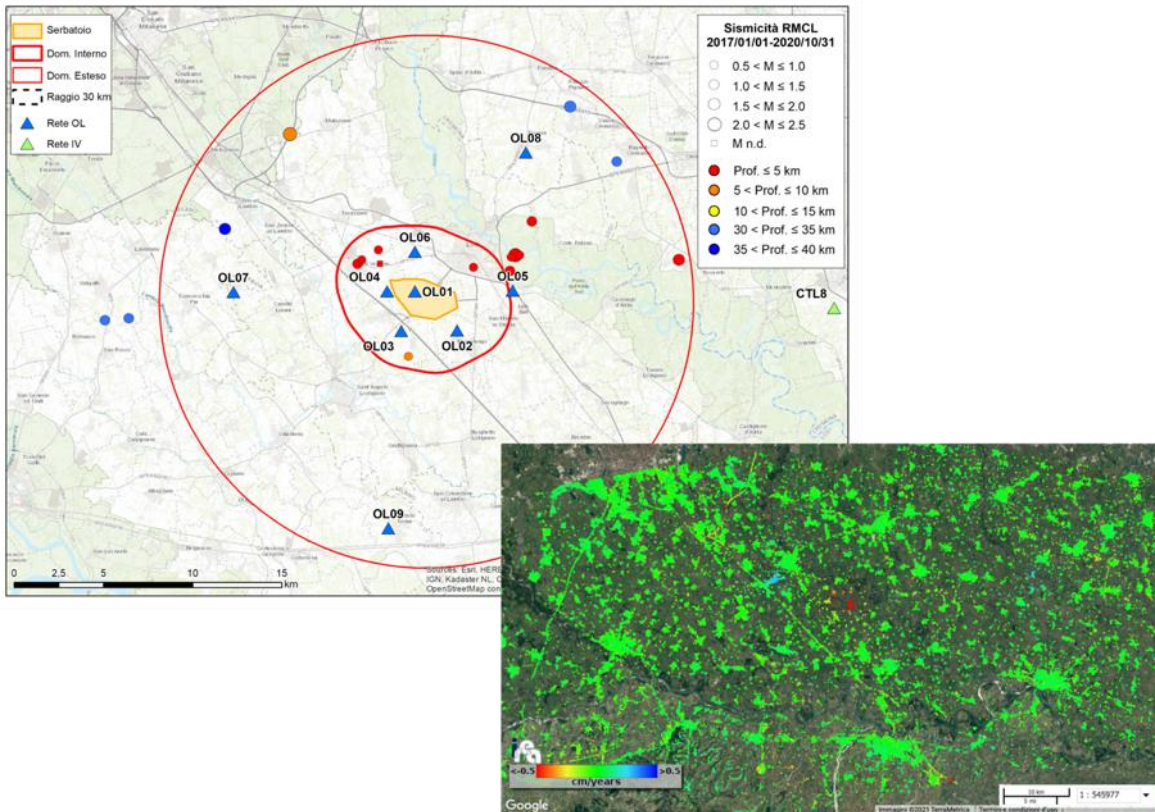


CONCESSIONE DI STOCCAGGIO DI GAS NATURALE "CORNEGLIANO STOCCAGGIO"



MONITORAGGIO SISMICO E DELLE DEFORMAZIONI SUPERFICIALI

Anno di esercizio 2023 – Prima relazione annuale

2023.1

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 agosto 2023

A cura di:

*Mariangela Guidarelli¹, Riccardo Lanari², Manuela Bonano², Claudio De Luca²,
Fabio Franceschinell¹, Andrea Magrin¹, Luca Moratto¹, Laura Peruzza¹, Marco
Romanelli¹, Maria Adelaide Romano¹, Denis Sandron¹, Marco Santulin¹, Lavinia
Tunini¹, Giovanni Zeni², Ivana Zinno², 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)

Coordinatore della Struttura Preposta al Monitoraggio e responsabile scientifico
per l'OGS: *Dott.ssa Mariangela Guidarelli*

Responsabile scientifico per l'IREA-CNR: *Dott. Ing. Riccardo Lanari*

Visto e approvato: Per l'OGS
la Direttrice del CRS
Dott.ssa Paola Del Negro

Per l'IREA-CNR
il Direttore dell'IREA-CNR
Dott. Ing. Francesco Soldovieri

Indice

Indice	iii
Elenco delle abbreviazioni	iv
Indice delle figure	v
Indice delle Tabelle	viii
Sommario	1
1. Monitoraggio sismico	2
1.1 La Rete di Monitoraggio di Cornegliano Laudense (RMCL)	3
1.2 Operatività della rete sismica	9
1.3 Eventi rilevati dalla RMCL e attività di stoccaggio	11
2. Monitoraggio delle deformazioni superficiali	17
2.1 Elaborazione dei dati della stazione GNSS OL01	18
2.1.1 Dati elaborati	18
2.1.2 Risultati ottenuti	21
2.2 Analisi interferometrica delle deformazioni del suolo relative al periodo 2015-2023 (dati SENTINEL-1)	30
2.2.1 Analisi SBAS Sentinel-1: orbite discendenti (periodo marzo 2015 – aprile 2023)	32
2.2.2 Analisi SBAS Sentinel-1: orbite ascendenti (periodo marzo 2015 – aprile 2023)	36
2.2.4 Analisi SBAS Sentinel-1: uno zoom sull'area in deformazione in prossimità del sito di stoccaggio di Cornegliano Laudense	44
3. Conclusioni	48
Bibliografia	50
Appendice A – Disponibilità dei dati registrati dalla RMCL	52
Appendice B – Lista degli eventi sismici riconosciuti nell'intera area di rilevazione	56
Appendice C – Serie temporali della Rete GNSS LODI nel sistema di riferimento ITRF08	2
Appendice D – Statistica degli accessi al sito della Rete di Monitoraggio di Cornegliano Laudense	9

