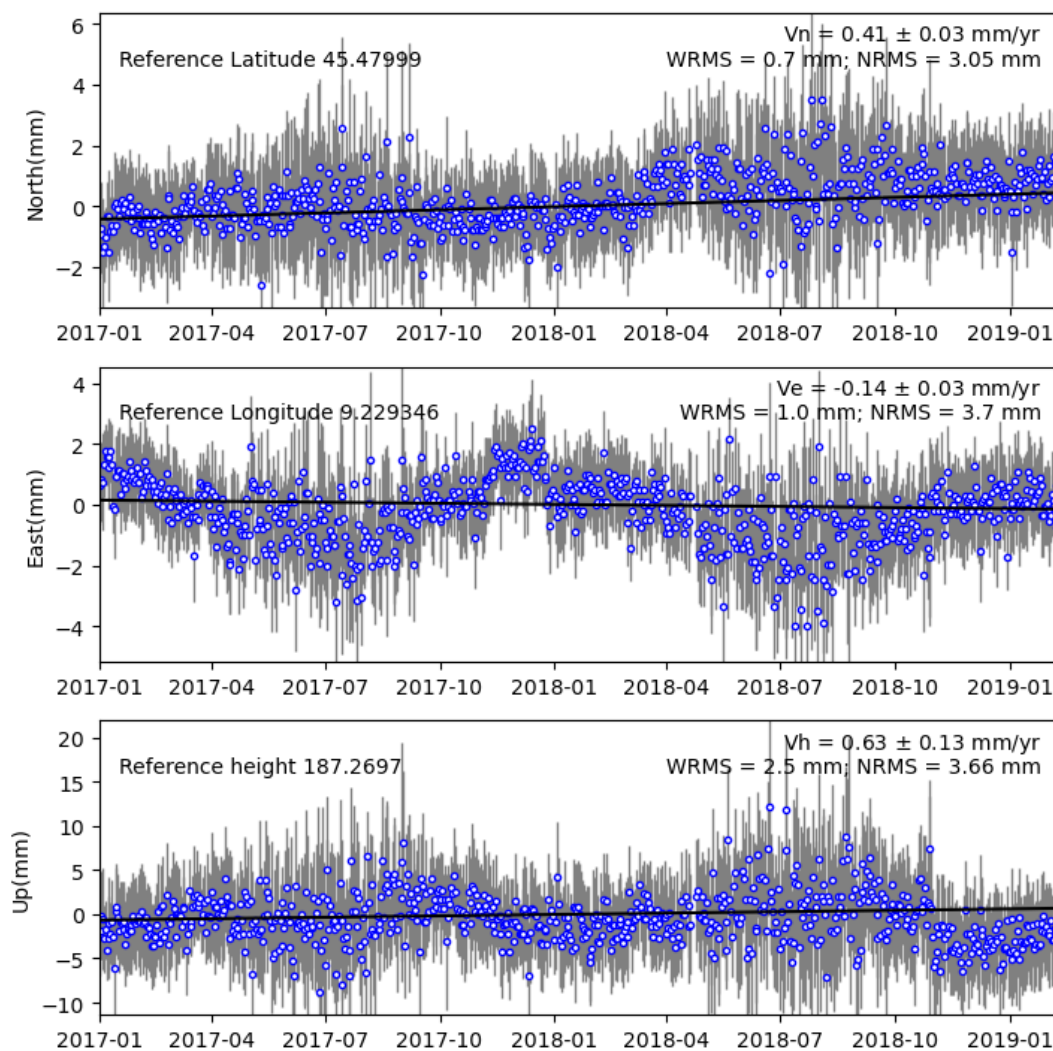


Figura 11. Serie temporale della stazione MILA secondo il sistema di riferimento ETRF14. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di Figura 8.

MIL2

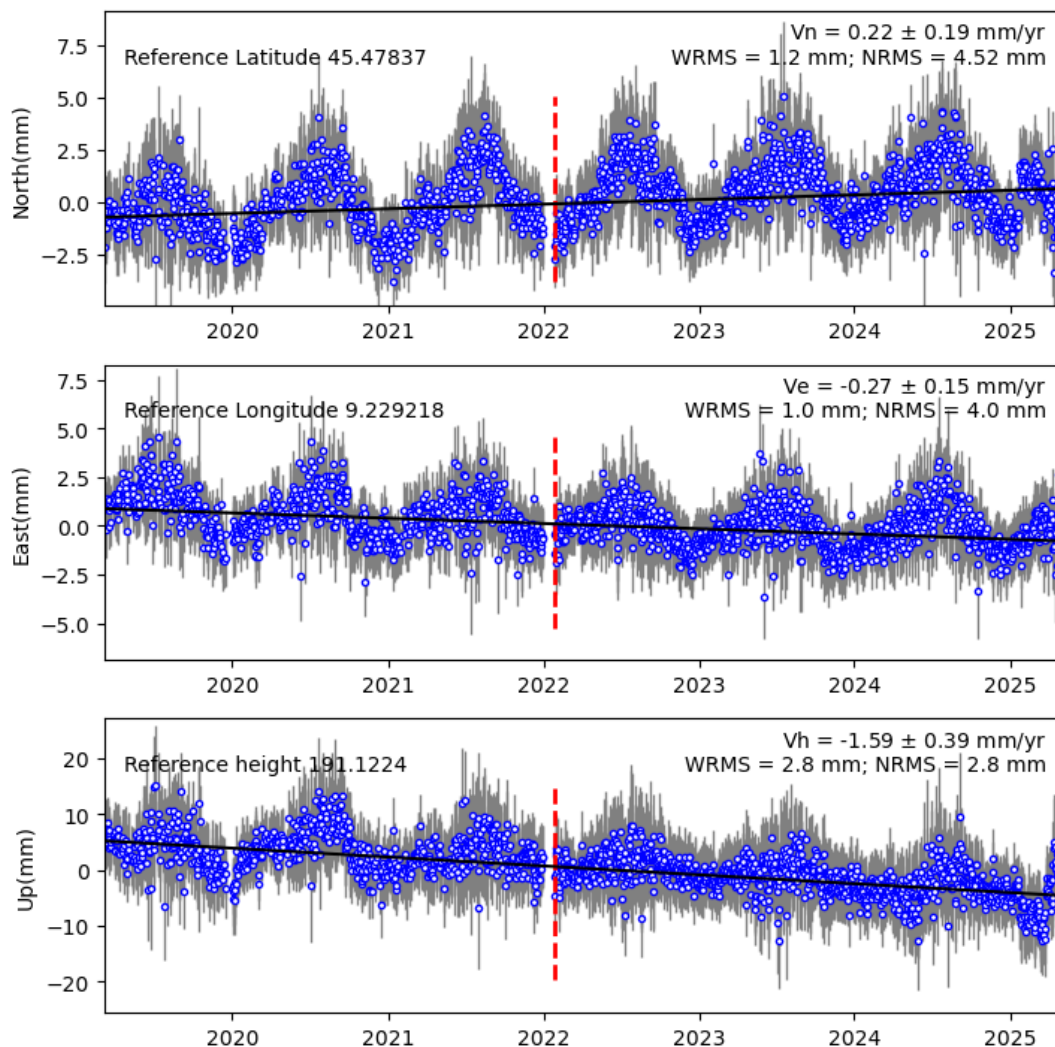


Figura 12. Serie temporale della stazione MIL2 secondo il sistema di riferimento ETRF14. La linea tratteggiata rossa rappresenta il cambiamento di antenna avvenuto il giorno 26/1/2022. Dalla serie temporale è stato rimosso il salto stimato dovuto al cambio antenna. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di Figura 8.

MIL3

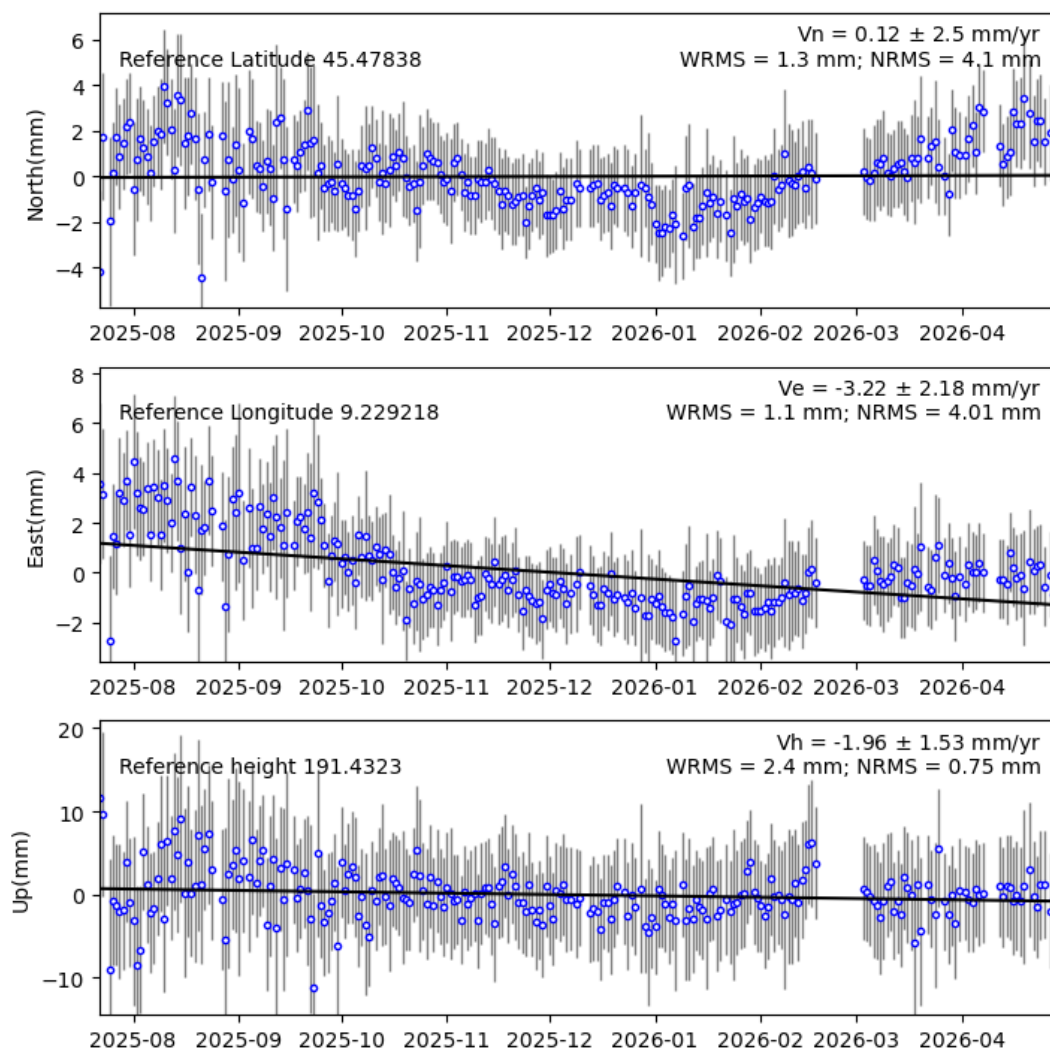


Figura 13. Serie temporale della stazione MIL3 secondo il sistema di riferimento ETRF14. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di Figura 8.

PAVI

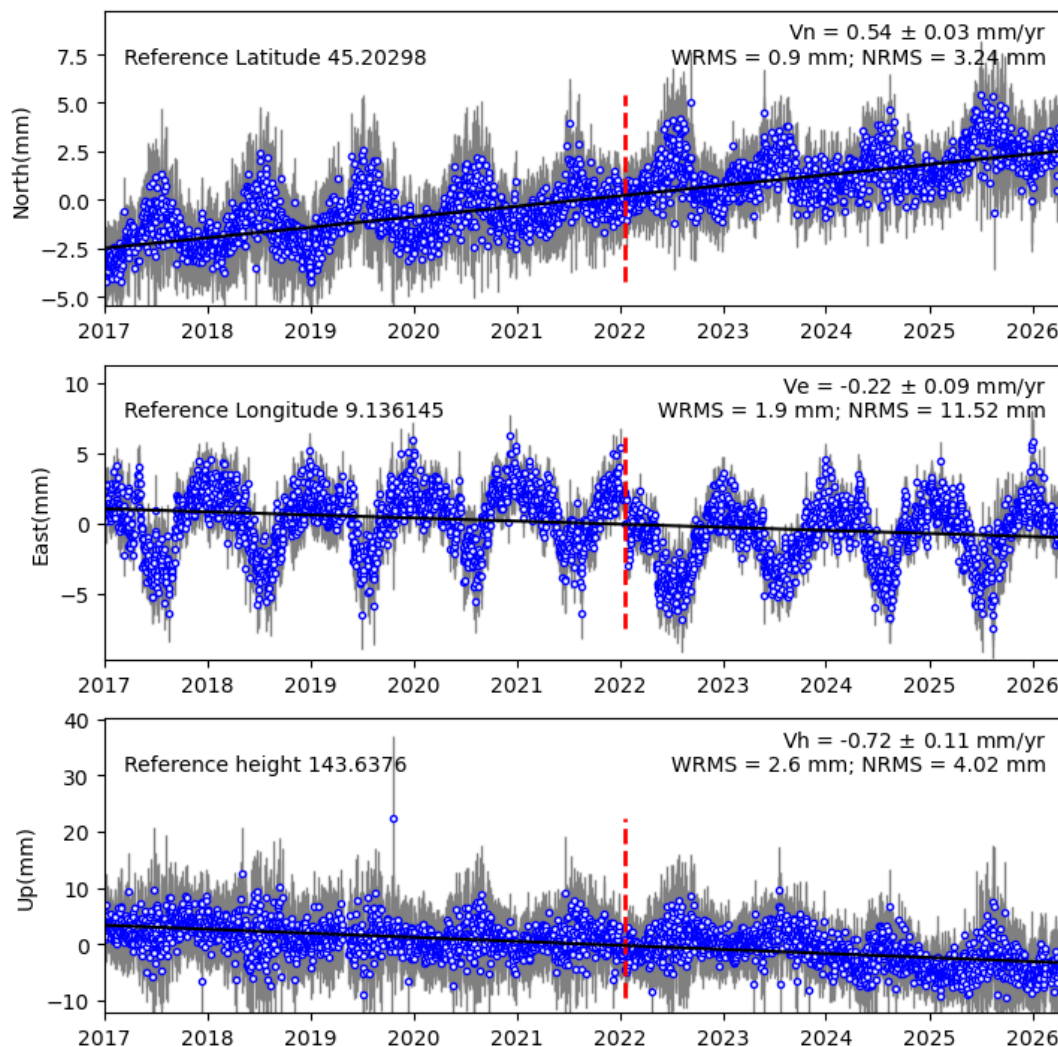


Figura 14. Serie temporale della stazione PAVI secondo il sistema di riferimento ETRF14. La linea tratteggiata rossa rappresenta il cambiamento di antenna avvenuto il giorno 20/1/2022. Dalla serie temporale è stato rimosso il salto stimato dovuto al cambio antenna. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di Figura 8.

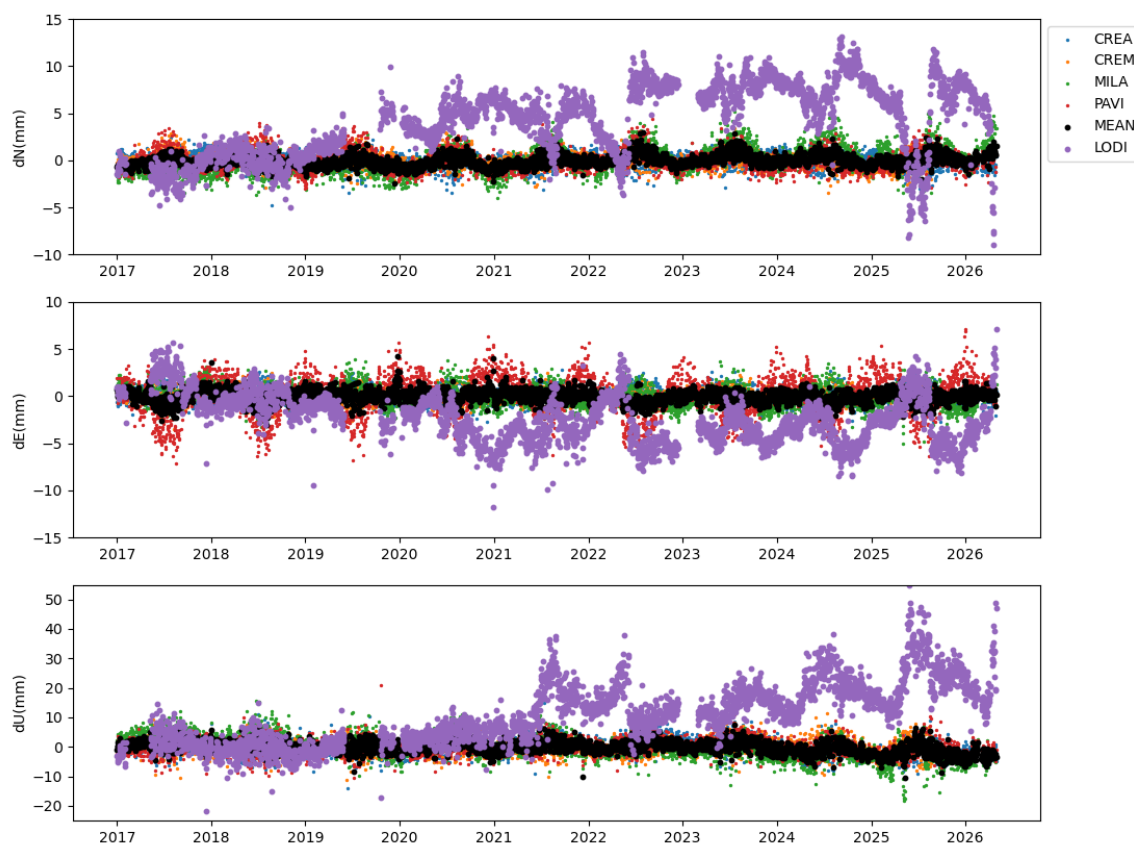


Figura 15. Residui delle serie temporali Nord-Sud (dN), Est-Ovest (dE), Verticale (dU) delle stazioni GNSS considerate nell'analisi. In colore sullo sfondo, i residui delle stazioni di riferimento: CREA, punti azzurri; CREM, punti arancioni; PAVI, punti rossi; MILA, MIL2 e MIL3 punti verdi (MILA, MIL2 e MIL3 sono state unite assieme per ricoprire l'intero arco temporale 2017-2025). In viola, in primo piano, la stazione LODI a cui è stato tolto il trend delle altre stazioni. In nero la media dei residui delle stazioni di riferimento. Per evidenziare graficamente l'anomalia di LODI abbiamo considerato come zero la media di LODI calcolata sul periodo precedente all'inizio delle attività di stoccaggio.

2.2. Analisi interferometrica delle deformazioni del suolo relative al periodo 2015-2025 (dati SENTINEL-1)

L'analisi interferometrica mediante la tecnica SBAS-DInSAR è stata effettuata utilizzando i dati Sentinel-1 (S-1) relativi all'area di interesse e corrispondenti a 521 immagini acquisite lungo orbite discendenti e 510 lungo orbite ascendenti, relative al periodo marzo 2015 – aprile 2026. In Figura 16 è mostrata la distribuzione dei dati S-1 nel piano tempo/baseline perpendicolare. Si nota chiaramente in figura l'aumento dei valori di baseline perpendicolare, che fino al 2023 si mantenevano entro i 200 m, dovuto ad un malfunzionamento del meccanismo di controllo orbitale, in seguito al quale, a metà Aprile 2024, è stata cambiata la politica di controllo delle orbite con conseguente allargamento del tubo orbitale. Con tali dati sono stati generati, rispettivamente, 3816 e 3699 interferogrammi differenziali, a partire dai quali sono state generate le mappe di velocità media di deformazione del suolo e le corrispondenti serie temporali di deformazione.

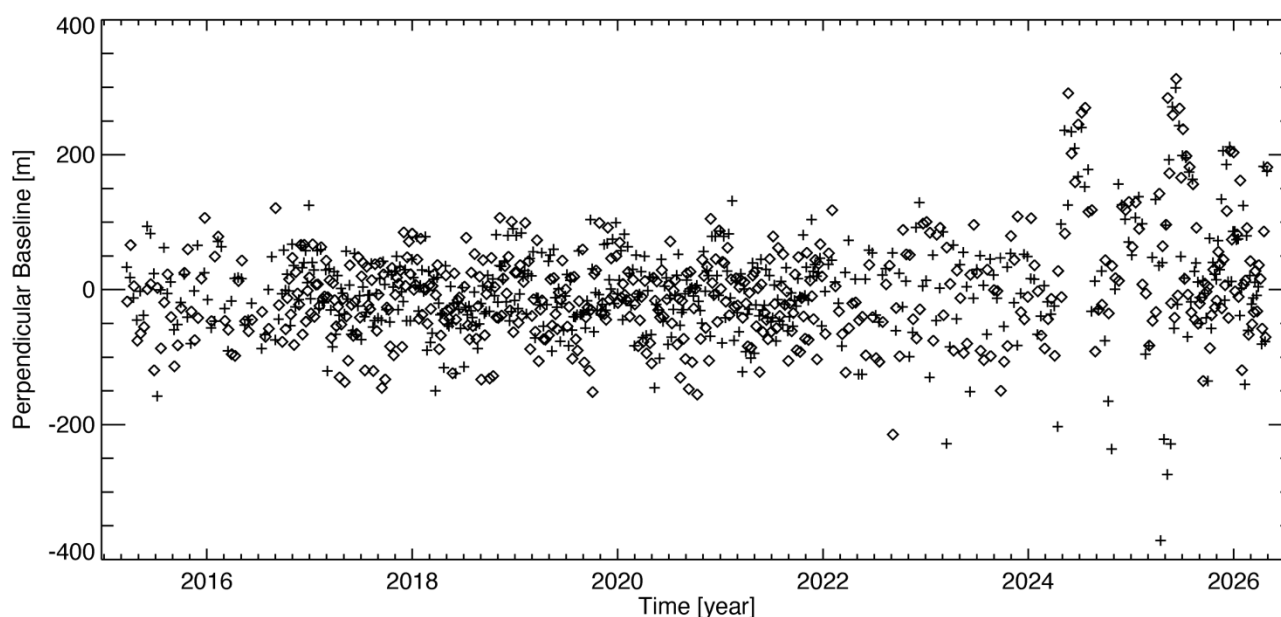


Figura 16. Distribuzione nel piano tempo/baseline-perpendicolare dei dati SAR S-1 acquisiti sull'area di interesse. Ogni crocetta rappresenta un'immagine SAR acquisita da orbite discendenti, ogni rombo un'immagine SAR ottenuta da orbite ascendenti.