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
- 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. 4

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 dall'OGS nel periodo di tempo considerato, anche per conto delle Regioni Veneto e Friuli Venezia Giulia, oltre alle stazioni della Provincia Autonoma di Trento. Il rettangolo punteggiato di verde rappresenta l'area di riconoscimento dei terremoti regionali, indispensabile per evitare false identificazioni di eventi locali. ... 7

Figura 3 - Mappa degli eventi localizzati dalla RMCL nel periodo 1/1/2017-30/4/2023, a distanza epicentrale ≤ 30 km dal sito di stoccaggio (a) e a una scala di maggiore dettaglio (b). Gli epicentri sono rappresentati con i cerchi con dimensione proporzionale alla magnitudo o con quadrato se privi di valore di magnitudo; i triangoli colorati rappresentano le stazioni appartenenti alle diverse reti sismiche esistenti nell'area; il cerchio nero tratteggiato, centrato sul sito di stoccaggio e con raggio 30 km, rappresenta l'Area Esterna di rilevazione. 12

Figura 4 - Forme d'onda registrate per l'evento ML0.9 del 25/2/2023 ore 02:49:19 avvenuto nel Dominio Interno. Sono raffigurate tre componenti per ogni stazione (la componente verticale è in colore blu, le due componenti orizzontali rispettivamente in rosso (E-O) e verde (N-S)). Le tracce sono quelle registrate dai sismometri posti in pozzo dalle seguenti stazioni, ordinate dall'alto verso il basso in base alla distanza dall'evento: OL06, OL01, OL04, OL05, OL02, OL03, OL07 e OL09. 14

Figura 5 - (a) Pressione media misurata al collettore dei pozzi durante le attività dell'impianto del sito di Cornegliano Laudense. (b) Portata di gas (unità in milioni di metri cubi standard al giorno) durante le attività dell'impianto. In verde e rosso sono rappresentati rispettivamente i valori in entrata e uscita. (c) Volume complessivo del gas contenuto nel serbatoio naturale durante le attività dell'impianto, normalizzato al valore di volume massimo. I valori assoluti del volume sono mascherati di proposito in quanto rappresentano un dato commerciale sensibile e riservato. Continua alla pagina successiva. 15

Figura 6 - Localizzazione delle stazioni GNSS utilizzate per l'inquadramento di OL01. 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 in questo grafico. 20

Figura 7 - Serie temporale di OL01 (nel sistema di riferimento EURA) 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). 23

Figura 8 - Serie temporale della stazione CREA secondo il sistema di riferimento EURA. 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 7. 24

Figura 9 - Serie temporale della stazione CREM secondo il sistema di riferimento EURA. 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 7. 25

Figura 10 - Serie temporale della stazione MILA secondo il sistema di riferimento EURA. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di Figura 7. 26

- Figura 11** - Serie temporale della stazione MIL2 secondo il sistema di riferimento EURA. 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 7. 27
- Figura 12** - Serie temporale della stazione PAVI secondo il sistema di riferimento EURA. 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 7. 28
- Figura 13** - Residui delle serie temporali NORTH, EAST, UP 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 e MIL2, punti verdi (MILA e MIL2 sono state unite assieme per ricoprire l'intero arco temporale 2017-2022). In viola, in primo piano, la stazione OL01 a cui è stato tolto il trend delle altre stazioni. In nero la media dei residui delle stazioni di riferimento. Per "agganciare" le serie temporali ed evidenziare, graficamente, l'anomalia di OL01 abbiamo considerato come zero la media di OL01 calcolata dall'inizio fino a giugno 2019 (in corrispondenza dell'interruzione di dati). Per completezza, si evidenzia che in supporto alla stazione OL01 descritta in questa relazione, per supplire a malfunzionamenti della stessa, è stato accoppiato alla stessa antenna anche un ricevitore GNSS a basso costo che stiamo testando. 29
- Figura 14** - 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. 30
- Figura 15** - Distribuzione nel piano tempo/baseline perpendicolare dei dati SAR S-1 acquisiti da orbite discendenti sull'area di interesse. I triangoli neri e rossi rappresentano rispettivamente i dati S-1A e S-1B. Si segnala l'assenza di acquisizioni S-1B a partire da Dicembre 2021. 33
- Figura 16** - 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 2023. La stellina rossa nel riquadro bianco indica il sito dell'impianto di stoccaggio. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni GPS identificate sulla mappa tramite stelline nere, i grafici dei confronti tra le serie temporali di deformazione GPS 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 19. 34
- Figura 17** - Zoom della mappa di velocità media di deformazione di Figura 16 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 2023. 35
- Figura 18** - Distribuzione nel piano tempo/baseline perpendicolare dei dati SAR S-1 acquisiti da orbite ascendenti sull'area di interesse. I triangoli neri e rossi rappresentano rispettivamente i dati S-1A e S-1B. Si segnala l'assenza di acquisizioni S-1B a partire da Dicembre 2021. 36
- Figura 19** - 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 2023. La stellina rossa nel riquadro bianco indica il sito dell'impianto di stoccaggio. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni GPS identificate sulla mappa tramite stelline nere, i grafici dei confronti tra le serie storiche di deformazione GPS 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 20. 37
- Figura 20** - Zoom della mappa di velocità media di deformazione di Figura 19 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 2023. 39

Figura 21 - 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 tre stazioni GPS identificate sulla mappa tramite stelline nere, i grafici dei confronti tra la componente verticale delle serie storiche di deformazione GPS (asterischi rossi) e quella ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri). Il rettangolo bianco fa riferimento alla zona analizzata in dettaglio in Figura 23. 41

Figura 22 - 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 tre stazioni GPS identificate sulla mappa tramite stelline nere, i grafici dei confronti tra le serie storiche di deformazione GPS 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 24. 42

Figura 23 - Zoom della mappa della componente verticale della velocità media di deformazione di Figura 21 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). 43

Figura 24 - Zoom della mappa della componente Est-Ovest della velocità media di deformazione Figura 22 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). 44

Figura 25 - 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. 46

Figura 26. 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. 46

Indice delle Tabelle

Tabella 1 - Sommario delle stazioni della RMCL. Informazioni dettagliate si trovano nelle singole schede di stazione riportate nella Appendice B della relazione di consegna della rete (Priolo et al., 2017).	3
Tabella 2 - Strumentazione sismologica installata presso le stazioni della RMCL.	5
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 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 dall'OGS.	6
Tabella 4 - <i>Modello 1D definito 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.</i>	9
Tabella 5 - Principali interventi riguardanti la strumentazione sismica e geodetica.	11
Tabella 6 - <i>Coordinate ETRF2000 (2008.0) delle stazioni CREA, CREM, MILA, MIL2, PAVI e del sito OL01. 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).</i>	20
Tabella 7 - <i>Velocità dei siti della Rete GNSS OL01 nei sistemi di riferimento ITRF08 e EURA. Le stime ottenute per la stazione OL01 sono indicate in grassetto e colore rosso. 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).</i>	22
Tabella 8 - Caratteristiche principali comuni ai due dataset SAR S-1 utilizzati.	31
Tabella 9 - Caratteristiche principali relative a ciascuno dei due dataset SAR S-1 utilizzati.	32

Sommario

Il presente documento descrive le attività effettuate nel periodo 1/10/2022-30/4/2023 per l'esercizio del monitoraggio integrato svolto dall'OGS e dall'IREA-CNR presso la concessione di stoccaggio gas naturale denominata "Cornegliano Stoccaggio". Esso costituisce il primo rapporto previsto per l'anno di esercizio 2023, secondo contratto. L'attività di monitoraggio integrato è commissionata da Ital Gas Storage S.p.A. all'OGS e all'IREA-CNR con il Contratto dd. 27/1/2023 con cui viene disciplinato 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 sono quelle descritte nella relazione sulle attività iniziali datata 13/11/2018 (Priolo et al., 2018).

In sintesi, il presente rapporto è organizzato nel modo seguente:

- il Capitolo 1 descrive il **monitoraggio sismico**: (1.1) cenni sulle caratteristiche della rete e sulle procedure di identificazione e localizzazione degli eventi sismici; (1.2) lo stato di funzionamento della rete e del sistema di acquisizione dati; (1.3) risultati del monitoraggio sismico ottenuti per l'intero periodo di osservazione 1/1/2017-30/4/2023 con una descrizione della sismicità rilevata.
- il Capitolo 2 descrive il **monitoraggio delle deformazioni superficiali**. La prima parte del capitolo (Cap. 2.1) descrive 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 30/4/2023.
- il Capitolo 3 contiene le **Conclusioni**.

Le Appendici, alla fine del documento, riportano i seguenti contenuti:

- Appendice A: grafici dello stato di funzionamento della rete in formato tabellare;
- Appendice B: risultati del monitoraggio sismico;
- 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.

Come detto, il presente rapporto è stato redatto dai ricercatori e tecnologi dell'OGS e dell'IREA-CNR. I Capitoli 1 e 2.1 sono stati redatti dall'OGS; il Capitolo 2.2 è stato scritto dall'IREA-CNR. Le conclusioni, al Capitolo 3, sono state scritte congiuntamente.

1. Monitoraggio sismico

1.1 La Rete di Monitoraggio di Cornegliano Laudense (RMCL)

La RMCL è composta da dieci stazioni sismometriche e da una stazione geodetica GNSS permanente. Le stazioni sono indicate con la sigla OL01-OL10, in accordo al codice OL che è il codice internazionale di registrazione della RMCL. La [Tabella 1](#) ne riassume le principali informazioni, 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 dall'OGS, dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) e da altri Enti, che completano il perimetro esterno della RMCL a distanza di alcune decine di chilometri nelle varie direzioni. Le stazioni non gestite direttamente dall'OGS sono acquisite in modalità off-line.