Per la generazione degli interferogrammi è stato utilizzato il DEM SRTM dell'area con uno spacing di circa 30 m (1 arcsec). Sia gli interferogrammi differenziali, sia le successive mappe e serie temporali di deformazione hanno una risoluzione spaziale di circa 30 m x 30 m, ottenuta a valle di un'operazione di multilooking, e sono stati rappresentati sulla stessa griglia del DEM utilizzato per l'elaborazione. L'estensione spaziale dell'area

analizzata è di circa 190 km x 70 km. È stata inoltre effettuata una validazione dei risultati SBAS attraverso confronti tra le misure di spostamento DInSAR e le corrispondenti misure GNSS rese disponibili da OGS.

Sia per l'elaborazione discendente, sia per quella ascendente è stato scelto come punto di riferimento (anche detto punto d'aggancio) un pixel nell'area urbana di Pavia nei pressi della corrispondente stazione GNSS che, come testimoniato dalle relative misure GNSS, risulta non essere affetto da deformazione. Si segnala inoltre che, combinando opportunamente i risultati ottenuti dai dati S-1 acquisiti dalle orbite discendenti e ascendenti, sono state generate sia le mappe, sia le serie temporali di deformazione delle componenti verticale ed Est-Ovest degli spostamenti rilevati.

Nei paragrafi seguenti si descrivono nel dettaglio i risultati delle analisi interferometriche effettuate utilizzando i dati discendenti e ascendenti (paragrafi 2.2.1 e 2.2.2 rispettivamente) e quelli relativi alla loro combinazione (2.2.3).

Si sottolinea che tutti i risultati mostrati fanno riferimento all'area comune ed ai pixel comuni alle analisi effettuate sui dati acquisiti dalle orbite discendenti ed ascendenti da parte dei satelliti Sentinel-1A (S-1A), Sentinel-1B (S-1B) e Sentinel-1C (S-1C) che compongono la costellazione. In proposito, si segnala che il sensore Sentinel-1B ha smesso di essere operativo a dicembre 2021 a causa di un malfunzionamento, pertanto non ha più acquisito dati e il tempo di rivedita della costellazione è aumentato da 6 a 12 giorni. A partire da aprile 2025, però, sono diventati disponibili i dati acquisiti dal nuovo sensore Sentinel-1C, lanciato il 5 dicembre 2024, che hanno ripristinato il tempo di rivedita di 6 giorni. Si fa inoltre presente che, al fine di minimizzare quanto più possibile eventuali effetti di decorrelazione o rumorosità presenti nei risultati, ai prodotti interferometrici finali è stata applicata una soglia di coerenza pari a 0.9. In Tabella 8 sono indicate le principali caratteristiche comuni ai due dataset S-1 utilizzati, mentre in Tabella 9 sono riportati i dettagli di ciascun dataset (numero di acquisizioni e interferogrammi considerati, e il corrispondente intervallo temporale).

Lunghezza d'onda	5.56 cm
Risoluzione spaziale nominale	~ 20 m x 4 m
Risoluzione spaziale dei risultati interferometrici	~ 30 m x 30 m
Estensione spaziale	~190 km x 70 km
Periodo di osservazione	marzo 2015 – aprile 2026

Tabella 8. Caratteristiche principali comuni ai due dataset SAR S-1 utilizzati.

	Periodo di osservazione	Numero di acquisizioni utilizzate	Numero di interferogrammi
Discendente	22/03/2015-29/04/2026	521	3816
Ascendente	23/03/2015-30/04/2026	510	3699

Tabella 9. Caratteristiche principali relative a ciascuno dei due dataset SAR S-1 utilizzati.

2.2.1. Analisi SBAS Sentinel-1: orbite discendenti (periodo marzo 2015 – aprile 2026)

L'analisi interferometrica sull'area di interesse è stata effettuata utilizzando dati SAR acquisiti dalla costellazione S-1 lungo orbite discendenti (track 168). In particolare, come detto, sono stati utilizzati 521 dati satellitari acquisiti nel periodo marzo 2015 – aprile 2026 la cui distribuzione nel piano tempo/baseline perpendicolare è rappresentata in Figura 17. Si nota chiaramente l'aumento dei valori di baseline perpendicolare a partire dal 2023 dovuto ad un malfunzionamento del meccanismo di controllo orbitale, che ha poi portato ad una modifica nella politica di gestione delle orbite avvenuta ad Aprile 2024, con conseguente aumento del tubo orbitale. Con tali dati sono stati generati 3816 interferogrammi differenziali, a partire dai quali sono state generate le mappe di velocità media di deformazione del suolo e le corrispondenti serie temporali di deformazione.

I risultati dell'analisi interferometrica effettuata sono riportati in Figura 18, dove viene mostrata la mappa geocodificata della velocità media di deformazione, proiettata lungo la linea di vista del sensore, di seguito indicata come Line of Sight (LOS), e sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area analizzata; i punti affetti da rumore di decorrelazione, per i quali la misura di deformazione non può essere considerata affidabile, non sono mostrati.

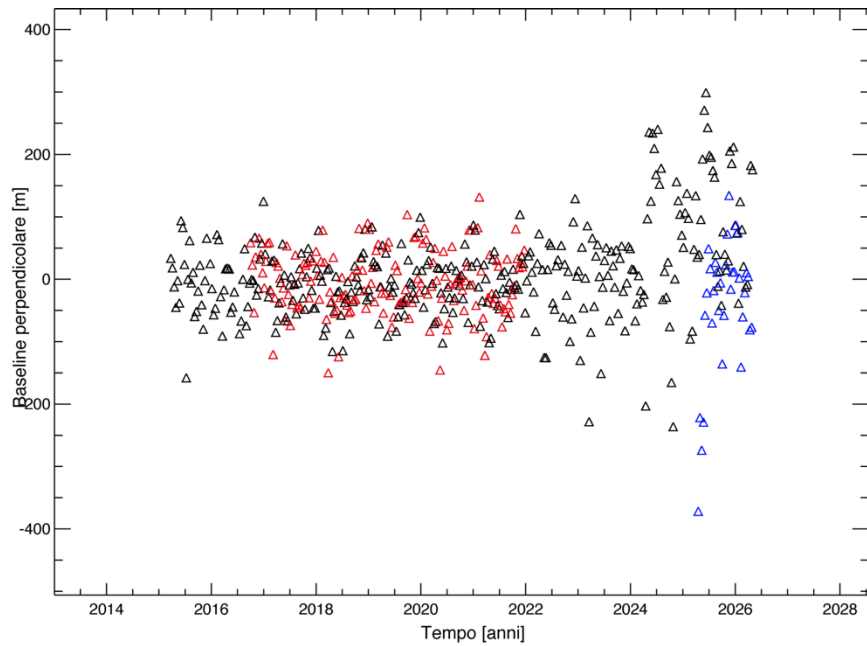


Figura 17. Distribuzione nel piano tempo/baseline perpendicolare dei dati SAR S-1 acquisiti da orbite discendenti sull'area di interesse. I triangoli neri, rossi e blu rappresentano rispettivamente i dati S-1A, S-1B e S-1C. Si segnala l'assenza di acquisizioni S-1B a partire dal dicembre 2021 e la presenza di dati S-1C a partire da aprile 2025.

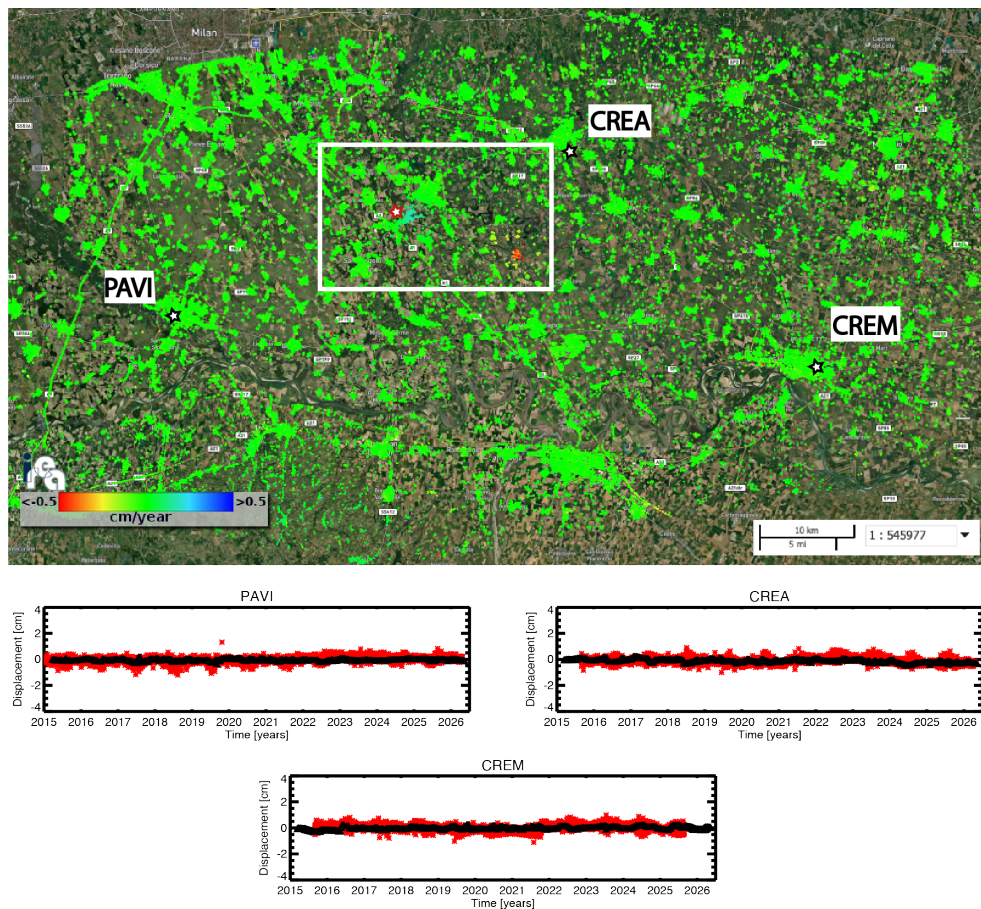


Figura 18. Mappa di velocità di deformazione in LOS, geocodificata ed espressa in cm/anno, sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area di interesse. L'immagine si riferisce alla elaborazione dei dati S-1 acquisiti da orbite

discendenti nel periodo marzo 2015 – aprile 2026. La stellina rossa nel riquadro bianco indica il sito dell'impianto di stoccaggio. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni GNSS identificate sulla mappa tramite stelline nere, i grafici dei confronti tra le serie temporali di deformazione GNSS proiettate nella linea di vista del sensore radar (asterischi rossi) e quelle ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri). Il rettangolo bianco fa riferimento alla zona analizzata in dettaglio in Figura 16.

Le serie temporali SBAS-DInSAR generate sono state confrontate con le corrispondenti serie GNSS di deformazione rese disponibili da OGS. In particolare, in Figura 18 sono evidenziate le posizioni delle tre stazioni GNSS prese in considerazione (identificate sulla mappa di deformazione tramite stelline nere) e, per ciascuna di esse, sono mostrati i grafici dei confronti tra le serie temporali di deformazione GNSS proiettate rispetto alla linea di vista del sensore radar (asterischi rossi) e quelle ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri). La stellina rossa nel riquadro bianco indica la posizione del sito di stoccaggio.

Come si evince dai grafici in Figura 18, i confronti tra le misure radar DInSAR e le misure geodetiche mostrano un ottimo accordo; ciò è anche testimoniato dai valori delle deviazioni standard delle differenze tra le due misure di deformazione, il cui valor medio è inferiore a 0.3 cm. Tale valore è consistente, se non migliore, rispetto alla stima dell'accuratezza della tecnica SBAS riportata in letteratura.

In Figura 19 viene mostrato un ingrandimento della mappa di deformazione in LOS di Figura 18 sull'area di interesse. Si riportano inoltre alcuni grafici che mostrano l'andamento temporale dello spostamento superficiale in LOS per tre punti localizzati in prossimità dell'impianto di stoccaggio a Ovest di Cornegliano Laudense (P1, P2 e P3 in Figura 19) e un punto localizzato nell'area di Turano Lodigiano (P4 in Figura 19).

L'analisi effettuata evidenzia che l'area situata a Sud-Est dell'impianto di stoccaggio, identificata dai punti P1, P2 e P3 presenta un trend di sollevamento del suolo (avvicinamento al sensore lungo la sua linea di vista) a partire dall'inizio del 2019, periodo in cui sono iniziate le attività di stoccaggio. Tale trend presenta un andamento oscillante con un'escursione massima di circa 2.5 cm, raggiunta durante gli ultimi mesi del 2025. Il comportamento deformativo rilevato presenta valori normalmente attesi e coerenti con quelli osservati in alcuni studi relativi ai comportamenti deformativi del suolo in presenza delle attività di stoccaggio di gas in serbatoi sotterranei depleti anche in Lombardia (Teatini et al, 2011; Zhou et al, 2019). Tale trend deformativo è analizzato con maggiore dettaglio nel paragrafo 2.2.4.

È inoltre chiaramente identificabile un effetto deformativo presente nell'area di Turano Lodigiano, distante 15 km dal sito di stoccaggio e quindi indipendente da questo, che conferma quanto emerso dalle precedenti analisi, con un trend di deformazione sostanzialmente lineare con un tasso che varia da 0.5 cm/anno a 1 cm/anno.

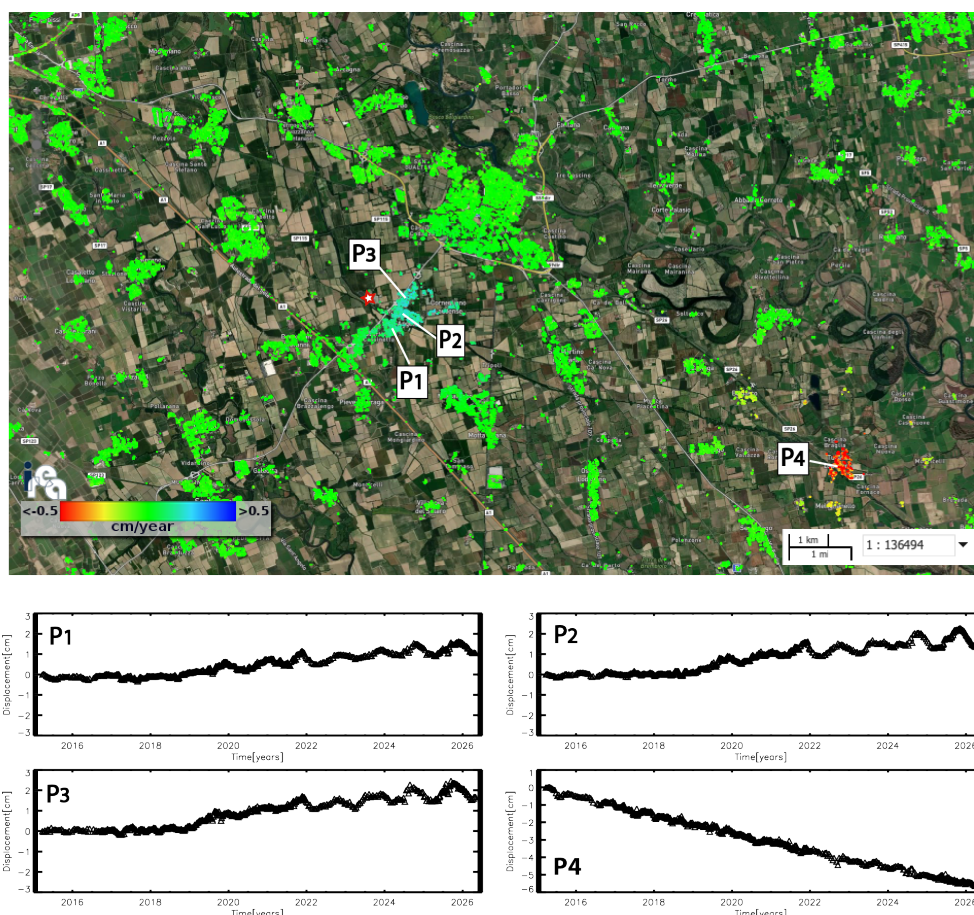


Figura 19. Zoom della mappa di velocità media di deformazione di Figura 18 in corrispondenza dell'area identificata dal rettangolo bianco, incentrato sull'area che comprende i comuni di Cornegliano Laudense e di Turano Lodigiano. La stellina con contorno rosso indica la posizione dell'impianto di stoccaggio (Cluster A). I grafici riportano l'andamento temporale dello spostamento superficiale in LOS per tre punti localizzati nei pressi di Cornegliano Laudense (P1, P2 e P3) e un punto localizzato nell'area di Turano Lodigiano (P4). L'immagine si riferisce alla elaborazione dei dati S-1 acquisiti da orbite discendenti nel periodo marzo 2015 - aprile 2026.

2.2.2. Analisi SBAS Sentinel-1: orbite ascendenti (periodo marzo 2015 – aprile 2026)

Come detto, l'analisi interferometrica sull'area di interesse è stata effettuata utilizzando dati SAR acquisiti dalla costellazione S-1 nel periodo marzo 2015 – aprile 2026 lungo orbite ascendenti (track 15). In particolare, come detto, sono stati utilizzati 510 dati satellitari, la cui distribuzione nel piano tempo/baseline perpendicolare è rappresentata in Figura 20. Si nota chiaramente l'aumento dei valori di baseline perpendicolare a partire dal 2023 dovuto ad un malfunzionamento del meccanismo di controllo orbitale, che ha poi portato ad una modifica nella politica di gestione delle orbite avvenuta ad Aprile 2024, con conseguente aumento del tubo orbitale. Con tali dati sono stati generati 3699 interferogrammi differenziali,

a partire dai quali sono state generate le mappe di velocità media di deformazione del suolo e le corrispondenti serie temporali di deformazione.

I risultati dell'analisi interferometrica effettuata sono riportati in Figura 21, dove viene mostrata la mappa geocodificata della velocità media di deformazione in LOS sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area analizzata; i punti affetti da rumore di decorrelazione, per i quali la misura di deformazione non può essere considerata affidabile, non sono mostrati.

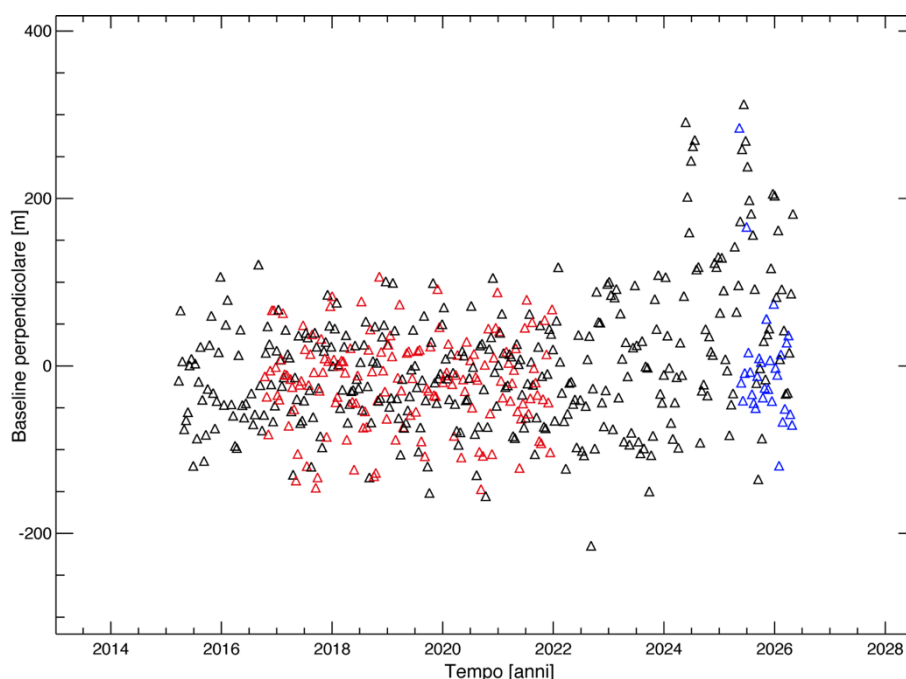


Figura 20. Distribuzione nel piano tempo/baseline perpendicolare dei dati SAR S-1 acquisiti da orbite ascendenti sull'area di interesse. I triangoli neri, rossi e blu rappresentano rispettivamente i dati S-1A, S-1B e S-1C. Si segnala l'assenza di acquisizioni S-1B a partire dal Dicembre 2021 e la presenza di dati S-1C a partire da aprile 2025.

Analogamente a quanto fatto nel paragrafo precedente, anche le serie temporali DInSAR generate dal dataset relativo alle orbite ascendenti sono state confrontate con le corrispondenti serie GNSS di deformazione rese disponibili da OGS. In particolare, in Figura 21 sono rappresentate le 3 stazioni GNSS prese in considerazione (identificate sulla mappa di deformazione tramite stelline nere) e, per ciascuna di esse, sono mostrati i grafici dei confronti tra le serie temporali di deformazione GNSS proiettate rispetto alla linea di vista del sensore radar (asterischi rossi) e quelle ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri). La stellina rossa nel riquadro bianco indica la posizione del sito di stoccaggio.