Tutte le stazioni sismometriche della RMCL sono dotate di sismometro posto in pozzo, mediamente ad una profondità di 75 m, per ridurre i disturbi di carattere antropico e il rumore sismico che si propaga principalmente nello strato superficiale del suolo. La [Tabella 2](#) illustra la strumentazione con cui è equipaggiata la RMCL. I dati sono acquisiti con un campionamento di 200 Hz per i sismometri e di 100 Hz per gli accelerometri.

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 Cavigio
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 - Sommario 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).

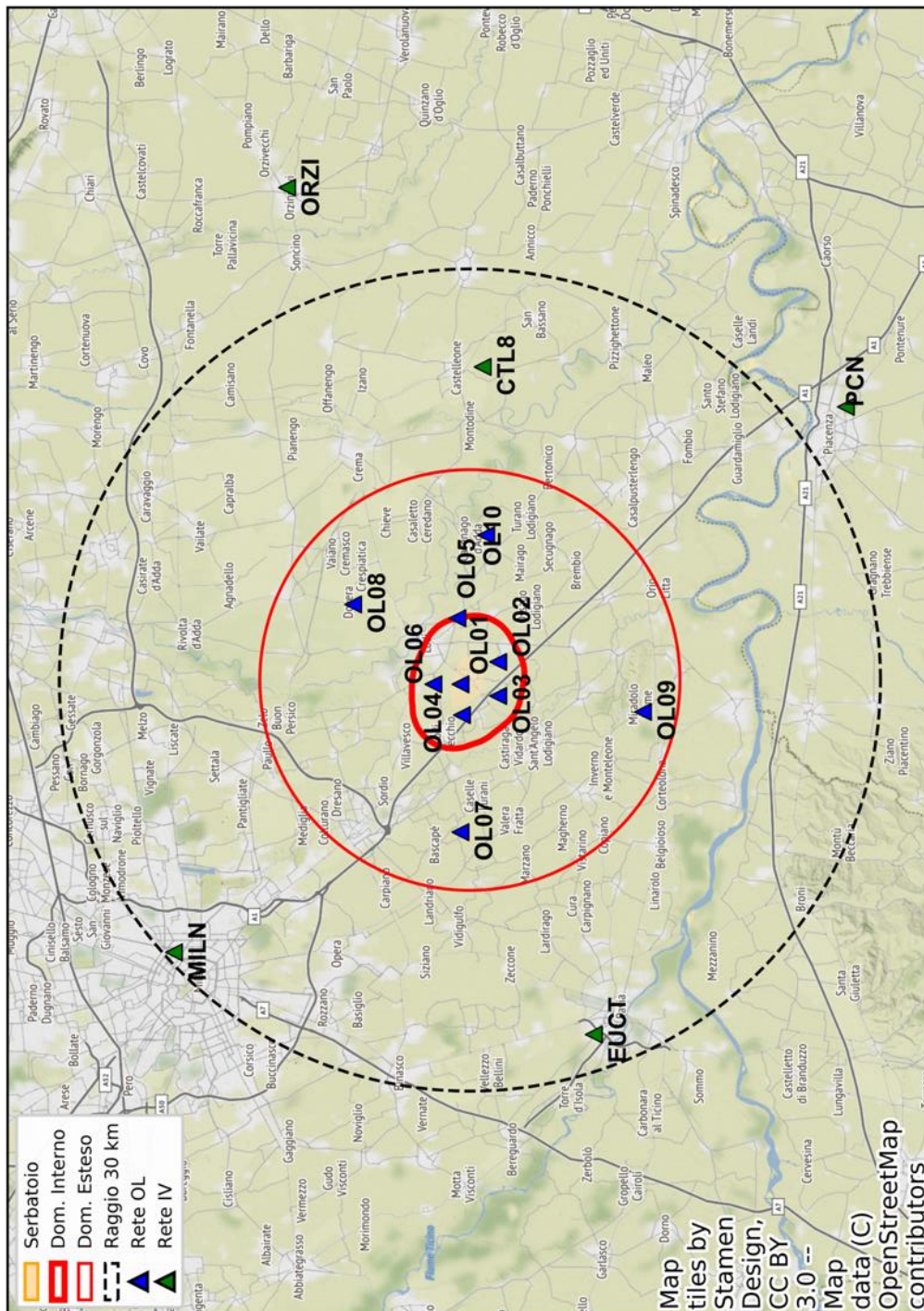


Figura 1 - Mappa della RMCL. I triangoli indicano le stazioni della RMCL (in blu) e della Rete Sismica Nazionale Centralizzata (RSNC) dell'INGV (in verde) usate per integrare le rilevazioni. L'area gialla al centro indica la proiezione in superficie della parte più produttiva del serbatoio. Le linee 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.



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

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

Tutte le stazioni sono dotate di apparati di tele-trasmissione dei dati e antenne GPS per la sincronizzazione precisa del tempo. I dati acquisiti dalle stazioni vengono inviati al centro di acquisizione presso le sedi OGS di Sgonico (Trieste) e Udine.