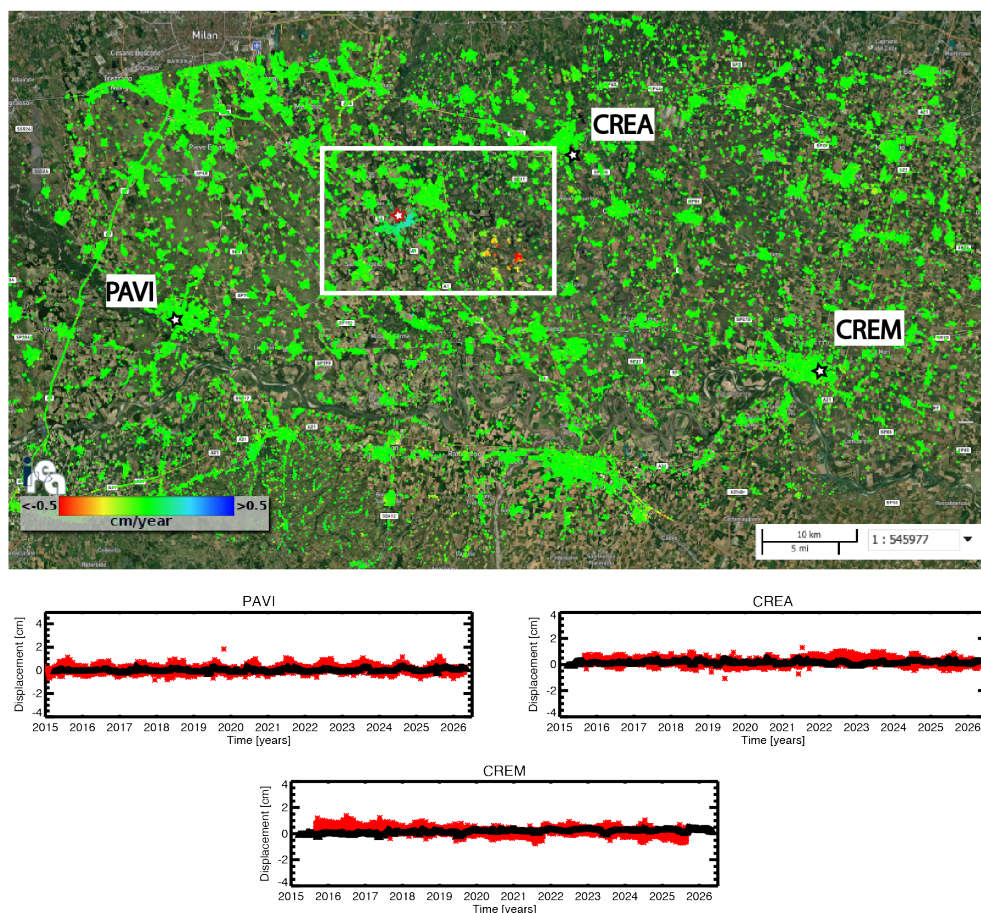


Figura 21. Mappa di velocità di deformazione in LOS, geocodificata ed espressa in cm/anno, sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area di interesse. L'immagine si riferisce alla elaborazione dei dati S-1 acquisiti da orbite ascendenti nel periodo marzo 2015 – aprile 2026. La stellina rossa nel riquadro bianco indica il sito dell'impianto di stoccaggio. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni GNSS identificate sulla mappa tramite stelline nere, i grafici dei confronti tra le serie storiche di deformazione GNSS proiettate nella linea di vista del sensore radar (asterischi rossi) e quelle ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri). Il rettangolo bianco fa riferimento alla zona analizzata in dettaglio in Figura 21.

Come si evince dai grafici in Figura 21, i confronti tra le misure DInSAR e le misure geodetiche mostrano un ottimo accordo, come anche testimoniato dai valori ottenuti delle deviazioni standard delle differenze tra le due misure di spostamento, il cui valor medio è inferiore a 0.4 cm. Tale deviazione standard è consistente con la stima dell'accuratezza della tecnica SBAS riportata in letteratura.

In Figura 22 viene mostrato un ingrandimento della mappa di deformazione in LOS di Figura 21 sull'area di interesse. Si riportano, inoltre, alcuni grafici che mostrano l'andamento temporale dello spostamento superficiale in LOS per tre punti localizzati nei pressi di Cornegliano Laudense (P1, P2 e P3 di Figura 18) e un punto localizzato nell'area di Turano Lodigiano (P4 di Figura 19).

L'analisi effettuata evidenzia che l'area situata a Sud-Est dell'impianto di stoccaggio, identificata dai punti P1, P2 e P3 presenta un trend di sollevamento del suolo (avvicinamento al sensore lungo la sua linea di vista) a partire dall'inizio del 2019, periodo in cui sono iniziate le attività di stoccaggio. Tale trend presenta un

andamento oscillante con un'escursione massima di circa 2.5 cm, raggiunta a fine 2025. Il comportamento deformativo rilevato presenta valori normalmente attesi e coerenti con quelli osservati in alcuni studi relativi ai comportamenti deformativi del suolo in presenza di attività di stoccaggio di gas anche in Lombardia (Teatini et al, 2011; Zhou et al, 2019). Tale trend deformativo è analizzato con maggiore dettaglio nel paragrafo 2.2.4. È inoltre chiaramente identificabile un effetto deformativo presente nell'area di Turano Lodigiano, distante 15 km dal sito di stoccaggio e quindi indipendente da questo, che mostra, in continuità con le analisi storiche effettuate con ERS-1/2 ed ENVISAT, un trend di deformazione sostanzialmente lineare con un tasso che varia da 0.5 cm/anno a 1 cm/anno.

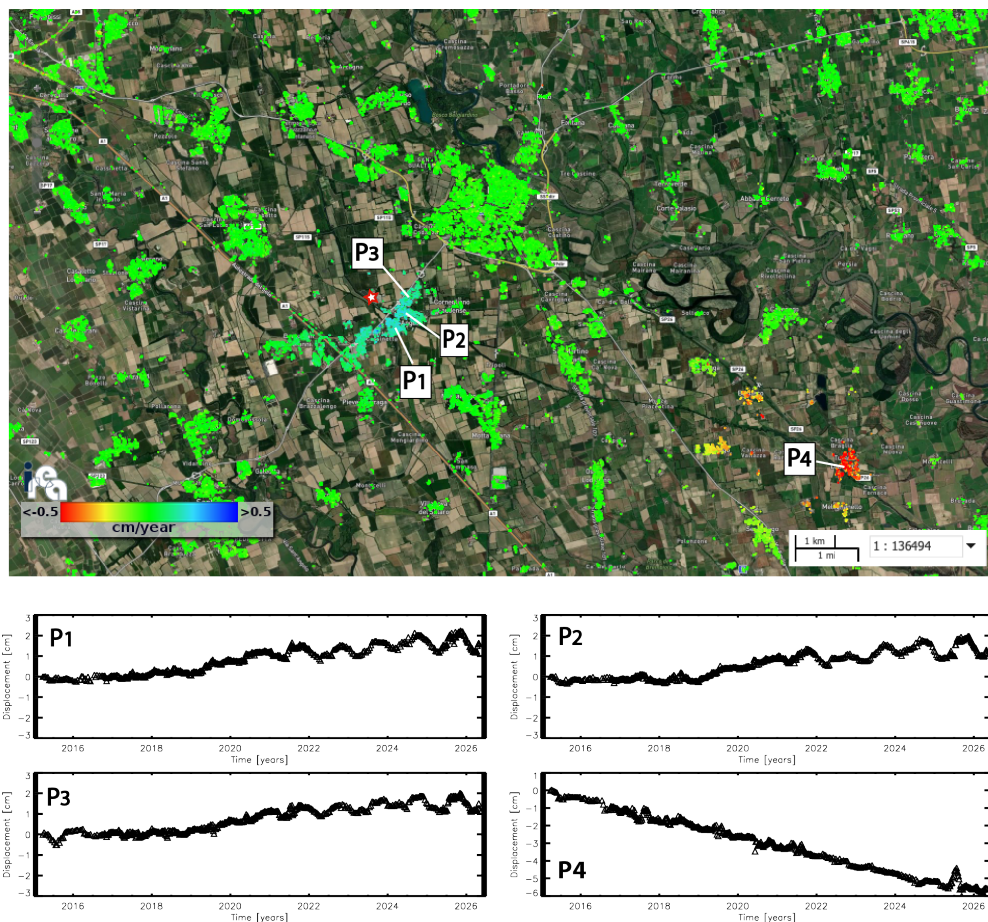


Figura 22. Zoom della mappa di velocità media di deformazione di Figura 21 in corrispondenza dell'area identificata dal rettangolo bianco, incentrato sull'area che comprende i comuni di Cornegliano Laudense e di Turano Lodigiano. La stellina con contorno rosso indica la posizione dell'impianto di stoccaggio (Cluster A). I grafici riportano l'andamento temporale dello spostamento superficiale in LOS per tre punti localizzati nei pressi di Cornegliano Laudense (P1, P2 e P3) e un punto localizzato nell'area di Turano Lodigiano (P4). L'immagine si riferisce alla elaborazione dei dati S-1 acquisiti da orbite ascendenti nel periodo marzo 2015 – aprile 2026.

2.2.3. *Analisi SBAS Sentinel-1: mappe delle componenti verticale ed Est-Ovest della deformazione superficiale*

Le mappe di velocità media relative alle componenti verticale ed Est-Ovest delle deformazioni rilevate, ottenute combinando opportunamente le informazioni ricavate dalle analisi effettuate dalle orbite ascendenti e discendenti, sono riportate nelle Figure 23 e 24, rispettivamente. Anche in questo caso, utilizzando le misure delle tre stazioni GNSS rese disponibili da OGS indicate sulle mappe, sono stati effettuati i confronti tra le serie di deformazione GNSS e quelle ottenute tramite i dati DInSAR (asterischi rossi e triangoli neri, rispettivamente). In particolare, in Figura 23 si mostrano i grafici dei confronti effettuati per la componente verticale della deformazione; le deviazioni standard delle differenze tra le due misure di spostamento presentano un valor medio pari a circa 0.3 cm. In Figura 24, analogamente, si mostrano i grafici dei confronti effettuati per la componente Est-Ovest della deformazione; in questo caso le deviazioni standard delle differenze tra le due misure di spostamento presentano un valor medio di circa 0.2 cm.

Da tale analisi si evince che in entrambi i casi i confronti tra le misure DInSAR e le misure geodetiche mostrano un ottimo accordo e i valori di deviazione standard sono consistenti con le accuratezze della tecnica SBAS riportate in letteratura.

Le Figure 25 e 26 mostrano le mappe delle velocità medie di deformazione relative, rispettivamente, alla componente verticale ed Est-Ovest dello spostamento e rappresentano un ingrandimento della zona identificata dal rettangolo bianco nelle Figure 23 e 24. Sono inoltre rappresentati i grafici relativi all'andamento temporale della deformazione di quattro punti selezionati. L'analisi effettuata evidenzia che l'area situata a Sud-Est dell'impianto di stoccaggio, identificata dai punti P1, P2 e P3 presenta un trend di sollevamento del suolo a partire dall'inizio del 2019 con una velocità media variabile tra 0.5 e 1 cm all'anno. Consistentemente con l'effetto di sollevamento, la suddetta area mostra anche delle lievi deformazioni in direzione Est-Ovest. Tale fenomeno di deformazione è analizzato con maggior dettaglio nel paragrafo che segue.

Inoltre, i risultati mostrano un significativo effetto deformativo nell'area di Turano Lodigiano, distante 15 km dal sito di stoccaggio e quindi indipendente da questo, avente una significativa componente verticale (vedi plot del punto P4) con un tasso il cui valore è compreso tra 0.5 cm/anno e 1 cm/anno.

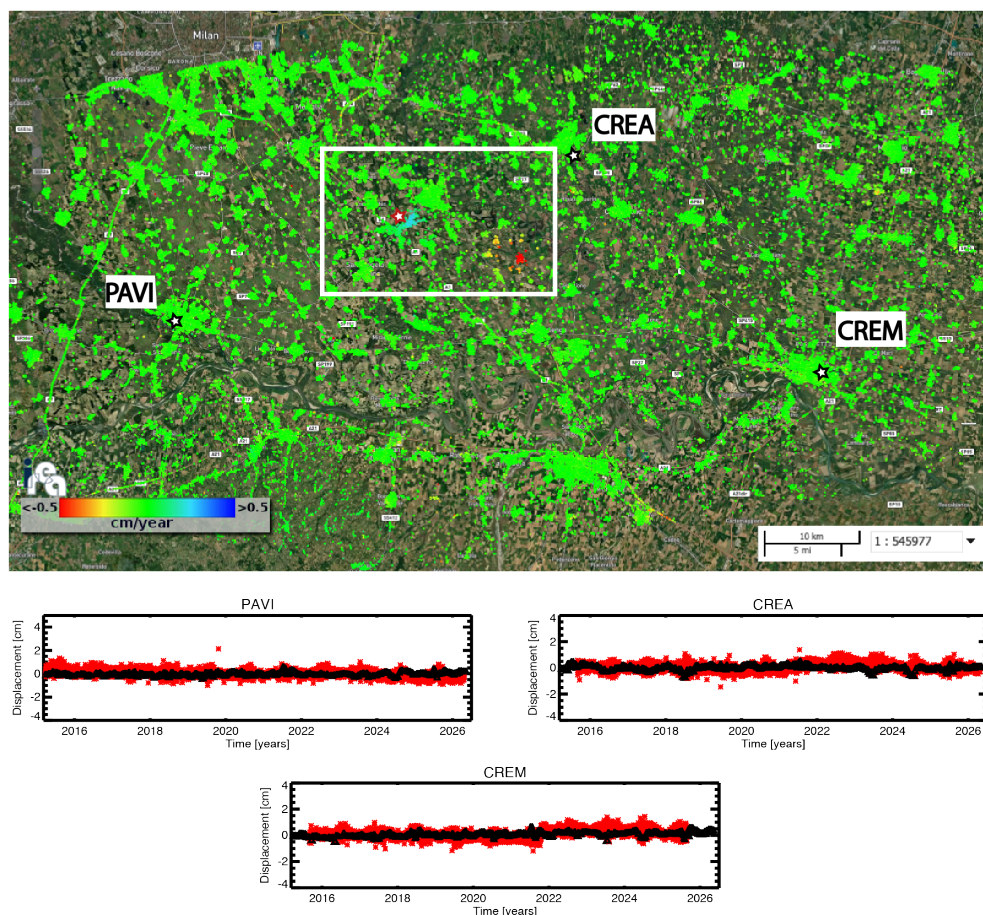


Figura 23. Mappa della componente verticale della velocità di deformazione, geocodificata ed espressa in cm/anno, sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area di interesse. La stellina rossa nel riquadro bianco indica il sito dell'impianto di stoccaggio. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni GNSS identificate sulla mappa tramite stelline nere, i grafici dei confronti tra la componente verticale delle serie storiche di deformazione GNSS (asterischi rossi) e quella ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri). Il rettangolo bianco fa riferimento alla zona analizzata in dettaglio in Figura 25.

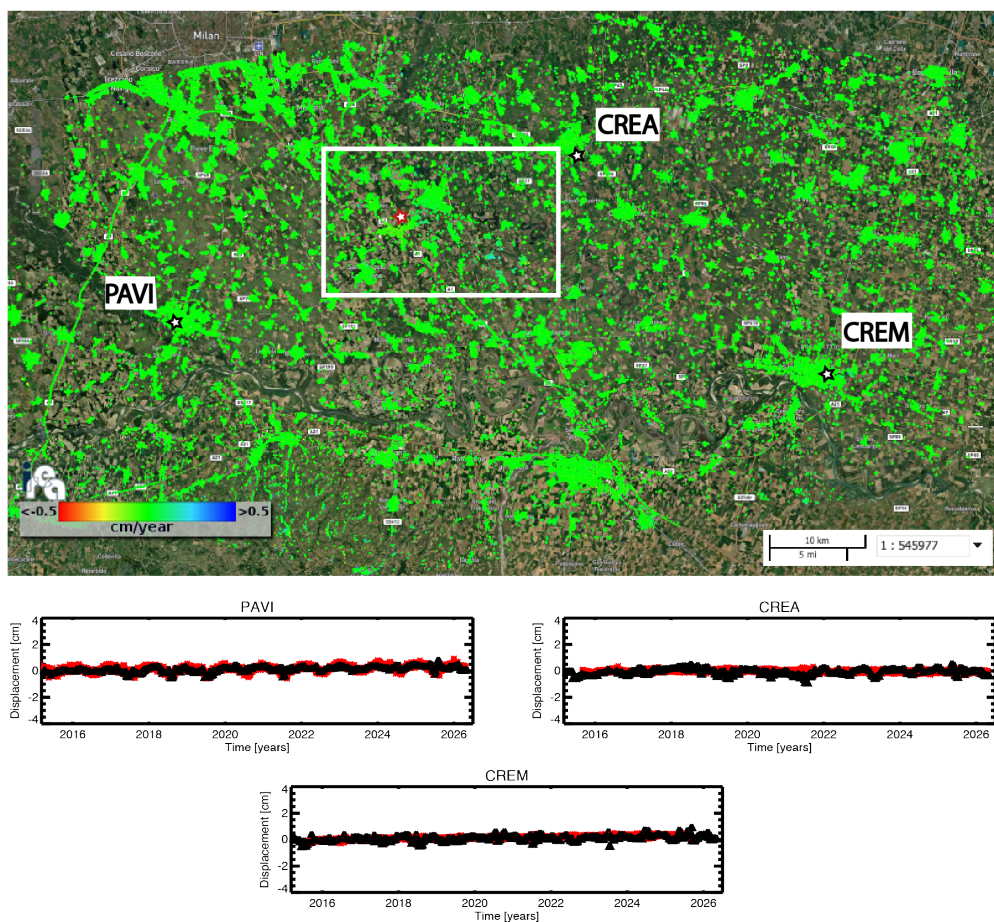


Figura 24. Mappa della componente Est-Ovest della velocità di deformazione, geocodificata ed espressa in cm/anno, sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area di interesse. La stellina rossa nel riquadro bianco indica il sito dell'impianto di stoccaggio. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni GNSS identificate sulla mappa tramite stelline nere, i grafici dei confronti tra le serie storiche di deformazione GNSS in direzione Est-Ovest (asterischi rossi) e quelle ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri). Il rettangolo bianco fa riferimento alla zona analizzata in dettaglio in Figura 26.

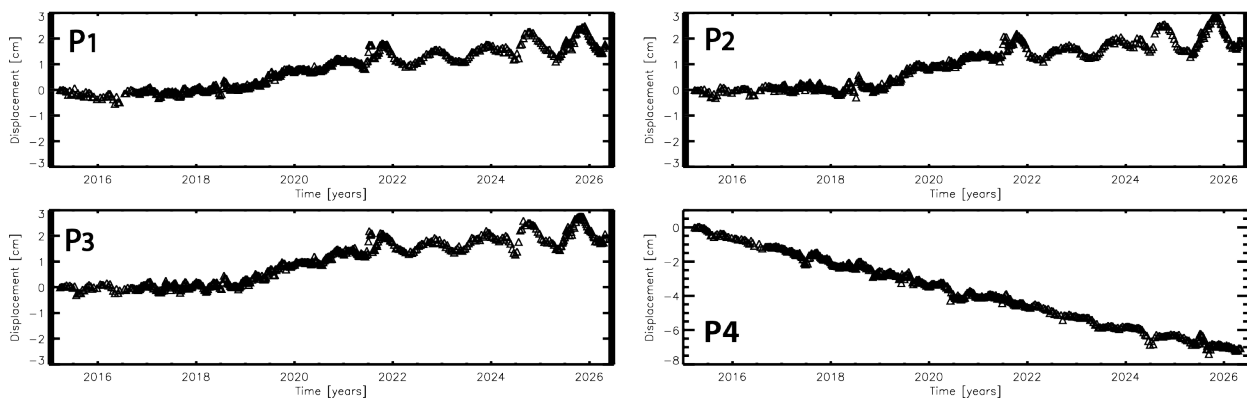


Figura 25. Zoom della mappa della componente verticale della velocità media di deformazione di Figura 23 in corrispondenza del riquadro bianco, incentrato sull'area che comprende i comuni di Cornegliano Laudense e di Turano Lodigiano. La stellina rossa indica la posizione dell'impianto di stoccaggio (Cluster A). I grafici riportano l'andamento temporale della componente verticale dello spostamento superficiale per tre punti localizzati in prossimità di Cornegliano Laudense (P1, P2 e P3) e un punto localizzato nell'area di Turano Lodigiano (P4).

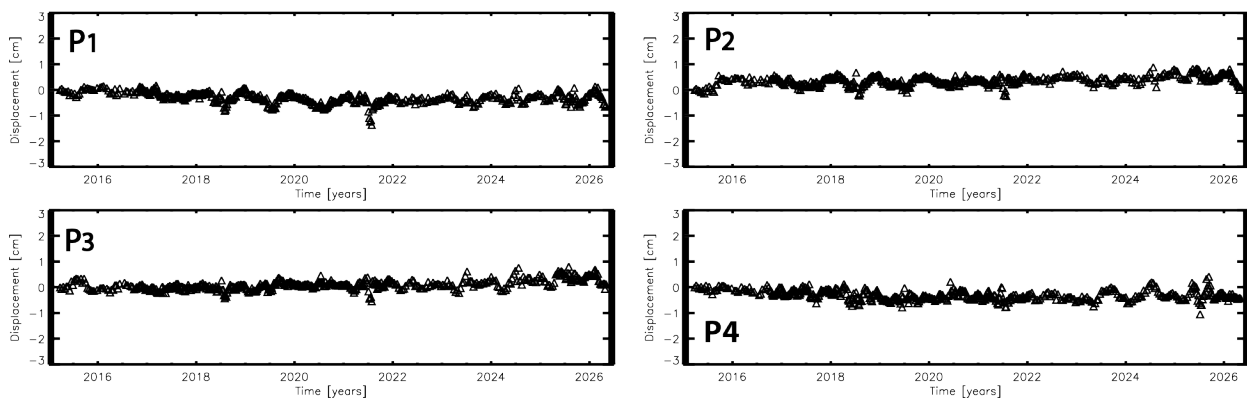


Figura 26. Zoom della mappa della componente Est-Ovest della velocità media di deformazione Figura 24 in corrispondenza del riquadro bianco, incentrato sull'area che comprende i comuni di Cornegliano Laudense e di Turano Lodigiano. La stellina rossa indica la posizione dell'impianto di stoccaggio (Cluster A). I grafici riportano l'andamento temporale della componente Est-Ovest dello spostamento superficiale per tre punti localizzati in prossimità di Cornegliano Laudense (P1, P2 e P3) e un punto localizzato nell'area di Turano Lodigiano (P4).

2.2.4. Analisi SBAS Sentinel-1: uno zoom sull'area in deformazione in prossimità del sito di stoccaggio di Cornegliano Laudense

Dalle analisi SBAS svolte nei precedenti paragrafi, effettuate con i dati Sentinel-1 acquisiti sia da orbite discendenti, sia ascendenti e con la combinazione delle due orbite, si evince che l'area a Sud-Est dell'impianto di stoccaggio, identificata dai punti P1, P2 e P3 nelle Figure 19, 22, 25 e 26, mostra un effetto deformativo di

sollevamento del suolo a partire dall'inizio del 2019 con velocità media variabile tra 0.5 e 1 cm all'anno. Consistentemente con l'effetto di sollevamento, la suddetta area mostra anche delle lievi deformazioni in direzione Est-Ovest. Questo paragrafo è finalizzato a mostrare con maggior dettaglio tali fenomeni. In particolare, nelle Figure 27 e 28 sono rappresentati, rispettivamente, gli ingrandimenti delle mappe delle componenti verticale ed Est-Ovest della velocità di deformazione sull'area di Cornegliano Laudense situata in prossimità del sito di stoccaggio con le serie temporali dello spostamento superficiale di alcuni pixel scelti nell'area caratterizzata dalla maggior deformazione rilevata.