I dati sismometrici acquisiti vengono archiviati in tempo reale in formato *mseed* sui dischi dei computer dedicati all'acquisizione e archiviati permanentemente su un'unità di archiviazione di rete (NAS di marca QNAP) con capacità complessiva di circa 50 TB e che è montata direttamente come file system dai sistemi di acquisizione ed elaborazione. La rete RMCL accumula approssimativamente 1.2 GB di dati al giorno, quindi circa 0.5 TB all'anno. Tutte le informazioni relative ai siti e alla strumentazione installata sono anche caricate nel database che gestisce i dati sismologici strumentali dell'OGS, denominato OASIS (oasis.crs.inogs.it) e descritto in Priolo et al. (2012; 2015a).

Per migliorare 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 ([Tabella 3](#)) e della Rete Sismica Regionale dell'Italia Nord-occidentale (RSNI) che fa capo al laboratorio di sismologia dell'Università di Genova. Dette stazioni sono acquisite in modalità off-line e quindi non entrano direttamente nel sistema di localizzazione in tempo reale. Inoltre, per discriminare più efficacemente gli eventi lontani, anche se di scarso interesse per l'area della concessione di stoccaggio, vengono utilizzate numerose stazioni appartenenti ad altre reti che operano nel Nord Italia, quali la Rete Sismica dell'Italia Nord-Orientale (codice OX) gestita da OGS anche per conto delle Regioni Veneto e Friuli-Venezia Giulia e la Rete Sismica del Trentino (ST) della Provincia Autonoma di Trento.

Per la rilevazione 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 e il Dominio Esteso (DE) si allarga fino a 15 km

dal perimetro esterno del serbatoio. Le aree corrispondenti in superficie ai due domini sono mostrate con linee rosse in [Figura 1](#).

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 dall'OGS.

Le procedure di elaborazione dei dati di basso livello (intendendo con ciò le fasi di acquisizione dei dati dalle stazioni), di archiviazione dei *files* dei dati e di elaborazione per il riconoscimento automatico in tempo quasi-reale (*real-time*) della sismicità sono state già descritte nel rapporto di consegna della rete (Priolo et al., 2017). Qui descriveremo brevemente come si svolge l'analisi dei dati. Il dettaglio completo delle procedure e operazioni è descritto 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 completate con procedure e funzioni sviluppate dai ricercatori e tecnologi dell'OGS.

Ricordiamo che il sistema di elaborazione si divide in due parti:

- **real-time**, è la parte di elaborazione che comprende il riconoscimento e la localizzazione automatica degli eventi sismici con eventuale notifica di eventi



OGS

Istituto Nazionale
di Oceanografia
e di Geofisica
Sperimentale



Consiglio Nazionale delle Ricerche

istituto per il rilevamento
elettromagnetico
dell'ambiente

locali al personale di reperibilità;

- **off-line**, è la parte che comprende la rielaborazione di tutti i dati con controllo manuale e che viene 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**: è l'operazione con cui la registrazione viene analizzata per riconoscere e marcare la presenza di anomalie di ampiezza del segnale (detti, con terminologia tecnica, *trigger*) rispetto al rumore di fondo. Questa operazione viene effettuata in base a criteri predeterminati per tutte le tracce acquisite dal sistema.