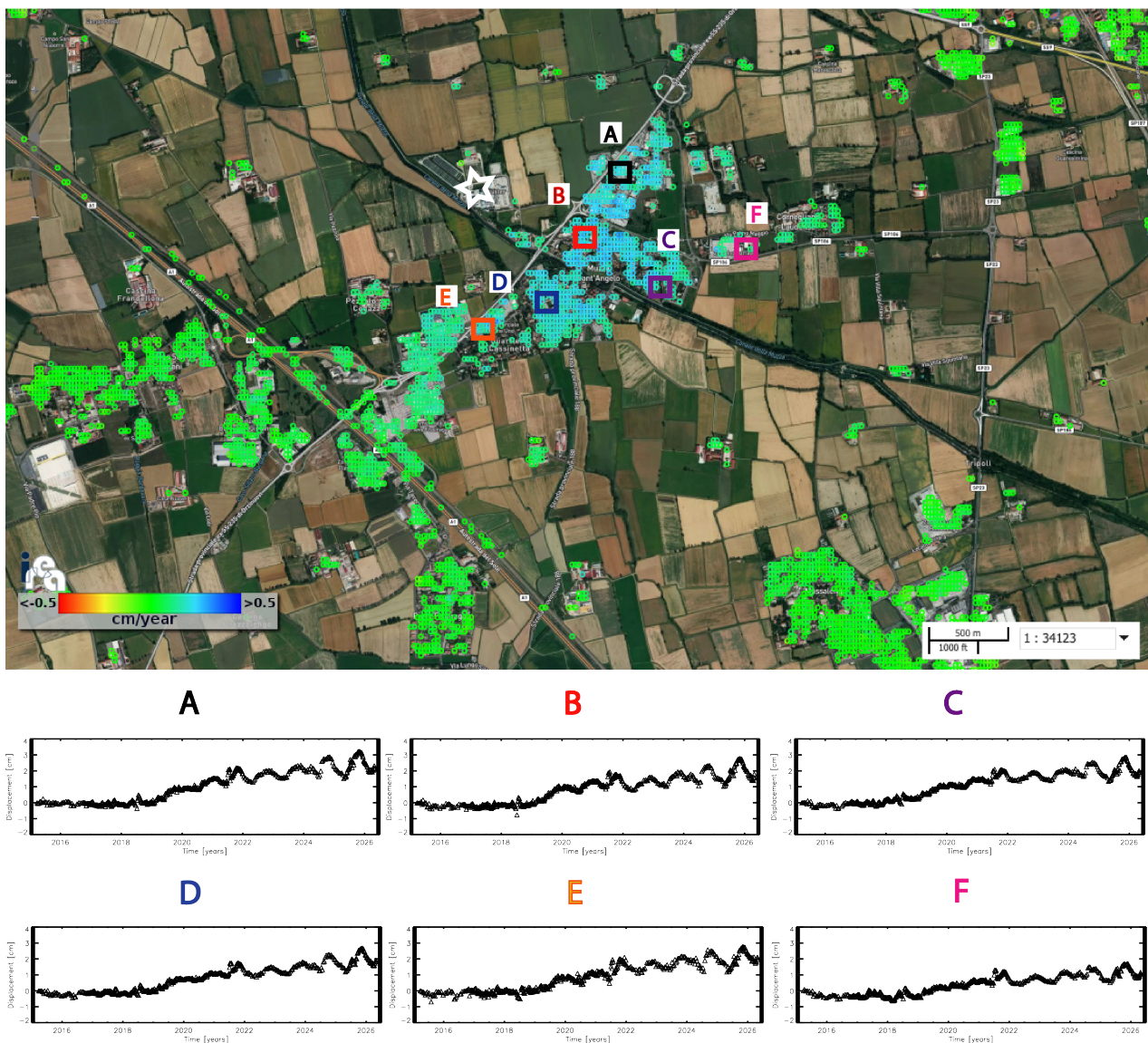


Figura 27. Zoom della mappa della componente verticale della velocità di deformazione sull'area di Cornegliano Laudense situata in prossimità del sito di stoccaggio (la stellina bianca corrisponde al Cluster A). Sono inoltre mostrate le serie temporali della componente verticale dello spostamento superficiale di tutti i pixel evidenziati tramite i rettangoli colorati A-F sulla mappa di deformazione.

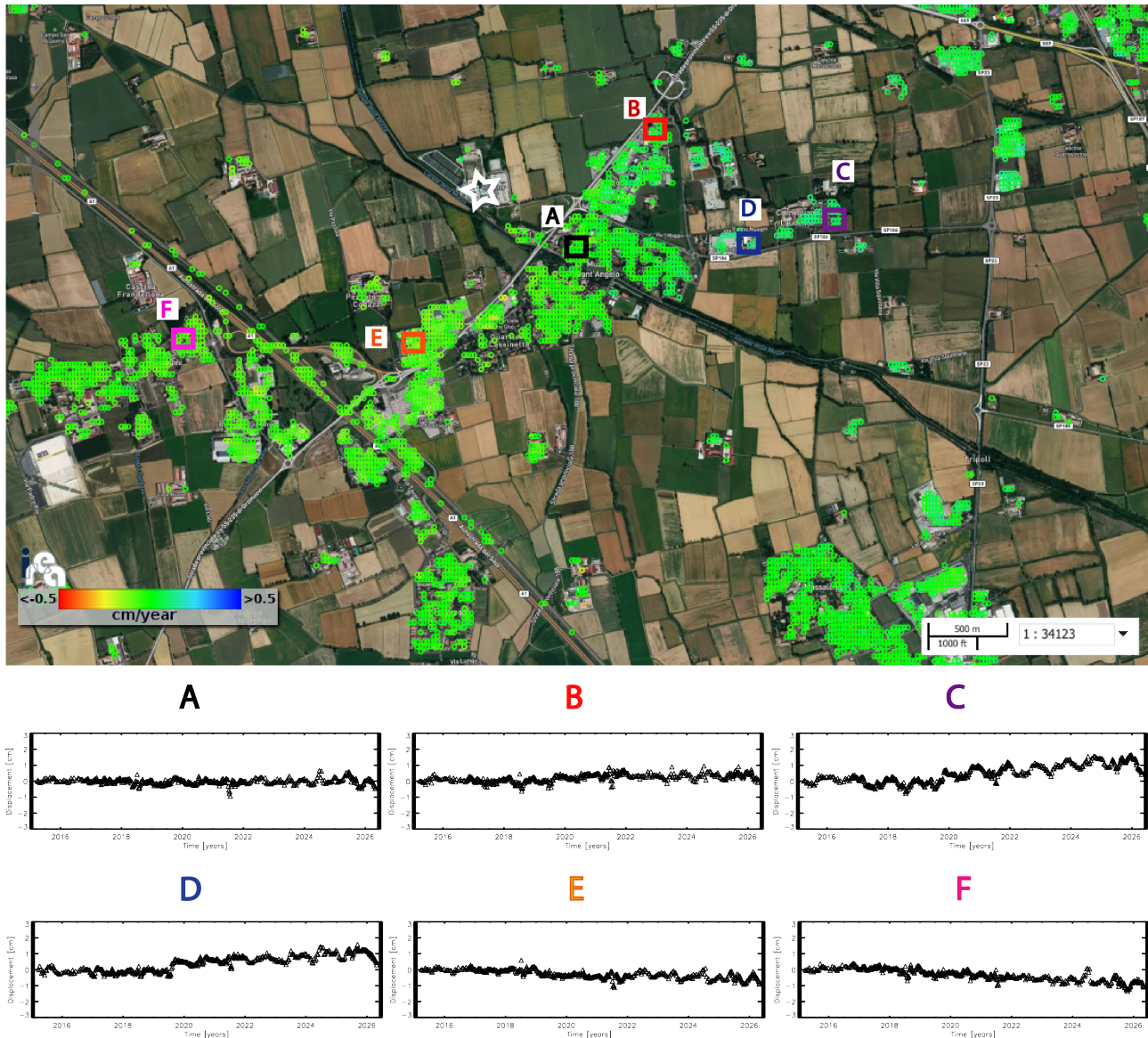


Figura 28. Zoom della mappa della componente Est-Ovest della velocità di deformazione sull'area di Cornegliano Laudense situata in prossimità del sito di stoccaggio (la stellina bianca corrisponde al Cluster A). Sono inoltre mostrate le serie temporali della componente Est-Ovest dello spostamento superficiale di tutti i pixel evidenziati tramite i rettangoli colorati A-F sulla mappa di deformazione.

In Figura 27 si mostrano le serie temporali della componente verticale dello spostamento del suolo di tali pixel. Dai grafici si evince chiaramente che tutta la zona è caratterizzata da un effetto deformativo prevalentemente in direzione verticale avente un trend di sollevamento del suolo con andamento oscillante e velocità variabile tra 0.5 e 1 cm all'anno, ed un'escursione massima maggiore di 2.5 cm raggiunta durante gli ultimi mesi del 2025.

In Figura 28 si mostrano le serie temporali della componente Est-Ovest dello spostamento del suolo di tali pixel. Dai grafici si evince che la zona immediatamente ad Est del sito di stoccaggio è caratterizzata da spostamenti del suolo in direzione Est con valori che raggiungono al massimo 2 cm (punti B, C e D di Fig. 28),

mentre nella zona ad Ovest del sito di stoccaggio si rilevano degli spostamenti in direzione Ovest con valori massimi di 1 cm (punti E ed F di Fig. 28). Dall'osservazione congiunta delle Figure 27 e 28 si rileva un effetto deformativo compatibile con una leggera inflazione.

Il comportamento deformativo osservato è in linea con quelli rilevati e studiati in altri siti caratterizzati da attività di stoccaggio del gas anche in Lombardia (Teatini et al, 2011; Zhou et al, 2019), dove si mostra che la deformazione superficiale segue inizialmente la fase di caricamento del deposito di stoccaggio per poi oscillare intorno ad un valore medio in accordo alla ciclicità delle operazioni. Va altresì rilevato che il fenomeno deformativo appare distribuito uniformemente sui punti campionati, con livelli ridotti di variazione locale delle deformazioni.

3. CONCLUSIONI

Monitoraggio sismico

L'infrastruttura di monitoraggio denominata RMCL, costituita da 10 stazioni sismometriche (collocate sia in pozzo che in superficie) e da una stazione di posizionamento satellitare (GNSS), è operativa dal 1° gennaio 2017. Il presente rapporto riguarda il semestre compreso tra il 01/11/2025 e il 30/4/2026, corrispondente alla fase di produzione dell'ottavo anno di esercizio dello stoccaggio.

Nel semestre in esame, l'infrastruttura di monitoraggio ha funzionato regolarmente senza interruzioni di rilievo. Durante tale periodo sono stati registrati due eventi sismici all'interno dei domini di rilevazione della rete RMCL. La sismicità rilevata rientra pienamente nel quadro della sismicità naturale di fondo già documentato nelle precedenti relazioni.

Monitoraggio delle deformazioni superficiali

Per ciascun sito della Rete GNSS Lodi sono state calcolate le serie temporali fino al 30/04/2026 nei due sistemi di riferimento: ITRF08, riferito al centro di massa della Terra, ed EURA, solidale con la placca continentale europea. La stazione LODI presenta uno spostamento marcato verso Nord-Ovest e verso l'alto, in continuità con quanto già rilevato nei periodi precedenti. Persiste tuttora il discostamento di tale stazione rispetto a quelle circostanti, con una componente di spostamento orizzontale in direzione Nord-Ovest e verticale verso l'alto a partire dal 2019.

È stata inoltre eseguita l'analisi della distribuzione spaziale delle deformazioni superficiali e della loro evoluzione temporale nell'area di interesse mediante l'utilizzo di dati Radar ad Apertura Sintetica (SAR). I dati sono stati elaborati tramite la tecnica avanzata di Interferometria Differenziale SAR (DInSAR), nello specifico l'algoritmo P-SBAS (Parallel Small BAseline Subset) sviluppato presso l'IREA-CNR. In particolare, sono state generate mappe e serie temporali di deformazione superficiale utilizzando sia dati di archivio, sia di acquisizioni recenti fino al 30/04/2025.

Per quanto concerne il periodo pregresso compreso tra maggio 1993 e ottobre 2010, l'analisi interferometrica effettuata con i dati acquisiti dai satelliti ERS-1/2 ed ENVISAT, sia su orbite discendenti sia ascendenti, non aveva evidenziato spostamenti significativi superiori a 2–3 mm/anno nell'area di interesse. Un'unica eccezione riguarda deformazioni altamente localizzate e di un effetto deformativo di rilievo nell'area di Turano Lodigiano, caratterizzato da un andamento sostanzialmente lineare, con un tasso di circa 1 cm/anno. Risultati analoghi erano stati riscontrati dall'analisi delle mappe di velocità media di deformazione, riferite alle componenti verticale ed Est-Ovest dello spostamento superficiale; tali rilievi hanno confermato la presenza di una deformazione significativa a scala locale nella medesima area con un

tasso di circa 1 cm/anno nella componente verticale e di circa 0.5 cm/anno nella direzione Est-Ovest. Considerata la distanza di circa 15 km tra il comune di Turano Lodigiano e il sito di stoccaggio, si ritiene che la deformazione osservata non sia riconducibile né correlata alle attività di stoccaggio.

L'analisi interferometrica condotta sulle più recenti acquisizioni dei sensori Sentinel-1 (S-1) risulta coerente con i risultati evidenziati nel precedente rapporto. In particolare, si conferma che, a partire dall'inizio del 2019, le mappe e le serie temporali di deformazione derivate da orbite sia discendenti sia ascendenti mostrano un effetto deformativo nell'area di Cornegliano Laudense, in prossimità del sito di stoccaggio. Tale effetto presenta una significativa componente verticale, caratterizzata da un *trend* di sollevamento del suolo con andamento oscillante e velocità variabile tra 0.5 e 1 cm all'anno, con un'escursione massima superiore ai 3 cm raggiunta negli ultimi mesi del 2025. Si rileva inoltre una lieve componente orizzontale Est-Ovest, con uno spostamento massimo di circa 2 cm verso Est nella porzione orientale del sito e di circa 1 cm verso Ovest nella porzione occidentale. Il comportamento deformativo osservato è compatibile con una leggera inflazione (rigonfiamento) del suolo; tale fenomeno è atteso e coerente con quanto rilevato e studiato in altri siti interessati da attività di stoccaggio del gas, nei quali la deformazione superficiale segue inizialmente la fase di caricamento del serbatoio per poi oscillare attorno a un valore medio in funzione della ciclicità delle operazioni. Il fenomeno appare distribuito in modo uniforme sui punti campionati, con livelli di deformazione locale ridotti, le cui stime verranno perfezionate con il prosieguo del monitoraggio.

Le analisi sui dati S-1 confermano altresì le deformazioni fortemente localizzate già note nell'area di Turano Lodigiano, caratterizzate da una significativa componente verticale con *trend* sostanzialmente lineare e un tasso di subsidenza fino a circa 1 cm/anno. Trattandosi di fenomeni deformativi già evidenti nelle serie storiche ERS-ENVISAT e data la distanza di circa 15 km dal sito di stoccaggio di Cornegliano Laudense, si ritiene che tali non siano correlate con le attività del sito stesso.

Infine, è stata eseguita un'analisi di dettaglio dei risultati SBAS mediante il confronto tra le misure di spostamento DInSAR e le corrispondenti misure GNSS. Tali comparazioni hanno mostrato scarti con deviazioni standard tra le misure di spostamento DInSAR e quelle geodetiche non superiori a 0.4 cm, confermando una piena congruenza con i livelli di accuratezza della tecnica SBAS riportati nella letteratura scientifica.

Bibliografia

Altamimi, Z., Rebischung, P., Métivier, L., and Collilieux, X. (2016). ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, doi:10.1002/2016JB013098.

Altamimi, Z., Métivier, L., Rebischung, P., Rouby, H., Collilieux, X. (2017). ITRF2014 plate motion model, *Geophysical Journal International*, 209(3), 1906–1912, doi:10.1093/gji/ggx136, 2017.

Bragato, P. L. e Tonto, A. (2005). Local Magnitude in Northeastern Italy. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 95(2):579–591.

Floyd, M. A., and Herring, T. A. (2019). Fast statistical approaches to geodetic time series analysis. In J. P. Montillet & M. Bos (Eds.), *Geodetic Time Series Analysis in Earth Sciences* Bos and Montillet, Springer Geophysics. Cham: Springer. doi:10.1007/978-3-030-21718-1.

Garbin, M., and E. Priolo (2013). Seismic event recognition in the Trentino area (Italy): Performance analysis of a new semi-automatic system, *Seismol. Res. Lett.* 84, 65–74, doi: 10.1785/0220120025.

Guidarelli M. et al. (2022). Concessione di stoccaggio di gas naturale “Cornegliano Stoccaggio”. Monitoraggio sismico e delle deformazioni superficiali. Anno di esercizio 2022 – Relazione semestrale. Rel. OGS 2023/7 Sez. CRS 1.

Guidarelli M. et al. (2024). Concessione di stoccaggio di gas naturale “Cornegliano Stoccaggio”. Monitoraggio sismico e delle deformazioni superficiali. Anno di esercizio 2023 – Seconda relazione annuale 2023.2. Rel. OGS 2024/7.

Herring, T.A., King, R.W., Floyd, M.A., and McClusky, S.C (2018). Introduction to GAMIT/GLOBK Introduction to 680 GAMIT/GLOBK, Release 10.7. Available at: http://geoweb.mit.edu/gg/docs/Intro_GG.pdf.

Lahr, J. C. (1984). HYPOELLIPSE/VAX: A Computer Program for Determining Local Earthquake Hypocentral Parameters, Magnitude and First-Motion Pattern, US Geological Survey Open-File Report, 84-519, 76 pp.

Masson C., Mazzotti S. and Vernant, P. (2019). Precision of continuous GPS velocities from statistical analysis of synthetic time series, *Solid Earth*, 10, 329–342, doi:10.5194/se-10-329-2019.

MiSE-UNMIG (2014). Indirizzi e linee guida per il monitoraggio della sismicità, delle deformazioni del suolo e delle pressioni di poro nell’ambito delle attività antropiche, 38 pp.; https://unmig.mase.gov.it/wp-content/uploads/2018/07/85_238.pdf.

OGS (Istituto Nazionale Di Oceanografia E Di Geofisica Sperimentale) (2016): Friuli Regional Deformation Network Data Center (1.0), OGS (Istituto Nazionale Di Oceanografia E Di Geofisica Sperimentale) [data set], <https://doi.org/10.6092/frednet>.

Priolo E. et al. (2017). Progetto per la realizzazione dell’infrastruttura di monitoraggio sismico per la concessione di stoccaggio di gas naturale “Cornegliano Stoccaggio” presso Cornegliano Laudense (LO). Relazione conclusiva sulla realizzazione dell’infrastruttura. OGS, Sgonico, 6 febbraio 2017. Rel. OGS 2017/13 Sez. CRS 3.

Priolo E. et al. (2018). Progetto per la realizzazione dell’infrastruttura di monitoraggio sismico per la concessione di stoccaggio di gas naturale “Cornegliano Stoccaggio” presso Cornegliano Laudense (LO). Relazione completa sulle attività iniziali. OGS, Sgonico, 13 novembre 2018. Rel. OGS 2018/77 Sez. CRS 23.

Priolo E. et al. (2021). Concessione di stoccaggio di gas naturale “Cornegliano Stoccaggio”. Monitoraggio sismico e delle deformazioni superficiali. Anno di esercizio 2021 – Seconda relazione annuale. Rel. OGS 2022/57 Sez. CRS 2 SISMIND.

Priolo E. et al. (2022). Concessione di stoccaggio di gas naturale “Cornegliano Stoccaggio”. Monitoraggio sismico e delle deformazioni superficiali. Anno di esercizio 2022 – Relazione semestrale. Rel. OGS 2022/99 Sez. CRS 18.

Priolo E., Laurenzano G., Barnaba C., Bernardi P., Moratto L. and Spinelli A. (2012). OASIS - The OGS Archive System of Instrumental Seismology. In: M. Mucciarelli (Ed.), *Tecniche Sperimentali per la Stima dell'Amplificazione Sismica, Studi teorici ed applicazioni professionali*, Aracne Ed., 431-445.

Priolo E., Laurenzano G., Barnaba C., Bernardi P., Moratto L. and Spinelli A. (2015a). OASIS - The OGS Archive System of Instrumental Seismology. *Seismological Research Letters*, 86, 978-984, doi: 10.1785/0220140175. Available at <http://srl.geoscienceworld.org/content/early/2015/02/18/0220140175.full.pdf>.

Priolo E., Romanelli M., Plasencia-Linares M. P., Garbin M., Peruzza L., Romano M. A., Marotta P., Bernardi P., Moratto L., Zuliani D. and Fabris P. (2015b). Seismic Monitoring of an Underground Natural Gas Storage Facility – The Collalto Seismic Network. *Seismological Research Letters*, 86, 1, 109-123 + Electronic Supplement.

Teatini, P., Castelletto, N., Ferronato, M., Gambolati, G., Janna, C., Cairo, E., Marzorati, D., Colombo, D., Ferretti, A., Bagliani, A., Bottazzi, F., (2011). Geomechanical response to seasonal gas storage in depleted reservoirs: A case study in the Po River basin, Italy, *J. Geophys. Res.*, 116, F02002, doi:10.1029/2010JF001793.

Tunini L., Zuliani D., Magrin A. (2022). Applicability of Cost-Effective GNSS Sensors for Crustal Deformation Studies. *Sensors*, no. 1: 350. <https://doi.org/10.3390/s22010350>.

Tunini L., Magrin A., Rossi G., and Zuliani D. (2024). Global Navigation Satellite System (GNSS) time series and velocities about a slowly convergent margin processed on high-performance computing (HPC) clusters: products and robustness evaluation, *Earth Syst. Sci. Data*, 16, 1083–1106, <https://doi.org/10.5194/essd-16-1083-2024>. Dataset on Zenodo: <https://doi.org/10.5281/zenodo.8055800>.

Zhou, P., Yang, H., Wang, B., & Zhuang, J. (2019). Seismological investigations of induced earthquakes near the Hutubi underground gas storage facility. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124. <https://doi.org/10.1029/2019JB017360>.