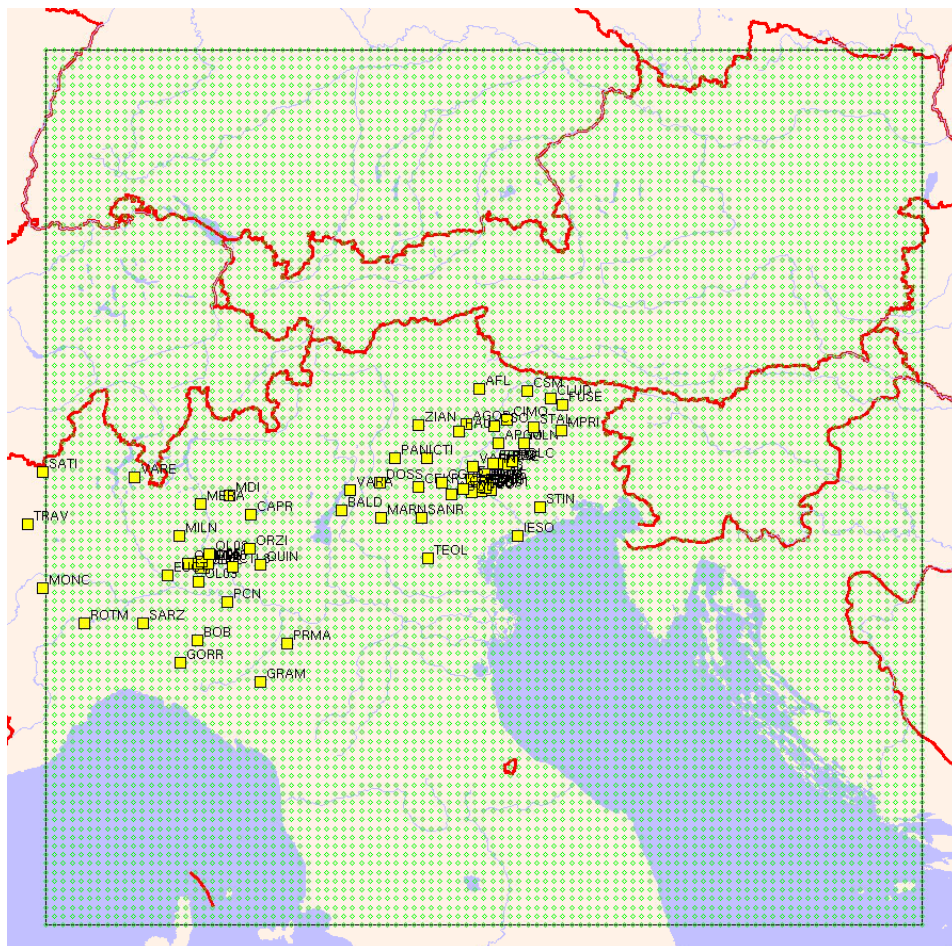


Figura 2 - Insieme delle stazioni sismometriche utilizzate dal sistema di monitoraggio sismico in cui è inserita la RMCL. Nell'area della Pianura Padana e nell'area Occidentale si riconoscono le stazioni di INGV e RSNI più vicine alla RMCL. Nell'area Orientale si distinguono invece le stazioni appartenenti alle reti gestite dall'OGS nel periodo di tempo considerato, anche per conto delle Regioni Veneto e Friuli Venezia Giulia, oltre alle stazioni della Provincia Autonoma di Trento. Il

rettangolo punteggiato di verde rappresenta l'area di riconoscimento dei terremoti regionali, indispensabile per evitare false identificazioni di eventi locali.

- **Associazione:** è l'operazione con cui un evento viene classificato come tale in base al fatto che numerose stazioni rilevano dei *trigger* con una certa sincronia. 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 dei test di attendibilità, ne conferma la migliore.

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

Per il ramo *off-line* l'obiettivo è quello di riconoscere la microsismicità e quindi di rilevare tutti gli eventi sismici nell'area studio nei limiti della capacità di rilevazione della rete. È in questa fase che vengono inserite all'interno del 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 fortemente il carico computazionale e la rilevazione di falsi eventi a causa dei pochi *trigger* usati. Per questo motivo, a valle delle operazioni di detezione e associazione, è necessario l'intervento di un sismologo, che riconosce gli eventi veri e li discrimina da quelli falsi. Questa operazione è chiamata **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 gli eventi marcati vengono effettuate le seguenti operazioni specifiche:

- estrazione delle forme d'onda relative all'evento per tutte le stazioni;
- **picking** manuale, operazione con cui vengono rilevati dal sismologo i tempi di arrivo delle fasi P e, ove possibile, delle fasi S;
- **localizzazione**, utilizzando le fasi rilevate manualmente;
- stima della **magnitudo locale**.

Le localizzazioni fornite in uscita dal sistema di elaborazione e analisi sono ottenute con il metodo Hypoellipse (Lahr, 1984). Esso utilizza un modello 1D della crosta terrestre a strati piani 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 ogni strato. Il modello adottato ([Tabella 4](#)) rappresenta la geologia a scala sub-regionale, che è caratterizzata da una spessa copertura di depositi alluvionali sopra la base rocciosa; ciò si ripercuote in una variazione evidente nei primi due strati sia delle velocità V_p sia del rapporto V_p/V_s . Ricordiamo che il rapporto V_p/V_s influenza 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 (ML) con la formula di attenuazione di Bragato e Tento (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 riportate anche nel sito web all'indirizzo rete-cornegliano.crs.ogs.it.

	Vp (km/s)	Profondità (km)	Vp/Vs [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 definito in questo studio per le localizzazioni degli eventi sismici. Le colonne indicano da sinistra a destra in successione: il numero di strato, la velocità Vp, la profondità dello strato e il valore di Vp/Vs.

1.2 Operatività della rete sismica

Durante il periodo in esame (1/11/2022-30/04/2023) la rete ha svolto le funzioni di monitoraggio sismico previste. La strumentazione, il sistema di acquisizione, come pure quello di prima elaborazione e archiviazione dei dati hanno funzionato affidabilmente per la maggior parte del tempo.

È stato completamente aggiornato il sistema di trasmissione cellulare della rete, con la sostituzione dei vecchi router 3G, diventati obsoleti a causa del programmato spegnimento dei ripetitori 3G a favore dei nuovi ripetitori 4G e 5G. I nuovi router impiegati, Advantech ICR2531, garantiscono la trasmissione con tecnologia LTE altamente performante.

Dobbiamo rilevare l'irregolarità nella presenza dei dati nelle due settimane tra fine dicembre 2022 e inizio gennaio 2023, a causa della notevole persistenza di condizioni meteorologiche avverse, con estesa e continua copertura nuvolosa e costante presenza di nebbia. L'assenza o ridotta irradiazione solare non consente infatti la sufficiente generazione di energia da parte dei pannelli fotovoltaici, quale fonte di alimentazione della strumentazione. Questo ha richiesto uno specifico intervento a fine dicembre per la sostituzione e/o la ricarica delle batterie in crisi mediante generatori portatili. La

disponibilità dei dati acquisiti mese per mese, nel periodo considerato, è riassunta nelle tabelle riportate in Appendice A.