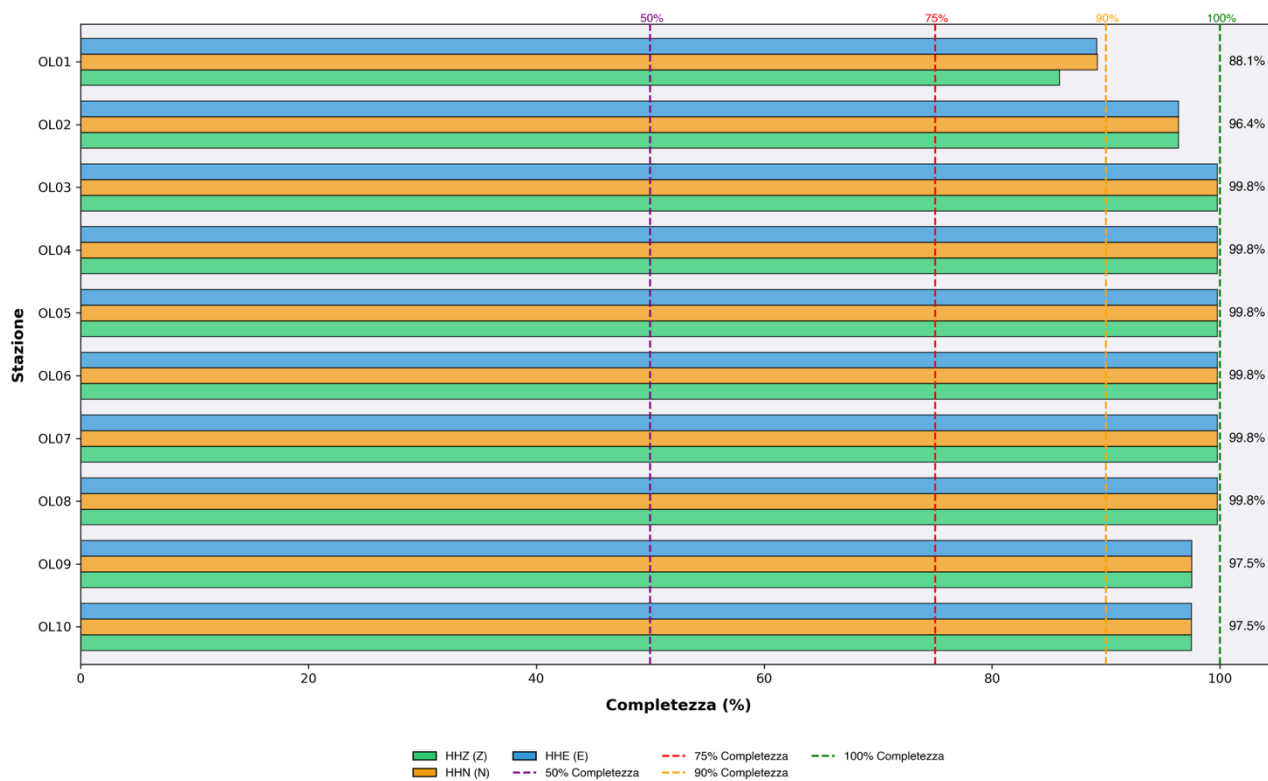
Appendice A – Disponibilità dei dati registrati dalla RMCL

I grafici illustrano la disponibilità e la completezza dei dati della Rete OL nel periodo 1° novembre 2025 – 30 aprile 2026. Ciascun pannello si riferisce a un singolo mese d'indagine e include due rappresentazioni grafiche:

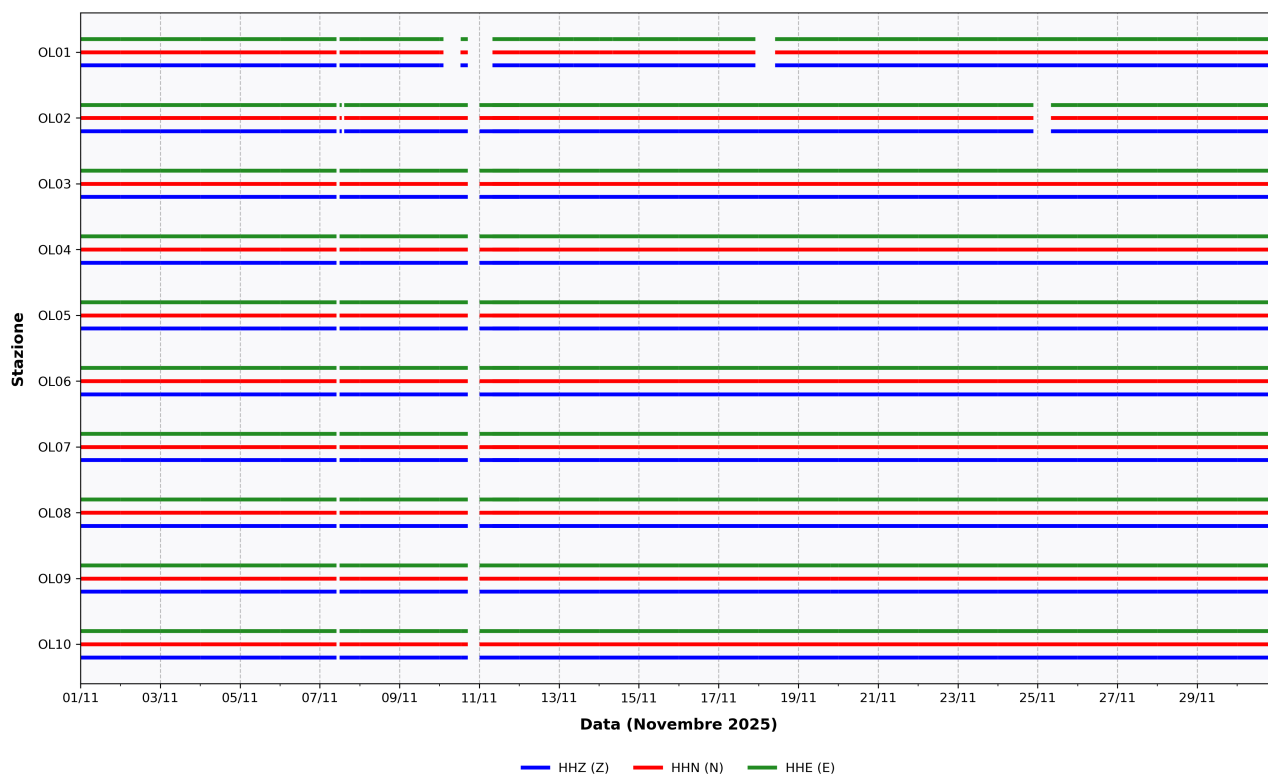
- Istogramma orizzontale (completezza dei dati): mostra la percentuale mensile di dati registrati per ogni stazione (OL01–OL10) e per ciascun canale (HHZ, HHN, HHE), evidenziando le soglie di riferimento (50%, 75%, 90% e 100%).
- Diagramma di disponibilità temporale: illustra la continuità del segnale e la presenza di eventuali gap/interruzioni di registrazione nel corso del mese per tutti i canali attivi.

Novembre 2025

Istogramma Orizzontale della Completezza dei Dati (Novembre 2025) per Stazione e Canale (Rete OL)

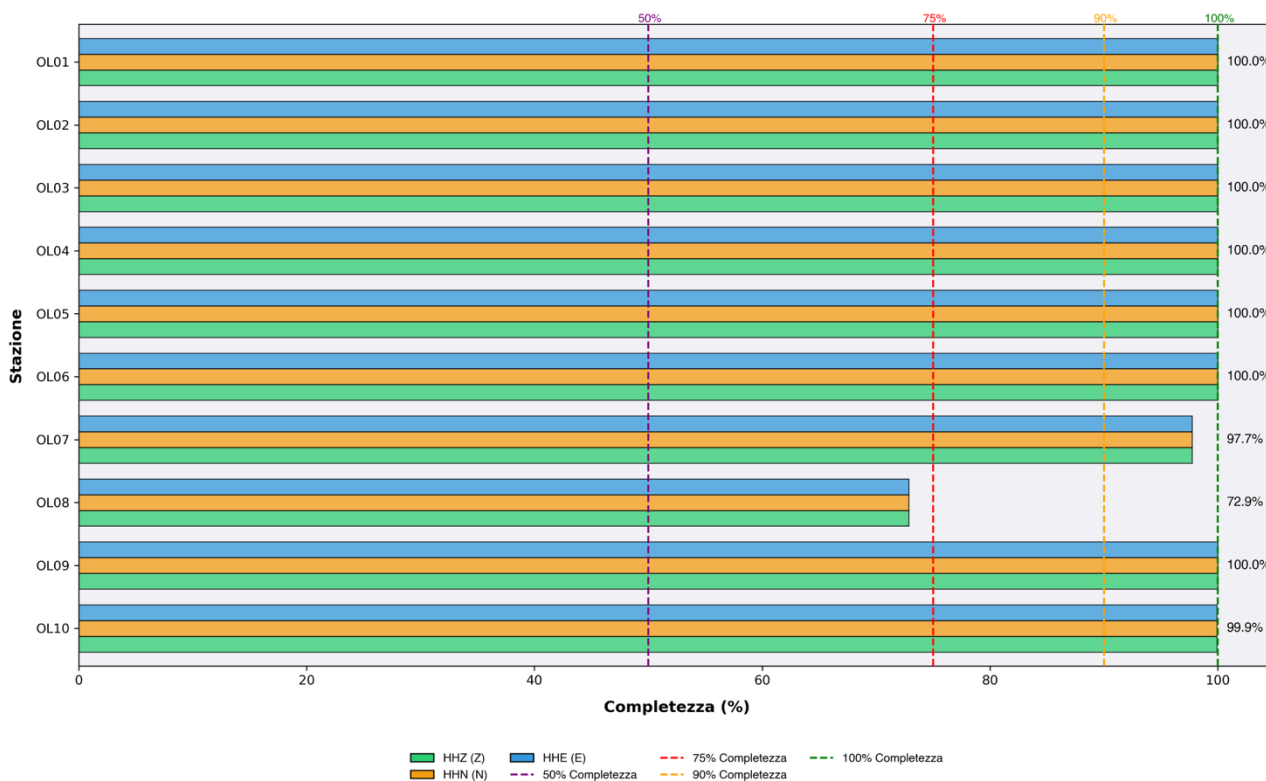


Disponibilità Temporale del Segnale e Gap (Novembre 2025) - Rete OL

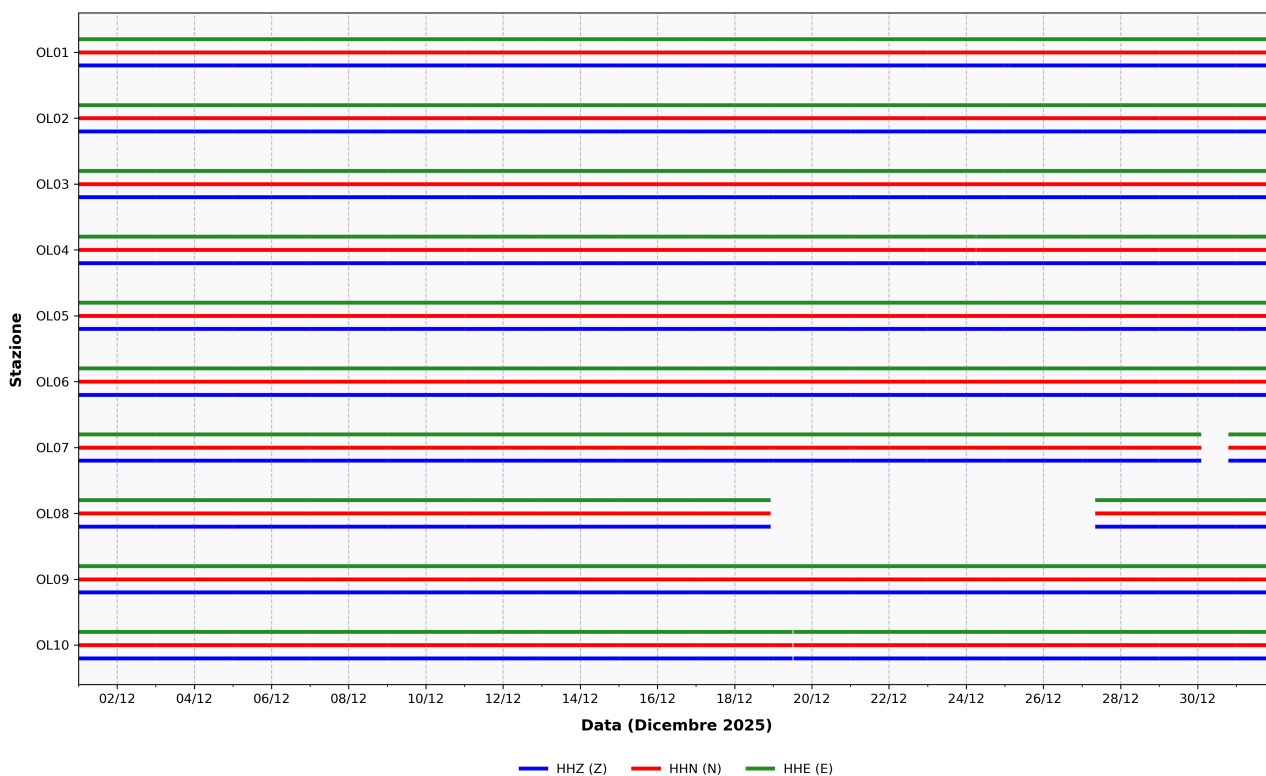


Dicembre 2025

Istogramma Orizzontale della Completezza dei Dati (Dicembre 2025) per Stazione e Canale (Rete OL)

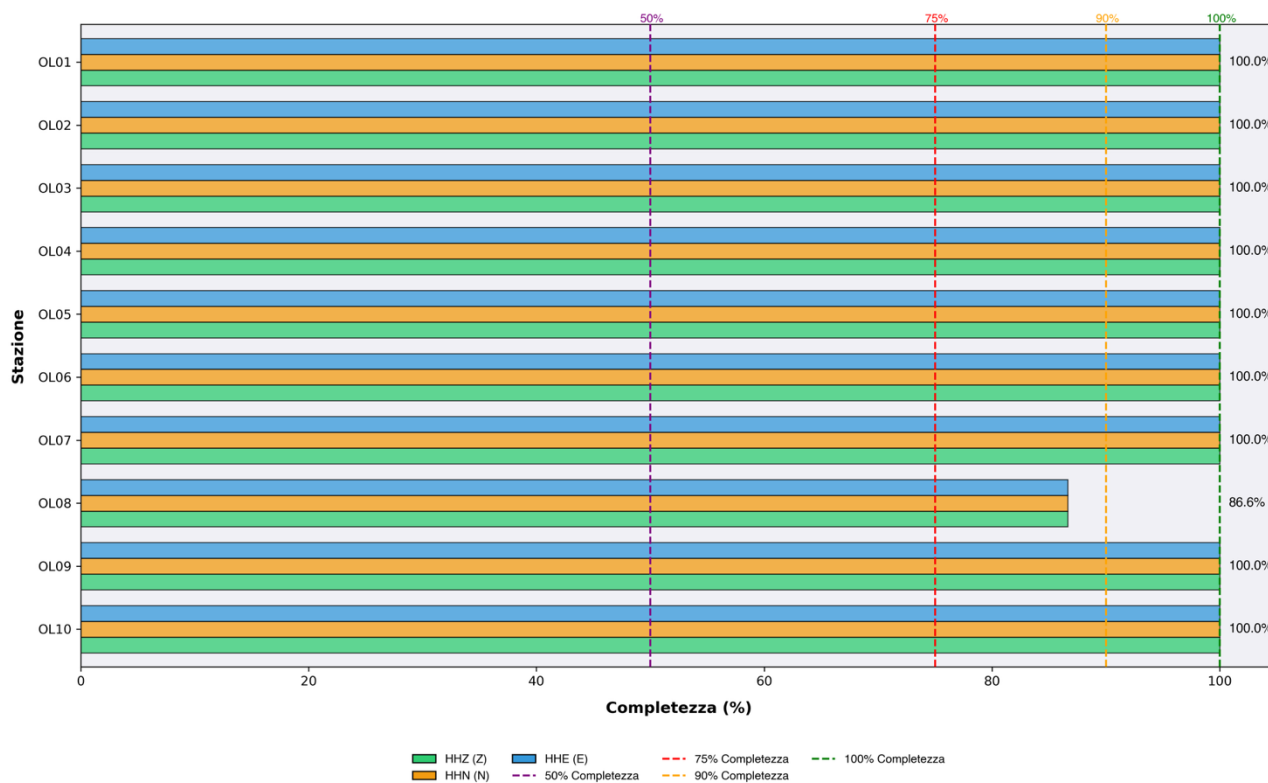


Disponibilità Temporale del Segnale e Gap (Dicembre 2025) - Rete OL

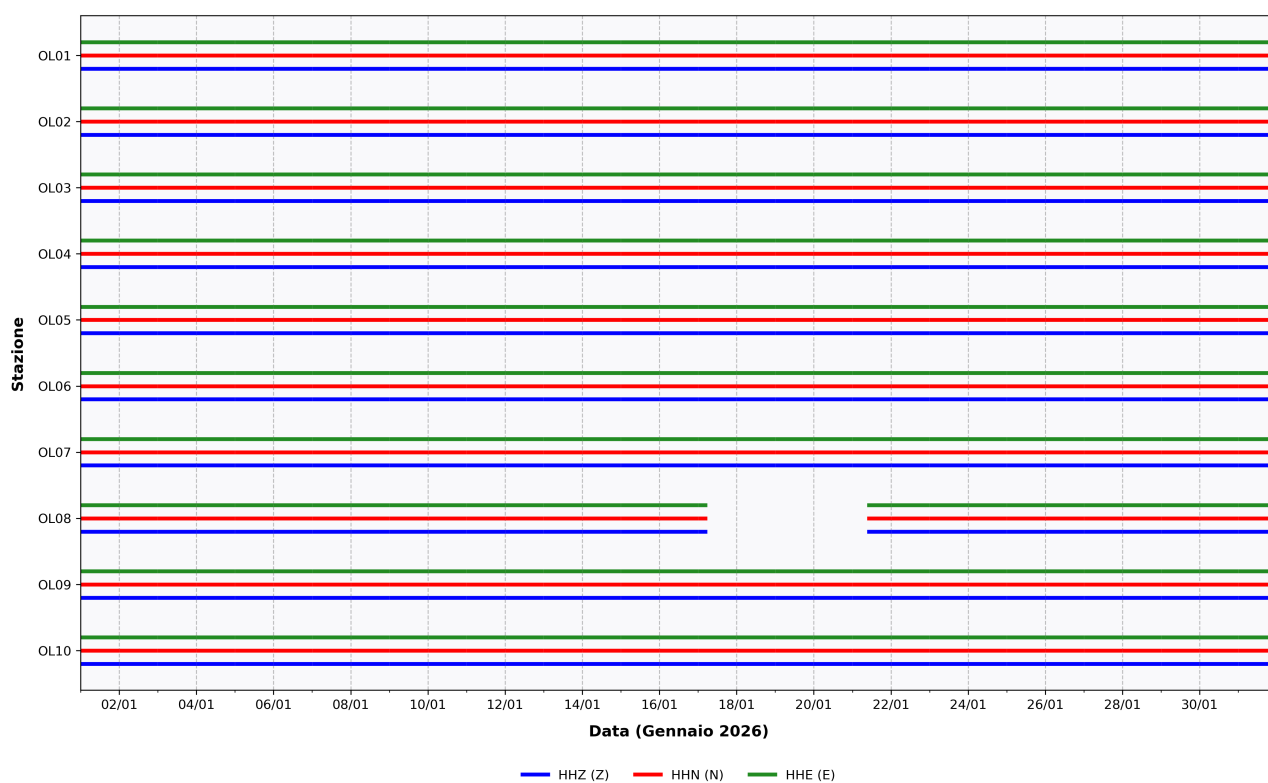


Gennaio 2026

Istogramma Orizzontale della Completezza dei Dati (Gennaio 2026) per Stazione e Canale (Rete OL)