Per quanto riguarda l'esercizio delle stazioni, l'ordinaria manutenzione operata da remoto è stata effettuata regolarmente, mentre nella [Tabella 5](#) sono stati riportati solo gli interventi in loco che hanno implicato, delle variazioni di strumentazione o accessori presso le stazioni. Non vengono riportati invece gli interventi di ordinario controllo e pulizia delle stazioni in regime di funzionamento regolare.

Tutte le stazioni sono state oggetto di periodica manutenzione del verde e controllo dello stato dell'armadio e della recinzione, più frequentemente -circa ogni 30gg- nel periodo estivo, circa ogni due mesi nel periodo invernale.

Data	Stazione	Intervento
2022.12.14	OL07	Aggiornamento della trasmissione a tecnologia LTE, Installazione nuovo router Advantech ICR2531
2022.12.14	OL04	Aggiornamento della trasmissione a tecnologia LTE, Installazione nuovo router Advantech ICR2531
2022.12.14	OL06	Aggiornamento della trasmissione a tecnologia LTE, Installazione nuovo router Advantech ICR2531
2022.12.14	OL01	Aggiornamento della trasmissione a tecnologia LTE, Installazione nuovo router Advantech ICR2531
2022.12.14	OL03	Aggiornamento della trasmissione a tecnologia LTE, Installazione nuovo router Advantech ICR2531
2022.12.14	OL02	Aggiornamento della trasmissione a tecnologia LTE, Installazione nuovo router Advantech ICR2531
2022.12.14	OL05	Aggiornamento della trasmissione a tecnologia LTE, Installazione nuovo router Advantech ICR2531
2022.12.14	OL10	Aggiornamento della trasmissione a tecnologia LTE, Installazione nuovo router Advantech ICR2531
2022.12.15	OL09	Aggiornamento della trasmissione a tecnologia LTE, Installazione nuovo router Advantech ICR2531
2022.12.15	OL08	Aggiornamento della trasmissione a tecnologia LTE, Installazione nuovo router Advantech ICR2531
2022.12.15	OL01	Disinstallazione GNSS TOPCON G5, ricollegato LZero
2022.12.29	OL05	Sostituzione / Ricarica batterie con generatore portatile
2022.12.29	OL10	Ricarica batterie con generatore portatile
2022.12.29	OL02	Sostituzione / Ricarica batterie con generatore portatile
2022.12.29	OL03	Ricarica batterie con generatore portatile
2022.12.29	OL01	Ricarica batterie con generatore portatile
2022.12.29	OL04	Ricarica batterie con generatore portatile
2022.12.29	OL06	Sostituzione batterie
2022.12.30	OL05	Ricarica batterie con generatore portatile

2022.12.30	OL07	Ricarica batterie con generatore portatile
2022.12.30	OL09	Ricarica batterie con generatore portatile
2023.02.27	OL08	Disinstallazione acquirente MINIMUS malfunzionante
2023.02.27	OL01	Reinstallazione GNSS TOPCON G5
2023.03.17	OL08	Reinstallazione acquirente MINIMUS
2023.03.17	OL01	Sostituzione GNSS LZero
2023.03.17	OL03	Riconnessione e controllo del funzionamento Relè
2023.03.17	OL06	Riconnessione e controllo del funzionamento Relè

Tabella 5 - Principali interventi riguardanti la strumentazione sismica e geodetica.

1.3 Eventi rilevati dalla RMCL e attività di stoccaggio

Nel periodo 1/11/2022-30/4/2023 la RMCL ha rilevato due eventi sismici, uno nel Dominio Interno, corrispondente all'area contenuta entro 3km dal serbatoio, e uno poco distante nel Dominio Esteso, corrispondente all'area contenuta entro 15km dal serbatoio. L'evento sismico del 25/02/2023 di magnitudo 0.9, è stato localizzato ad una profondità di 2.2km. L'evento sismico del 28/03/2023 con una profondità simile al precedente (2.9km) è caratterizzato, invece, da una magnitudo pari a 1.3. Entrambi gli eventi si sono verificati nella stessa area nei dintorni di Lodi dove sono avvenuti eventi registrati negli anni di monitoraggio precedenti e associati verosimilmente a sorgenti poco profonde. Anche alla fine di questo semestre d'esercizio non si sono rilevate variazioni statisticamente significative nella sismicità durante le attività di stoccaggio.

In [Figura 5](#) riportiamo la mappa degli eventi sismici rilevati a partire dal 1/1/2017. La lista completa di tutti gli eventi rilevati a partire dal 1/1/2017 con i loro parametri è riportata nella Appendice B.

La [Figura 6](#) mostra, a titolo di esempio, i sismogrammi registrati dalla rete per l'evento ML 0.9 del 25/02/2023 ore 02:49:19 avvenuto nel Dominio Interno. La distanza epicentrale delle stazioni visualizzate è compresa tra 2 e 17 km.