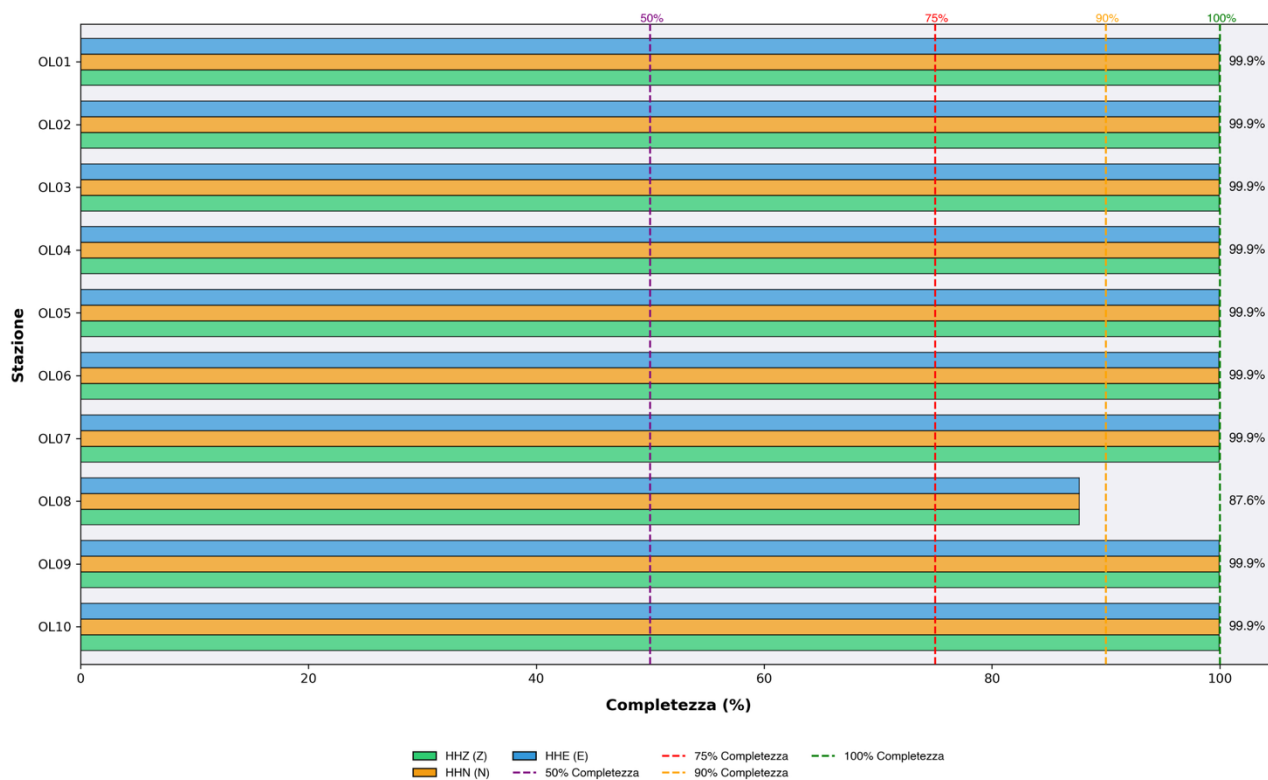


Disponibilità Temporale del Segnale e Gap (Gennaio 2026) - Rete OL

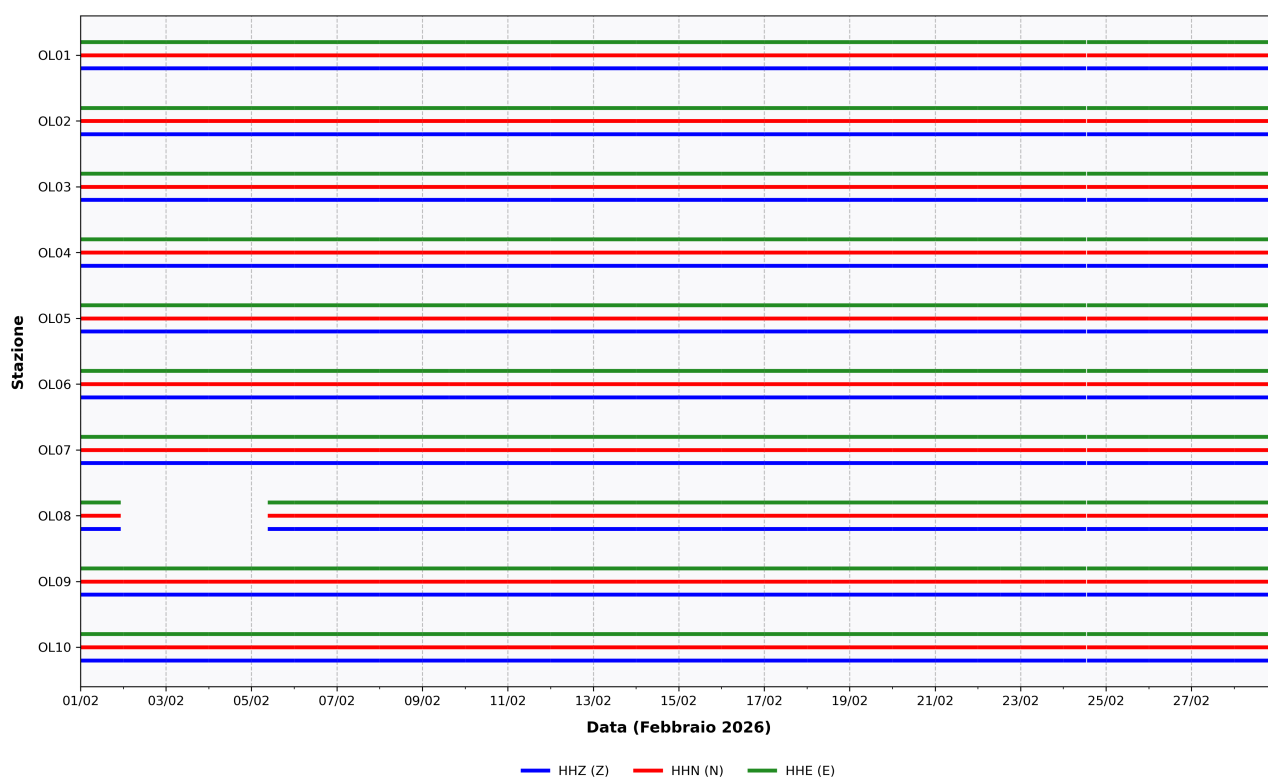


Febbraio 2026

Istogramma Orizzontale della Completezza dei Dati (Febbraio 2026) per Stazione e Canale (Rete OL)

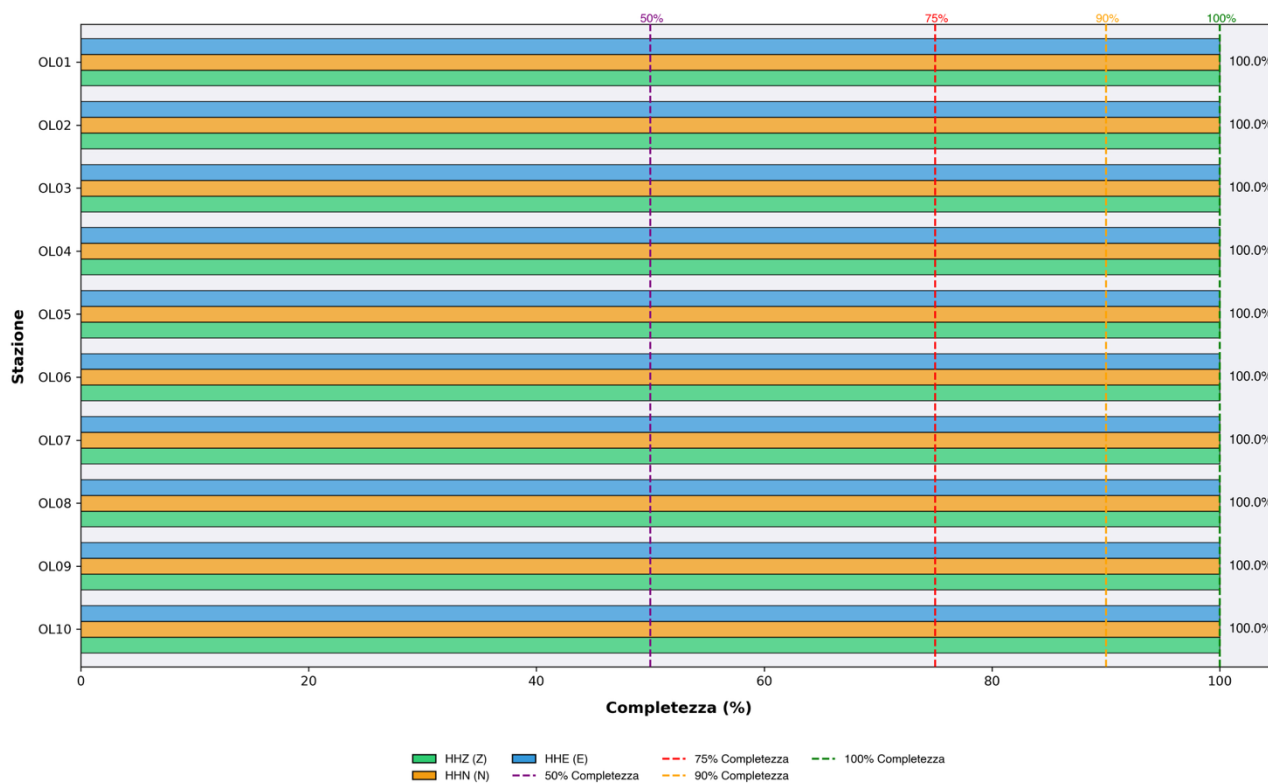


Disponibilità Temporale del Segnale e Gap (Febbraio 2026) - Rete OL

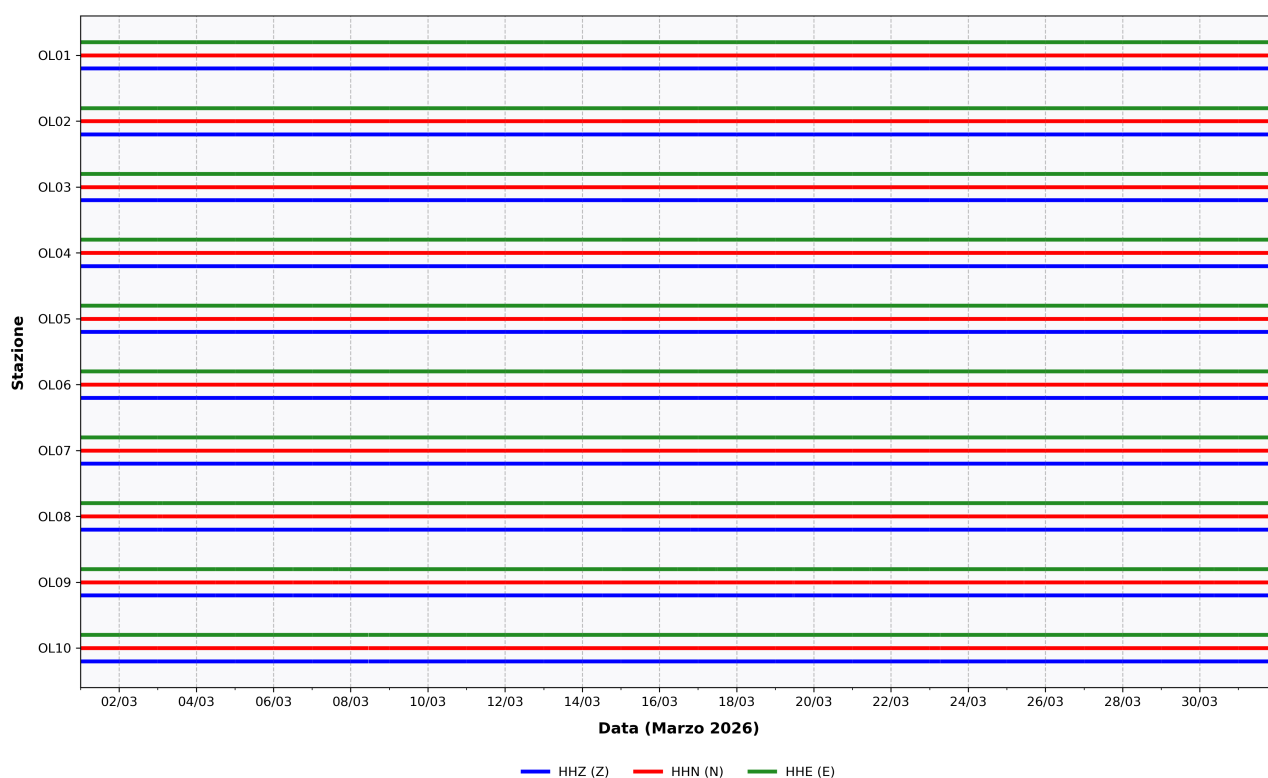


Marzo 2026

Istogramma Orizzontale della Completezza dei Dati (Marzo 2026) per Stazione e Canale (Rete OL)

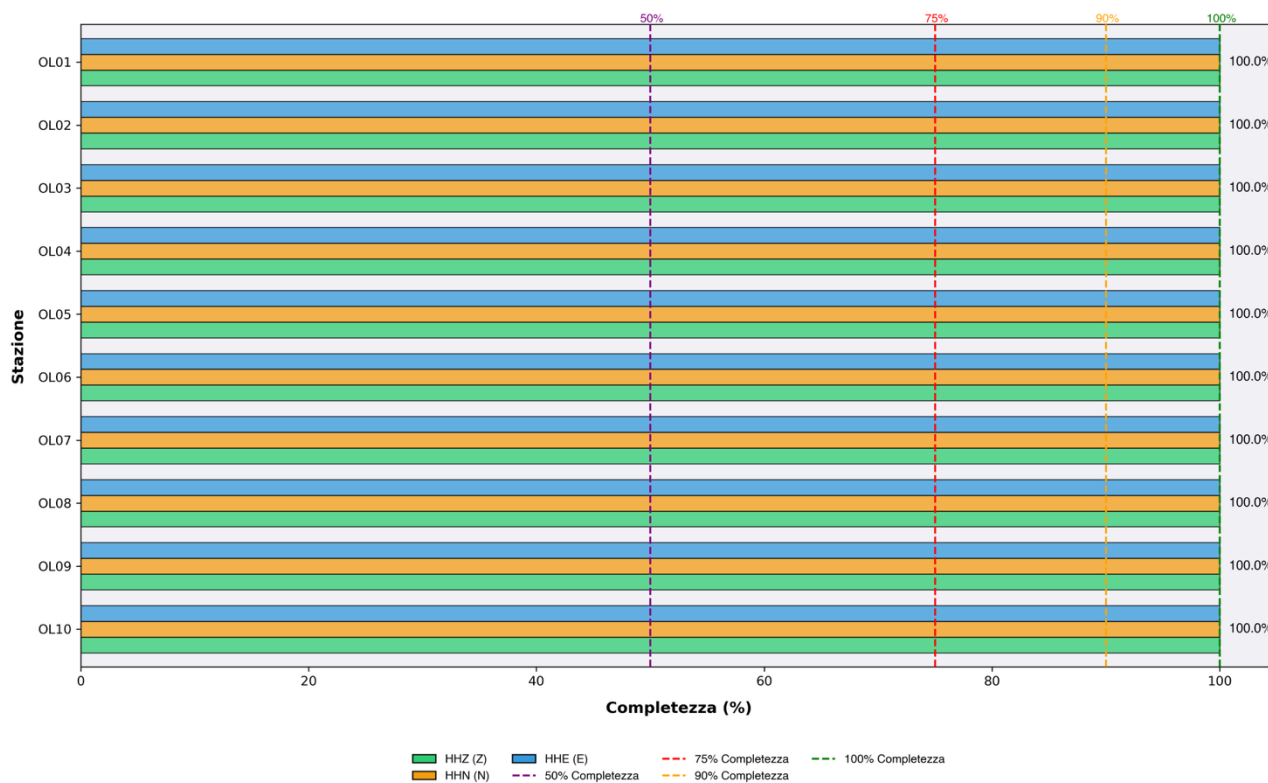


Disponibilità Temporale del Segnale e Gap (Marzo 2026) - Rete OL

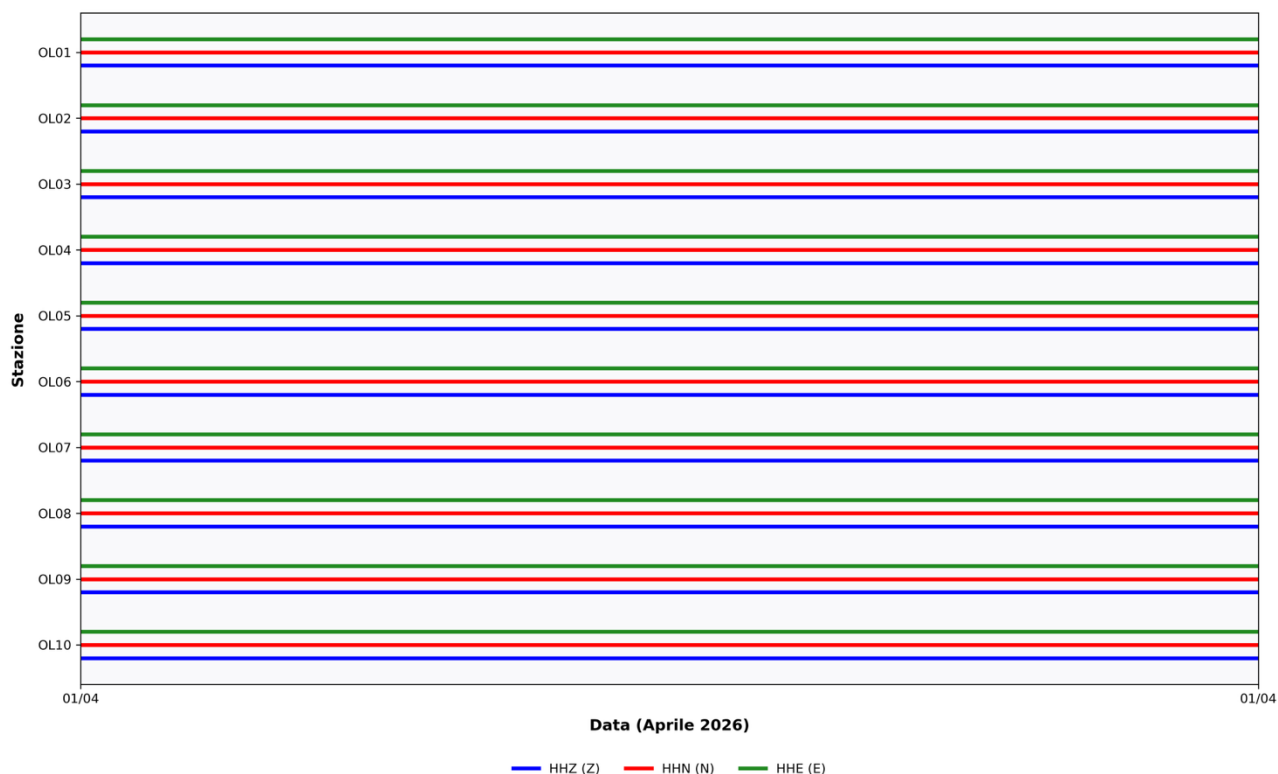


Aprile 2026

Istogramma Orizzontale della Completezza dei Dati (Aprile 2026) per Stazione e Canale (Rete OL)



Disponibilità Temporale del Segnale e Gap (Aprile 2026) - Rete OL



Appendice B – Lista degli eventi sismici riconosciuti nell'intera area di rilevazione

Legenda

id	numero identificativo evento
Area	area di appartenenza ("DI" = dominio interno, "DE" = dominio esterno, "AE" = area estesa)
yyyy/mm/dd	data (anno/mese/giorno)
hh:mm:ss.ss	ora UTC 12 (ora;minuto:secondo.centesimali di secondo)
lat latitudine	(gradi decimali)
lon longitudine	(gradi decimali)
depth profondità	(km)
MI	magnitudo locale
Q	qualità della localizzazione
Location	località

* : L'asterisco indica eventi con errore statistico nella localizzazione molto elevato.

"AE" : sigla utilizzata per indicare eventi che vengono inclusi nella lista anche se escono di poco dal volume corrispondente ad AE, come ad esempio alcuni eventi sismici più profondi di 32 km.

Cornegliano Laudense Seismic Network Event List

id	Area	Date	Time	Lat	Lon	Depth	MI	Q	Location
1	AE°	2017/05/23	04:16:32.54	45.448	9.246	37.9	1.9	A	Milano
2	DI*	2017/07/11	22:25:03.54	45.306	9.422	1.4	0.9	D	Lodi Vecchio
3	DI	2017/07/12	00:17:53.87	45.304	9.419	2.2	1.1	A	Lodi Vecchio
4	DI	2017/07/12	00:18:30.95	45.304	9.435	1.3	--	A	Lodi Vecchio
5	DE	2017/10/20	21:37:06.65	45.325	9.544	3.2	1.2	C	Lodi
6	DI	2018/01/27	04:01:44.44	45.311	9.435	1.5	0.8	A	Tavazzano con Villavesco
7	DE	2018/05/27	20:01:35.35	45.257	9.456	5.7	0.7	A	Pieve Fissiraga
8	AE°	2018/06/18	21:45:20.87	45.276	9.253	33.3	1.2	A	Vidigulfo
9	AE°	2018/06/20	00:49:07.48	45.276	9.238	34.0	1.3	A	Vidigulfo
10	AE°	2018/10/30	05:03:37.61	45.383	9.572	34.0	1.9	A	Palazzo Pignano
11	DE	2018/11/21	03:26:44.47	45.308	9.532	3.1	2.1	A	Lodi
12	AE°	2018/12/23	15:06:12.55	45.440	9.583	35.6	1.6	B	Vailate
13	AE	2019/04/25	23:11:31.35	45.355	9.605	32.0	1.5	A	Bagnolo Cremasco
14	DI	2019/06/12	10:24:02.07	45.302	9.502	1.6	1.0	B	Lodi
15	DE	2019/06/21	15:22:39.47	45.308	9.535	2.2	1.0	A	Lodi
16	DE	2019/06/21	15:49:01.16	45.307	9.529	2.3	0.9	A	Lodi
17	AE°	2019/06/30	12:01:20.47	45.332	9.312	35.0	2.0	A	Cerro al Lambro
18	DE	2019/07/13	03:01:35.97	45.300	9.528	2.5	1.2	A	Lodi
19	DE	2019/08/17	09:40:07.14	45.305	9.649	4.3	2.0	A	Credera Rubbiano
20	AE	2020/10/28	09:28:28.98	45.515	9.248	12.1	2.0	A	Milano
21	AE°	2020/12/17	15:59:23.86	45.445	9.169	41.6	3.3	A	Milano
22	AE°	2021/01/17	10:27:25.98	45.473	9.390	36.7	2.7	A	Settala
23	AE°	2021/02/21	08:54:21.16	45.212	9.112	31.8	1.7	B	Pavia
24	DI	2021/08/14	06:26:48.34	45.303	9.436	1.2	0.2	A	Lodi Vecchio
25	DI	2021/08/14	06:27:10.49	45.304	9.427	1.8	0.5	A	Lodi Vecchio
26	AE	2021/10/11	23:18:21.81	45.306	9.246	23.9	2.9	A	Landriano
27	AE°	2021/11/06	11:00:57.57	45.496	9.581	35.0	1.7	A	Casirate d'Adda
28	DE	2021/12/21	23:37:57.32	45.313	9.536	2.5	1.6	A	Lodi
29	DE	2021/12/22	05:17:15.26	45.312	9.533	2.4	2.2	A	Lodi
30	DE	2022/02/14	01:02:55.81	45.315	9.528	2.1	1.6	A	Lodi
31	AE°	2022/03/21	21:33:20.29	45.382	9.653	36.1	1.8	A	Cremosano
32	DE	2022/06/15	00:38:54.27	45.315	9.526	2.1	1.3	A	Lodi
33	DI	2023/02/25	02:49:19.04	45.308	9.485	2.2	0.9	A	Lodi
34	DE	2023/03/28	02:02:44.34	45.311	9.535	2.9	1.3	A	Lodi
35	DE	2023/10/22	13:56:40.17	45.253	9.525	6.5	1.2	A	Ossago Lodigiano
36	DE	2023/10/24	01:49:30.58	45.316	9.518	1.5	0.7	C	Lodi
37	AE	2024/02/25	10:32:42.15	45.386	9.553	28.5	2.6	A	Dovera

38	AE	2024/03/07	01:25:30.16	45.250	9.193	29.2	--	A	Zeccone
39	DE	2024/04/26	08:05:46.55	45.318	9.536	1.8	0.9	A	Lodi
40	DE	2024/09/25	02:05:37.81	45.310	9.515	2.5	0.8	A	Lodi
41	DI	2024/09/25	03:40:01.63	45.312	9.508	1.7	1.0	A	Lodi
42	DE	2024/09/25	03:52:51.43	45.313	9.519	2.4	0.9	A	Lodi
43	DE	2024/09/25	08:09:22.54	45.312	9.511	2.8	1.1	A	Lodi
44	DE	2024/09/25	23:14:21.72	45.324	9.516	2.1	0.6	A	Lodi
45	DE	2024/09/26	00:25:25.56	45.310	9.513	2.0	0.7	A	Lodi
46	DE	2024/09/26	16:24:40.56	45.315	9.511	2.4	1.3	A	Lodi
47	DI	2024/09/26	21:40:13.91	45.309	9.505	2.2	--	A	Lodi
48	DE	2024/09/29	18:51:46.48	45.313	9.509	2.0	--	A	Lodi
49	DI	2024/11/26	23:52:59.68	45.308	9.508	2.4	0.4	A	Lodi
50	DI	2024/12/14	04:17:46.31	45.306	9.505	2.6	1.6	A	Lodi
51	DE	2024/12/14	05:53:07.55	45.316	9.510	2.3	0.9	B	Lodi
52	DE	2024/12/15	03:09:28.65	45.323	9.521	3.3	--	A	Lodi
53	DE	2025/01/02	22:05:46.73	45.312	9.514	2.1	1.2	A	Lodi
54	AE°	2025/03/17	02:50:17.35	45.404	9.400	35.0	1.6	A	Paullo
55	AE	2025/08/02	08:38:26.30	45.313	9.624	3.4	1.5	B	Casale Ceredano
56	DI	2025/11/07	16:03:30.87	45.288	9.519	1.5	0.8	B	Lodi
57	AE	2026/02/11	08:15:58.54	45.368	9.660	30.7	2.8	A	Crema

Appendice C – Serie temporali della Rete GNSS LODI nel sistema di riferimento ITRF14

In questa sezione sono riportate le serie temporali delle stazioni della RETE GNSS LODI secondo il sistema di riferimento ITRF14. Ogni figura mostra le serie relative alle tre componenti (dall'alto verso il basso, Nord, Est e verticale verso l'alto) dello spostamento per una stazione. Ogni punto sul grafico è lo spostamento stimato giornaliero in mm. Ad ogni punto è sovrapposta la barra di errore che rappresenta la dispersione delle 2880 stime giornaliere.

Sul grafico è presente anche la retta interpolante, la cui inclinazione fornisce una stima di velocità, con il relativo errore, visibile sullo stesso grafico in alto a sinistra (rate (mm/year)). Sono presenti, inoltre, il NRMS (errore quadratico medio normalizzato) e il WRMS (errore quadratico medio pesato).

LODI

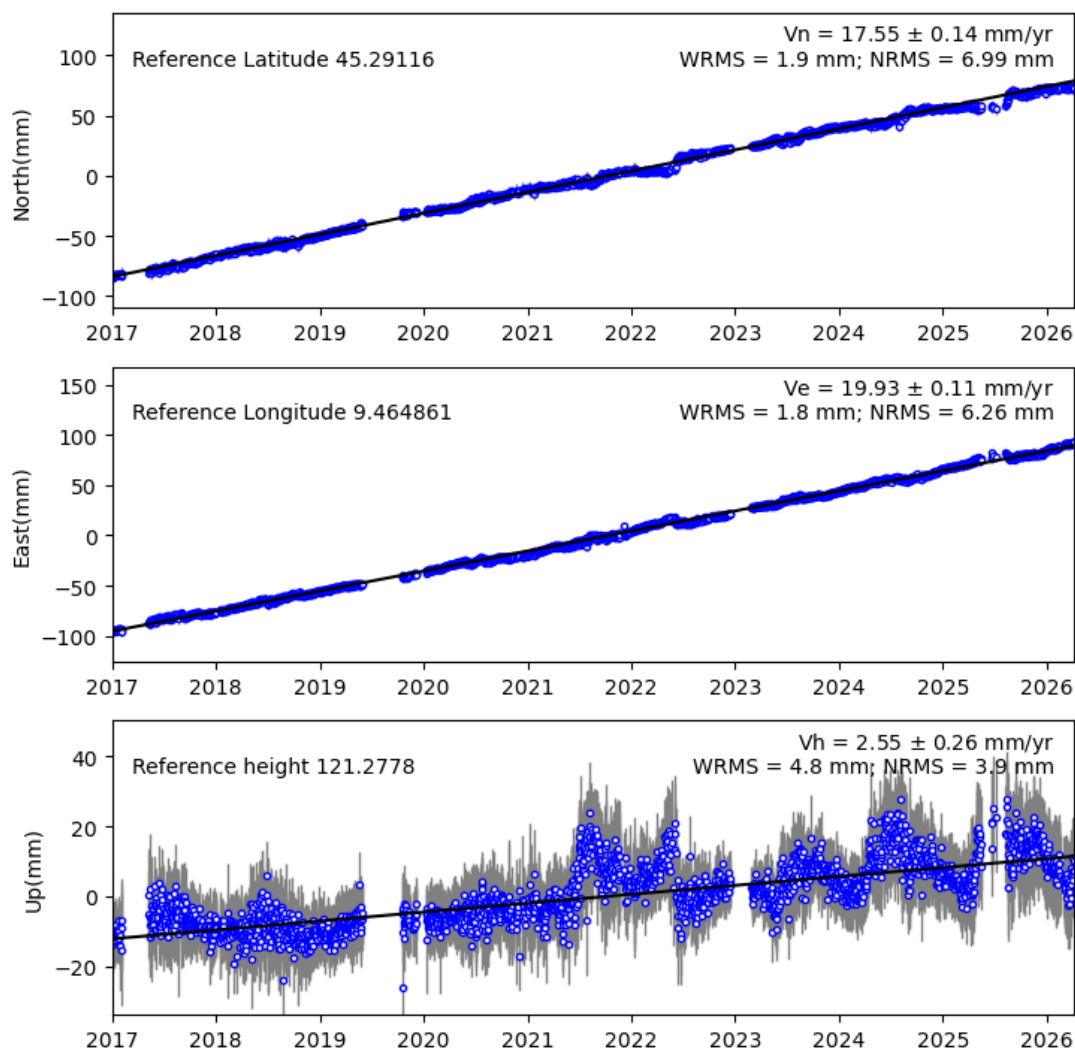


Figura B.1. Serie temporale della stazione LODI secondo il sistema di riferimento ITRF14.

CREA

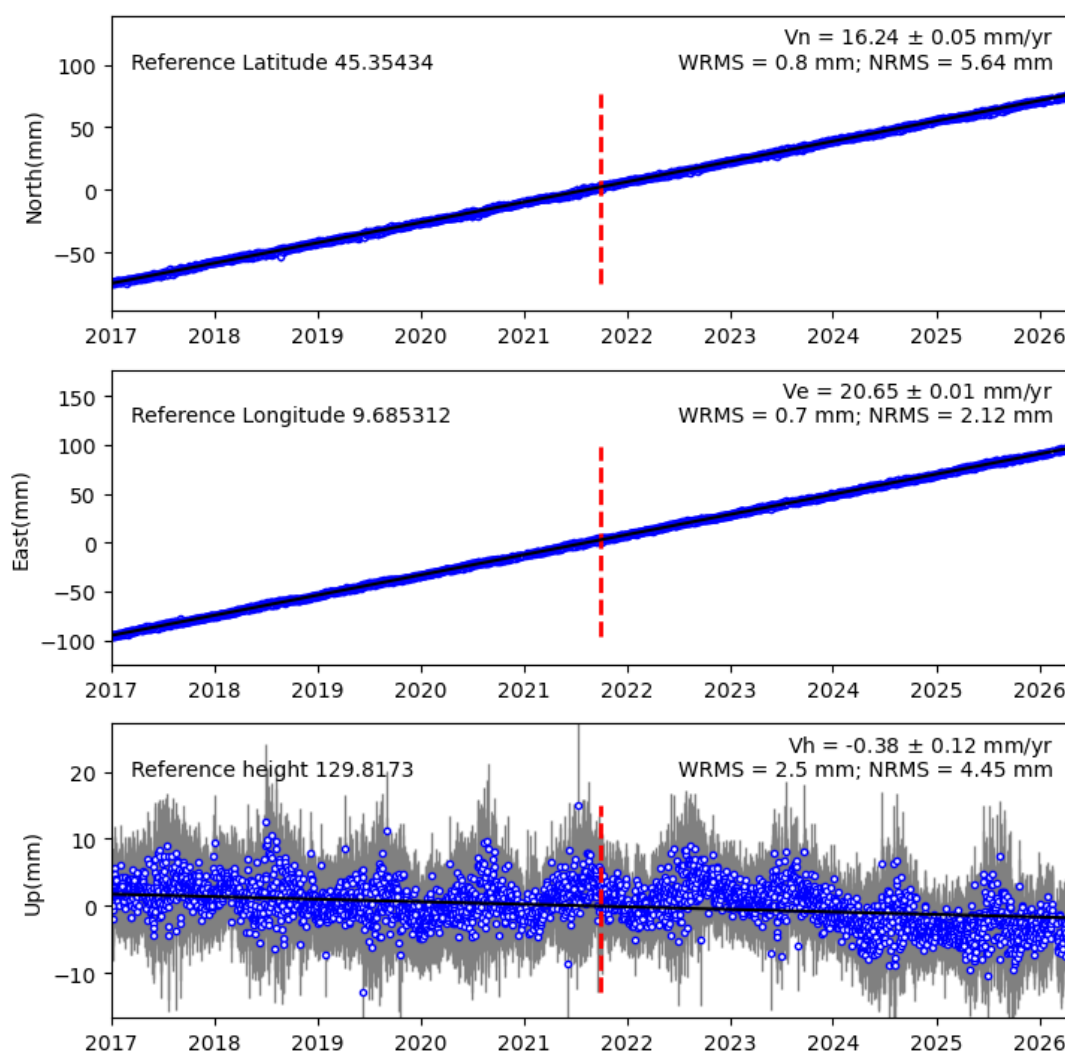


Figura B.2. Serie temporale della stazione CREA secondo il sistema di riferimento ITRF14. La linea tratteggiata rossa rappresenta il cambiamento di antenna avvenuto il giorno 28/9/2021. Dalla serie temporale è stato rimosso il salto stimato dovuto al cambio antenna.

CREM

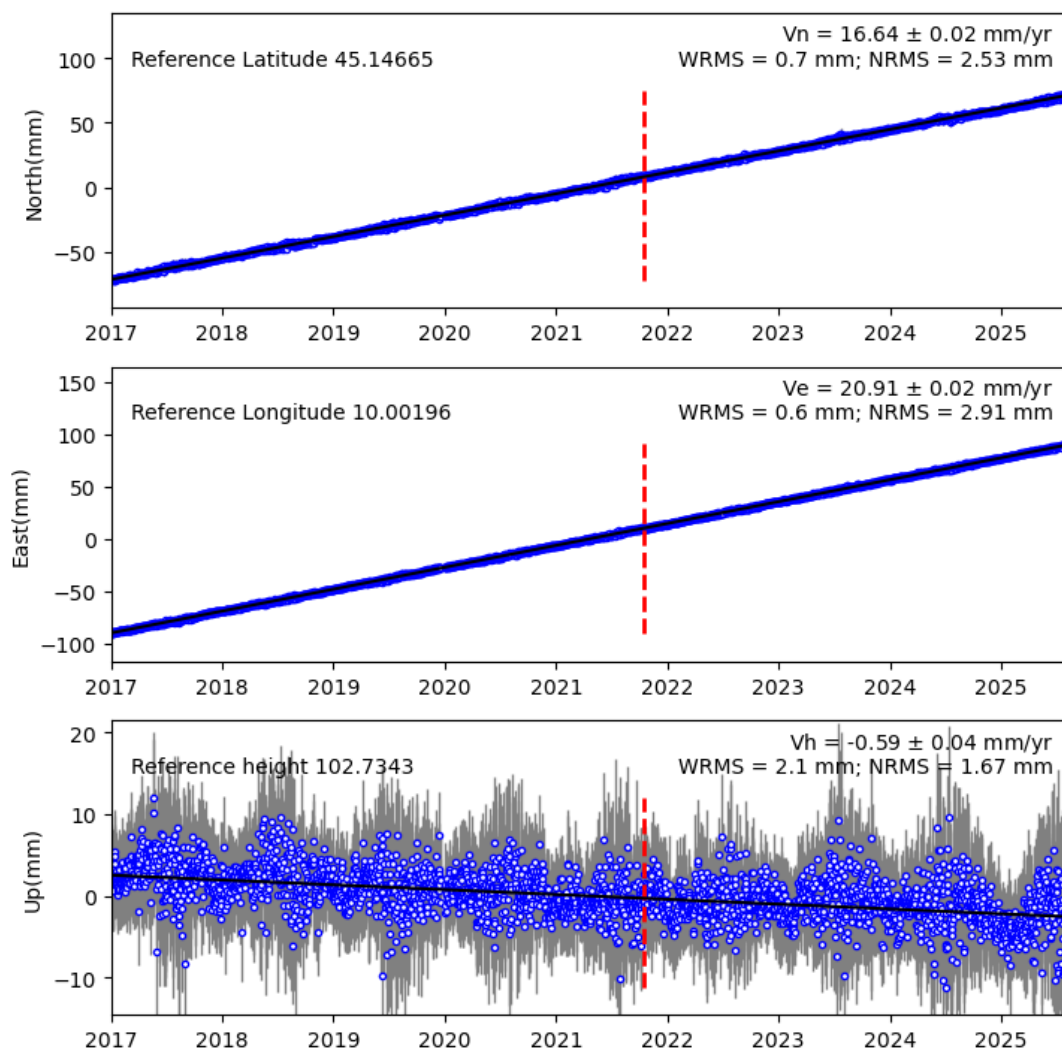


Figura B.3. Serie temporale della stazione CREM secondo il sistema di riferimento ITRF14. La linea tratteggiata rossa rappresenta il cambiamento di antenna avvenuto il giorno 15/10/2021. Dalla serie temporale è stato rimosso il salto stimato dovuto al cambio antenna.

MILA

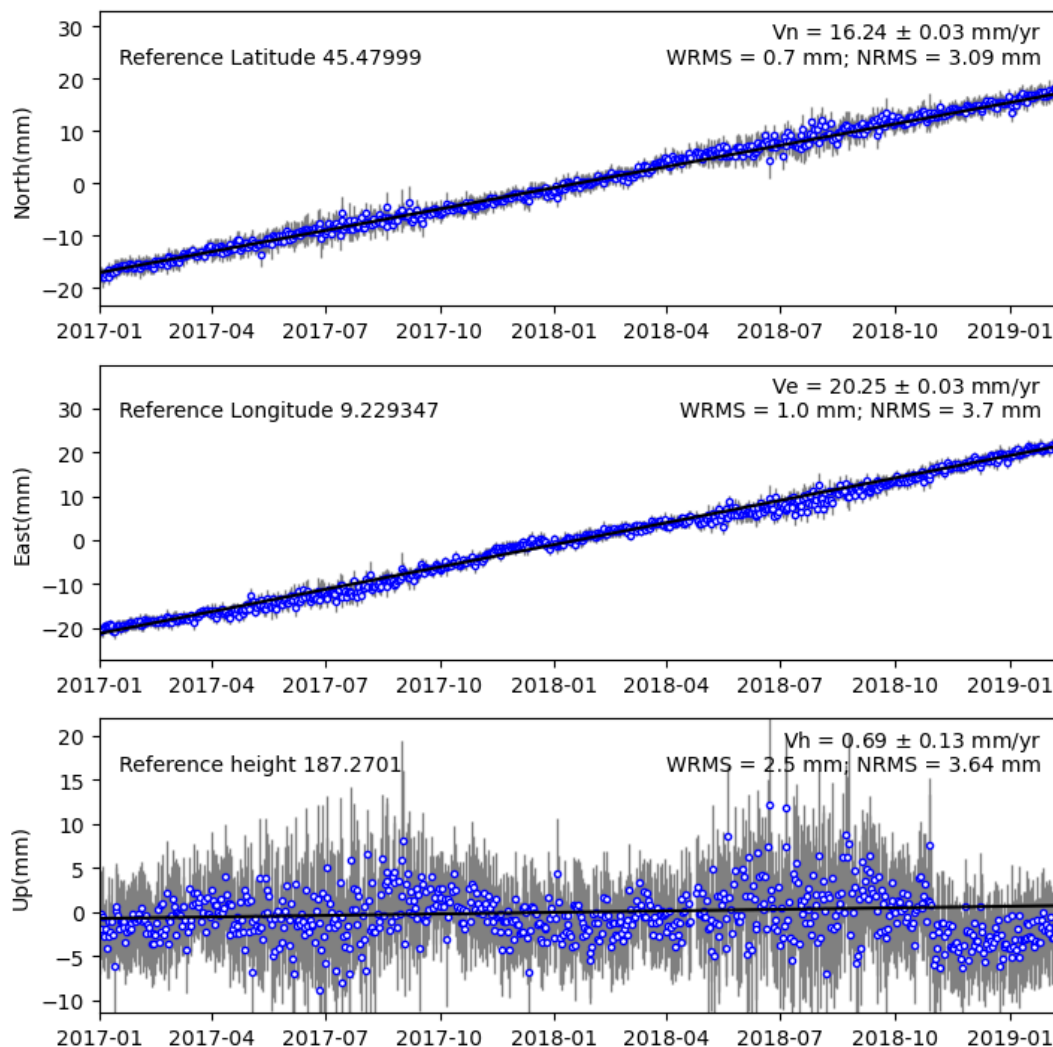


Figura B.4. Serie temporale della stazione MILA secondo il sistema di riferimento ITRF14.

MIL2

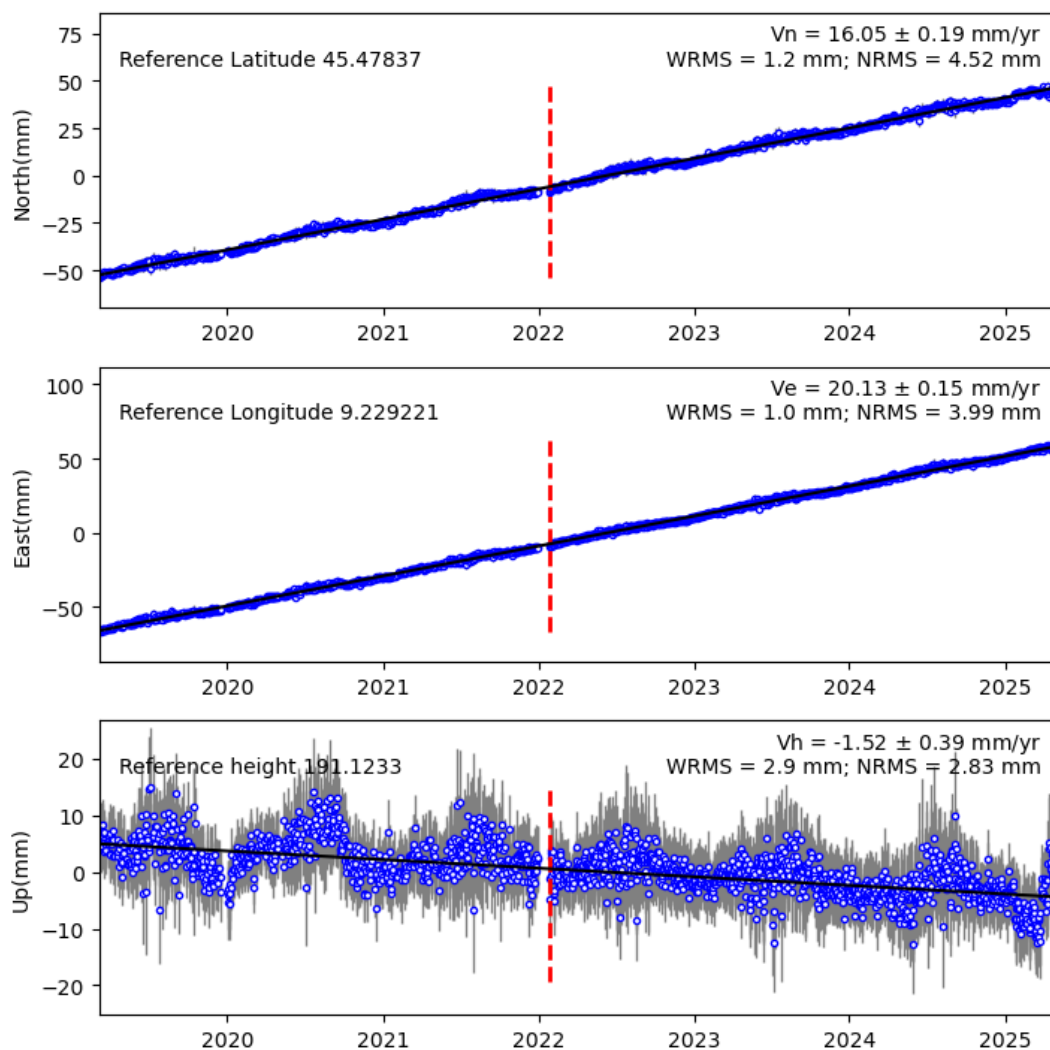


Figura B.5. Serie temporale della stazione MIL2 secondo il sistema di riferimento ITRF14. La linea tratteggiata rossa rappresenta il cambiamento di antenna avvenuto il giorno 26/1/2022. Dalla serie temporale è stato rimosso il salto stimato dovuto al cambio antenna.

MIL3

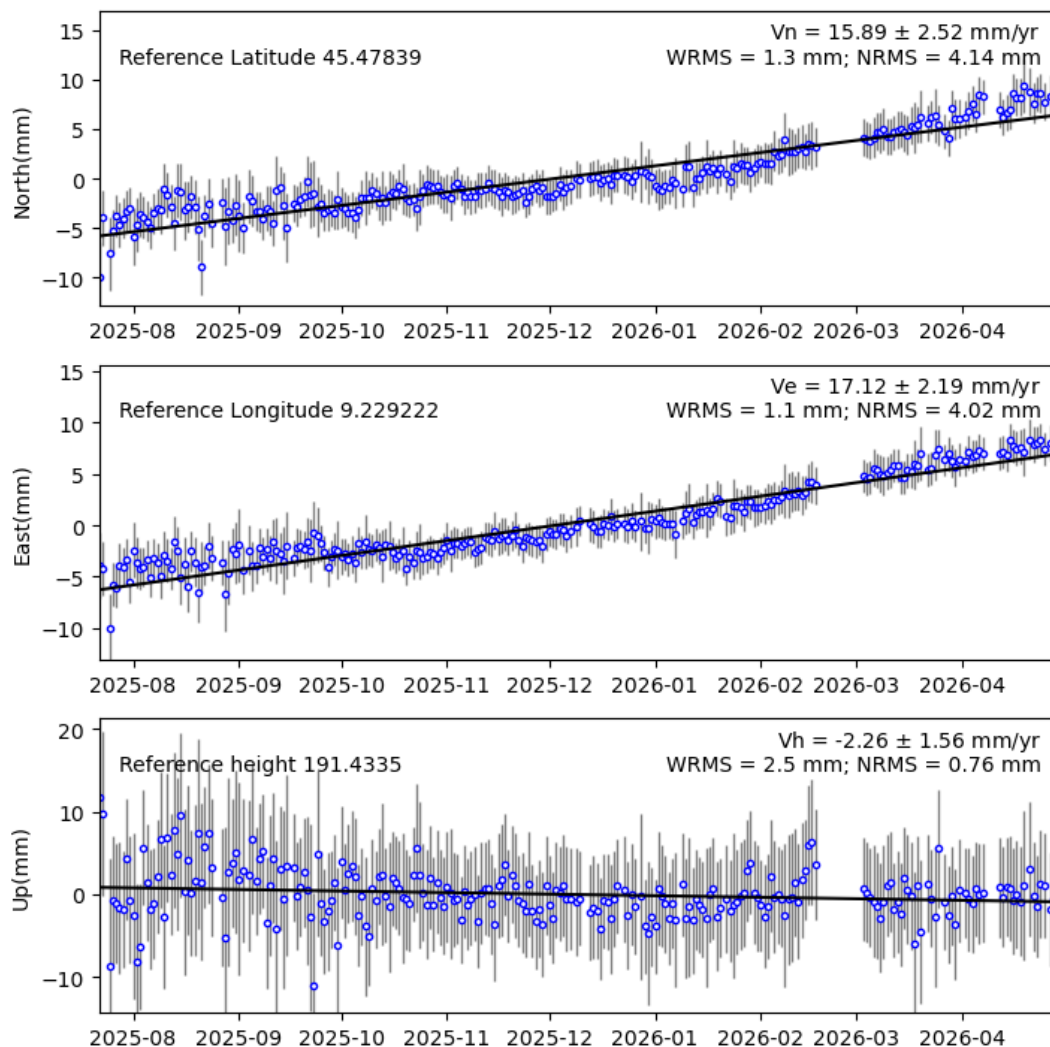


Figura B.6. Serie temporale della stazione MIL3 secondo il sistema di riferimento ITRF14.

PAVI

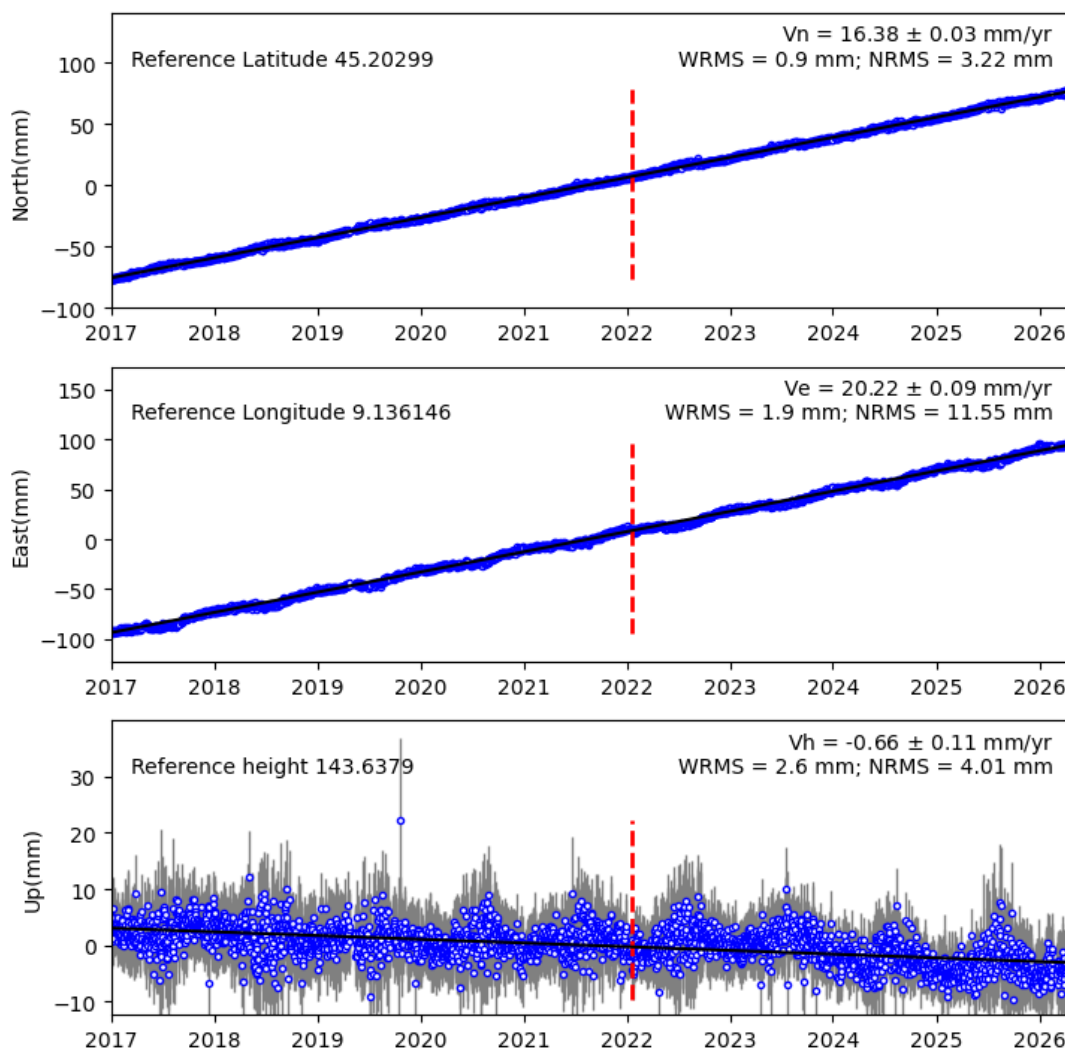


Figura B.7. Serie temporale della stazione PAVI secondo il sistema di riferimento ITRF14. La linea tratteggiata rossa rappresenta il cambiamento di antenna avvenuto il giorno 20/01/2022. Dalla serie temporale è stato rimosso il salto stimato dovuto al cambio antenna.

Appendice D - Statistica degli accessi al sito della Rete di Monitoraggio di Cornegliano Laudense

Le figure sottostanti illustrano le statistiche relative agli accessi registrati sul portale web della Rete di Monitoraggio di Cornegliano Laudense (<http://rete-cornegliano.crs.inogs.it/>) per il primo semestre dell'anno 2026.

Nel corso del periodo in esame, sono state effettuate complessivamente 473 visite al sito web (Figura D.1). I flussi di traffico, pur non mostrando volumi elevati, presentano un andamento costante e regolare, in linea con le tendenze evidenziate nelle annualità precedenti.

Per quanto concerne la provenienza geografica, gli accessi provengono prevalentemente dall'Italia, sebbene si registri una significativa componente di utenza estera (Figura D.2). I dispositivi desktop rappresentano il mezzo di fruizione principale per la consultazione del portale (Figura D.3).

Dall'analisi dei contenuti (Figura D.4) emerge come le sezioni di maggiore interesse per l'utenza siano quelle a carattere introduttivo, seguite dalle pagine dedicate al monitoraggio geodetico e alla deformazione superficiale. Infine, in Figura D.5 sono riportate le statistiche relative ai download effettuati dal sito nel medesimo intervallo temporale.

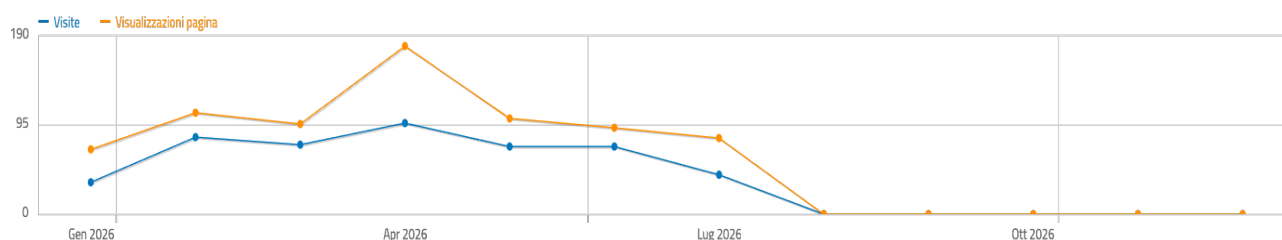
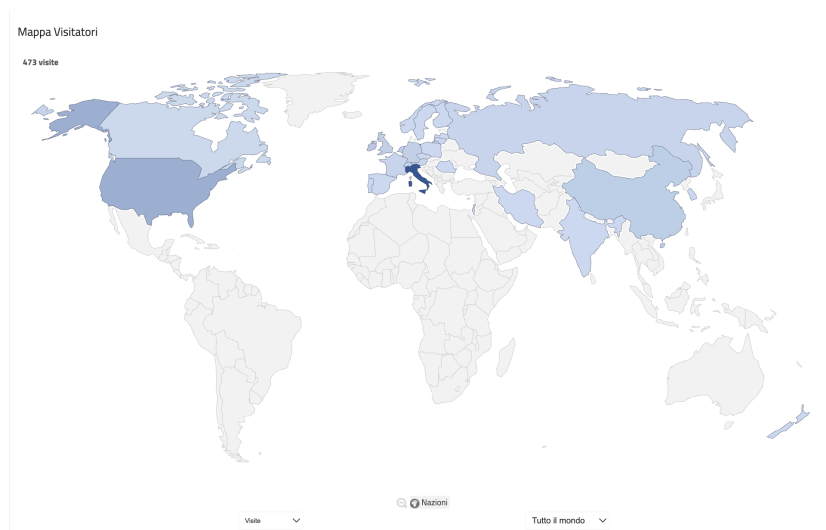


Figura D.1. Rendiconto delle visite effettuate sul sito web nel periodo 1/1/2026-31/7/2026 (linea blu) e del numero di visualizzazioni di pagina (linea arancione).

(a)



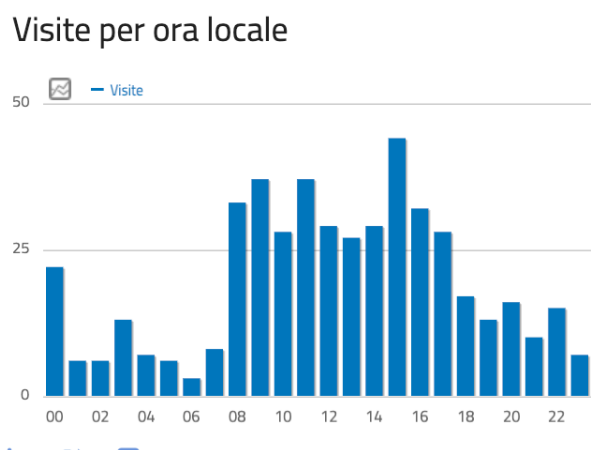
(b)

Paese

PAESE	VISITE
 Italia	217
 Stati Uniti	70
 Singapore	49
 Irlanda	27
 Cina	18
 Regno Unito	14
 Paesi Bassi	13
 Germania	12
 Francia	7
 Austria	6

Figura D.2. (a) Distribuzione del numero di visite effettuate al sito web nel periodo 1/1/2026-31/7/2026 in funzione del paese di accesso (b) Lista dei dieci paesi con il numero più alto di utenti nel periodo esaminato.

(a)



(b)

Tipo di dispositivo

TIPO	VISITE
 Desktop	429
 Smartphone	41
 Tablet	3
 Apparecchio TV	-
 Browser in auto	-

Figura D.3. (a) Distribuzione del numero di utenti in funzione delle ore del giorno nel periodo 1/1/2026-31/7/2026; (b) percentuale di sessioni in funzione del tipo di dispositivo.

Titoli delle pagine

TITOLO PAGINA	VISUALIZZAZIONI PAGINA	▼ VISUALIZZAZIONI UNICHE	% RIMBALZI	TEMPO MEDIO SULLA PAGINA	% USCITE
Monitoraggio di "Cornegliano Stoccaggio" Monitoraggio inte   	113	94	54%	00:00:35	68%
"Cornegliano Stoccaggio" Monitoring Cornegliano Laudense gas stor...	91	87	76%	00:00:32	77%
L'interferometria differenziale SAR - Tecniche di analisi Monitoraggi...	95	85	82%	00:00:55	98%
Search "Cornegliano Stoccaggio" Monitoring	68	38	0%	00:00:02	100%
Dati e Documentazione Monitoraggio di "Cornegliano Stoccaggio"	24	24	25%	00:00:04	21%
SAR differential interferometry - Analysis techniques "Cornegliano S...	21	20	95%	00:00:02	100%
Monitoraggio Geodetico Monitoraggio di "Cornegliano Stoccaggio"	18	18	0%	00:00:01	11%
Relazioni Monitoraggio di "Cornegliano Stoccaggio"	15	14	100%	00:01:38	71%
IGS Monitoraggio di "Cornegliano Stoccaggio"	13	13	100%	00:00:00	100%
Seismic Data "Cornegliano Stoccaggio" Monitoring	12	12	100%	00:00:02	75%

Figura D.4. Rendiconto delle pagine di maggiore interesse del sito web nel periodo 1/1/2026-31/7/2026.

Appendice E – Stazione geodetica a basso costo LOZ1

La stazione LOZ1 (Figura E.1) è ubicata accanto alla stazione LODI, e produce dati da gennaio 2022. Dotata di un ricevitore dual-frequency u-blox ZED-F9P e di un'antenna Tallysman TW3742, LOZ1 è in grado di ricevere i segnali multicostellazione GPS, GLONASS, GALILEO, QZSS, e BeiDou. Il dataset della stazione LOZ1, analogamente a quanto avviene per quello di LODI, viene registrato in file di formato RINEX, è disponibile in sessioni giornaliere con campionamento a 30 secondi, ed è processato con il software GAMIT/GLOBK.



Figura E.1. Due foto della stazione LODI e della stazione LOZ1 co-locata.

La stazione LOZ1, analogamente alla sua stazione gemella LODI, ha avuto dei problemi di funzionamento nell'intervallo considerato in questa relazione. Il ricevitore ha smesso di funzionare il 4 dicembre 2025. Pertanto, i dati RINEX di LOZ1 registrati dal 1/1/2022 fino al 30/04/2026 sono 1155, così come le giornate elaborate. L'elaborazione dei dati ha invece prodotto 1101 soluzioni per LOZ1, pari all'utilizzo del 95% dei dati iniziali.

Nelle figure a seguire si mostra il risultato del confronto delle soluzioni ottenute per le stazioni LOZ1 e LODI con i dati disponibili: le serie temporali delle posizioni delle due stazioni (Figura E.2), le differenze delle stime

delle posizioni giornaliere tra LOZ1 e LODI (Figura E.3) e la precisione della stima di posizione delle due stazioni, stimata con le deviazioni standard delle posizioni giornaliere all'interno di una finestra mobile di 7 giorni (Figura E.4).

Le serie temporali e le posizioni stimate sono molto coerenti fra LODI e LOZ1, anche se la stazione LOZ1 stima le posizioni con minore precisione rispetto a LODI. Anche LOZ1 mostra una maggiore deformazione, visibile soprattutto sulla componente Nord, durante l'estate 2025 rispetto alle estati precedenti, coerentemente con il segnale registrato da LODI, anche se meno evidente visto la maggiore dispersione dei dati.

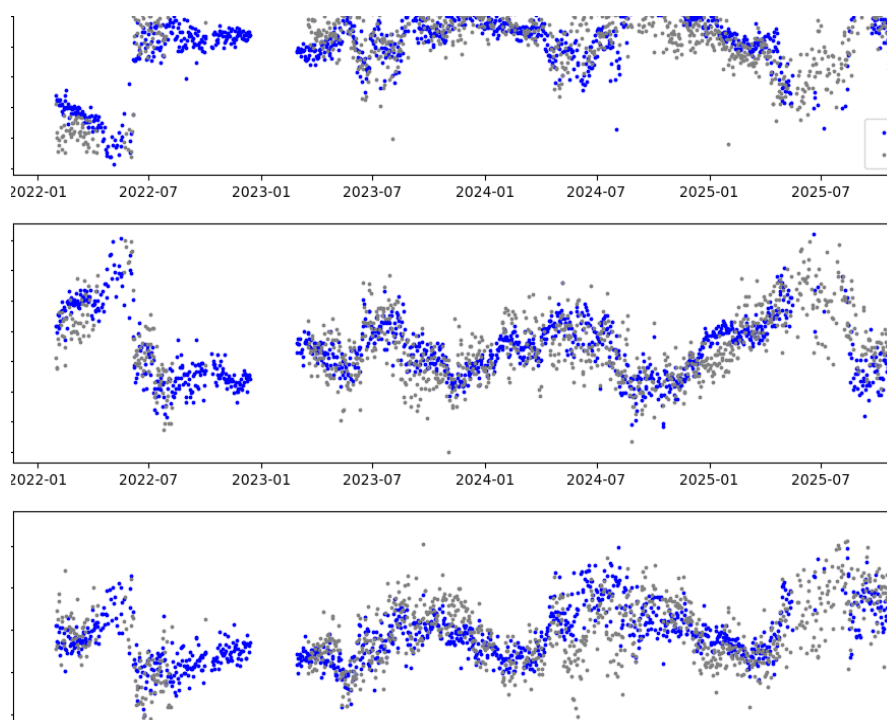


Figura E.2. – Serie temporali di LOZ1 (in grigio) e di LODI (in blu) dall'inizio di operatività di LOZ1.

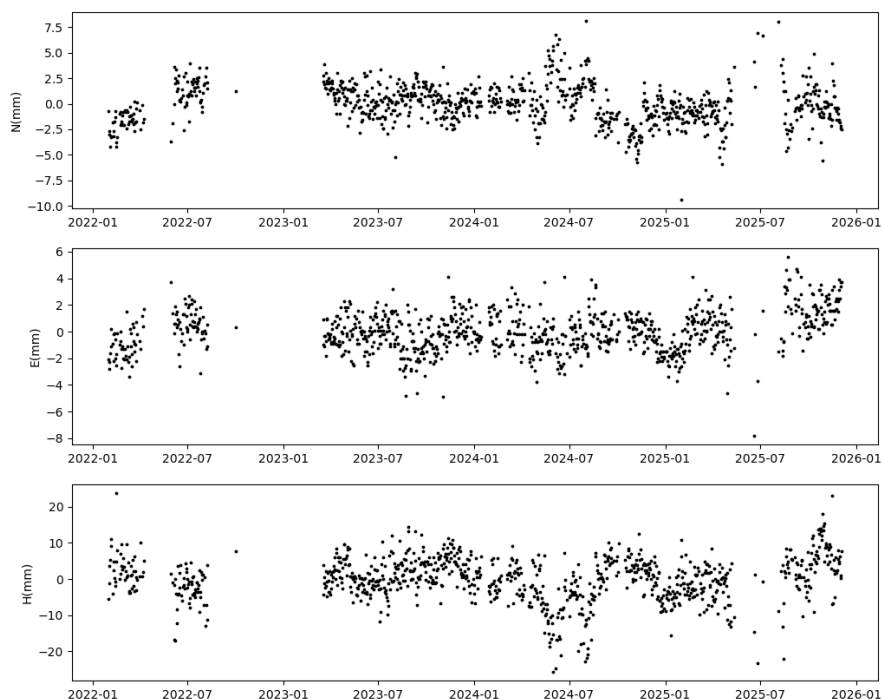


Figura E.3. – Differenze tra le stime delle posizioni giornaliere tra LOZ1 e LODI.

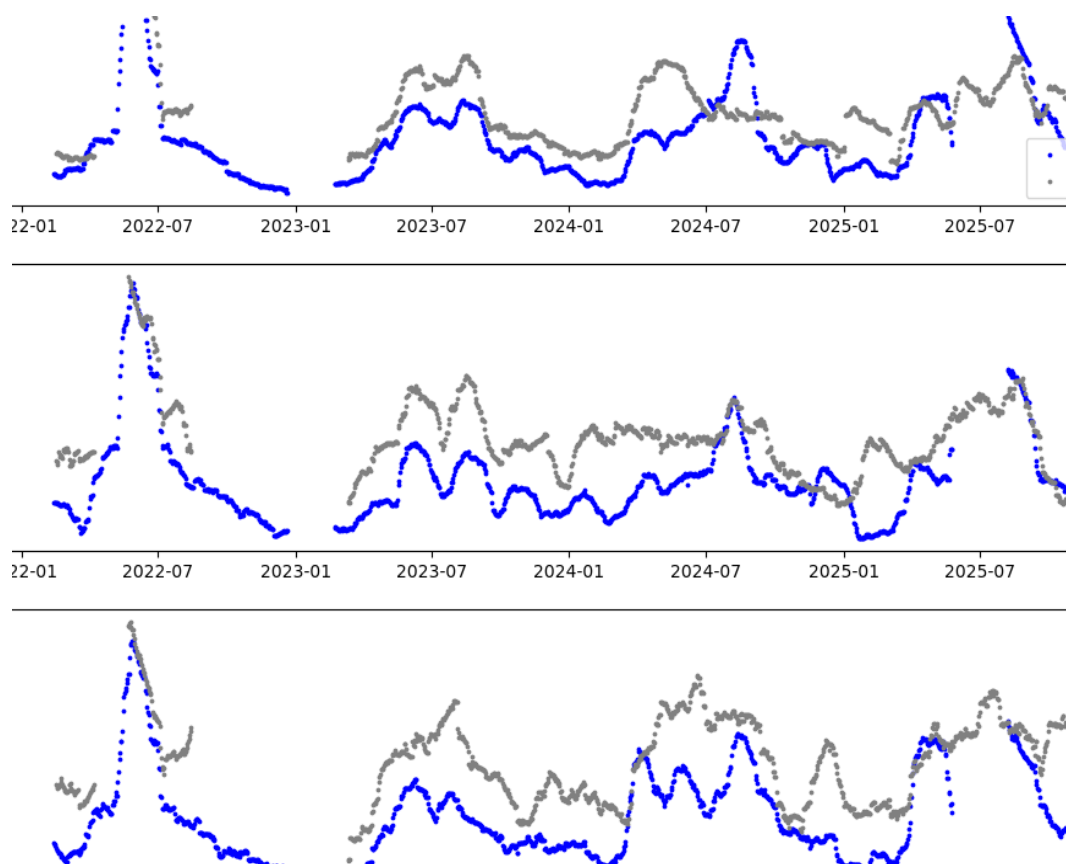


Figura E.4. – Deviazione standard delle stime delle posizioni giornaliere di LOZ1 (in grigio) e di LODI (in blu) a confronto, calcolate considerando una finestra di 7 giorni.