La [Figura 7](#) mostra i dati medi dell'attività di stoccaggio del gas con un campionamento orario. I tre grafici rappresentano (a) la pressione media (unità in bar) misurata al collettore dei pozzi, (b) la portata (milioni di standard m³ giorno) durante le attività dell'impianto e (c) il volume. I grafici sono aggiornati quotidianamente. I dati sono forniti da Ital Gas Storage. In ciascuno dei cluster A e B sono attivi 6 pozzi. Il pannello (c) della [Figura 7](#) mostra il volume complessivo del gas iniettato nel serbatoio. I valori numerici del volume sono mascherati di proposito in quanto rappresentano un dato sensibile commerciale, considerato riservato.

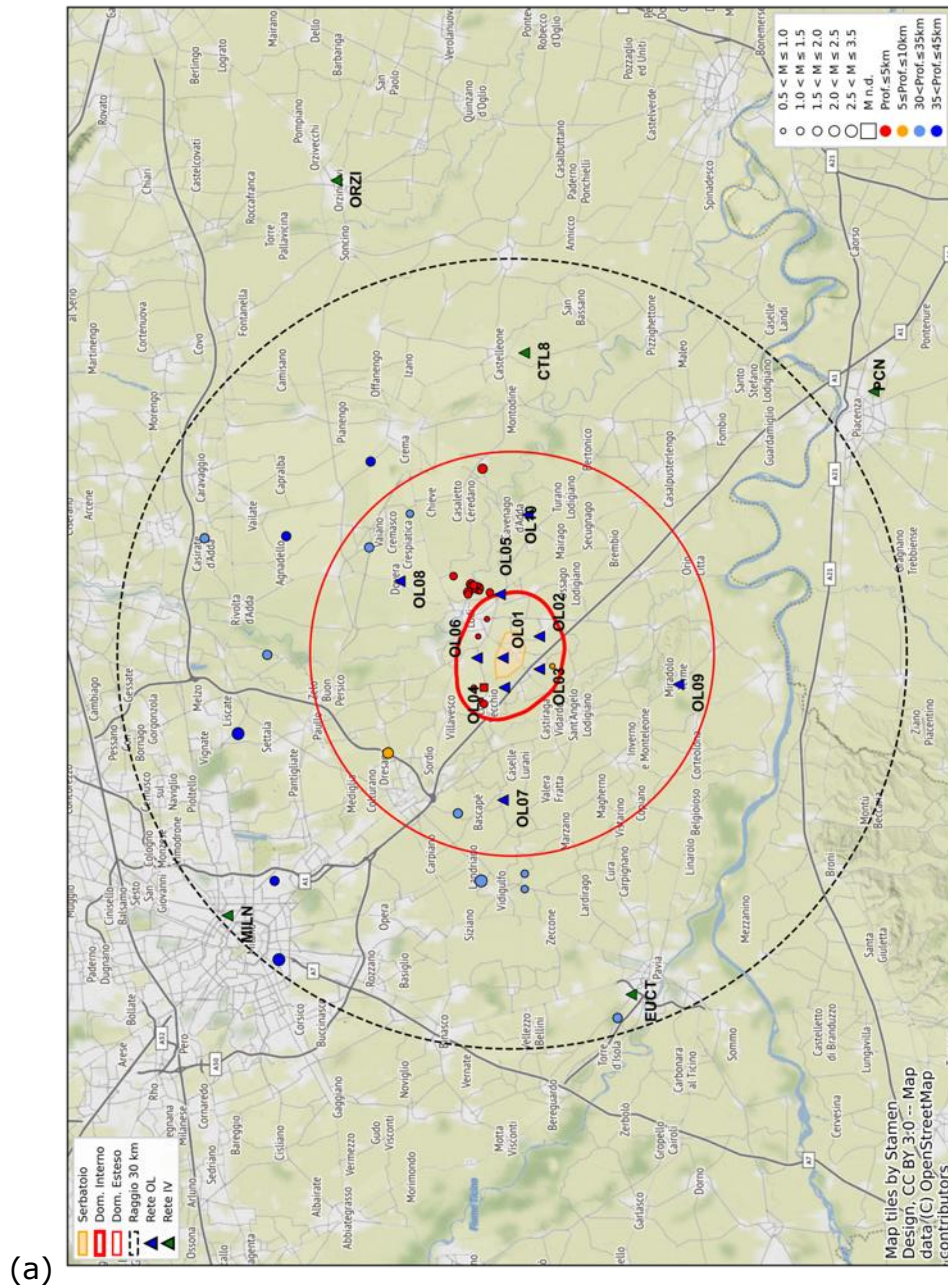


Figura 3 - Mappa degli eventi localizzati dalla RMCL nel periodo 1/1/2017-30/4/2023, a distanza epicentrale ≤ 30 km dal sito di stoccaggio (a) e a una scala di maggiore dettaglio (b). Gli epicentri sono rappresentati con i cerchi con dimensione proporzionale alla magnitudo o con quadrato se privi di valore di magnitudo; i triangoli colorati rappresentano le stazioni appartenenti alle diverse reti sismiche esistenti nell'area; il cerchio nero tratteggiato, centrato sul sito di stoccaggio e con raggio 30 km, rappresenta l'Area Esterna di rilevazione.

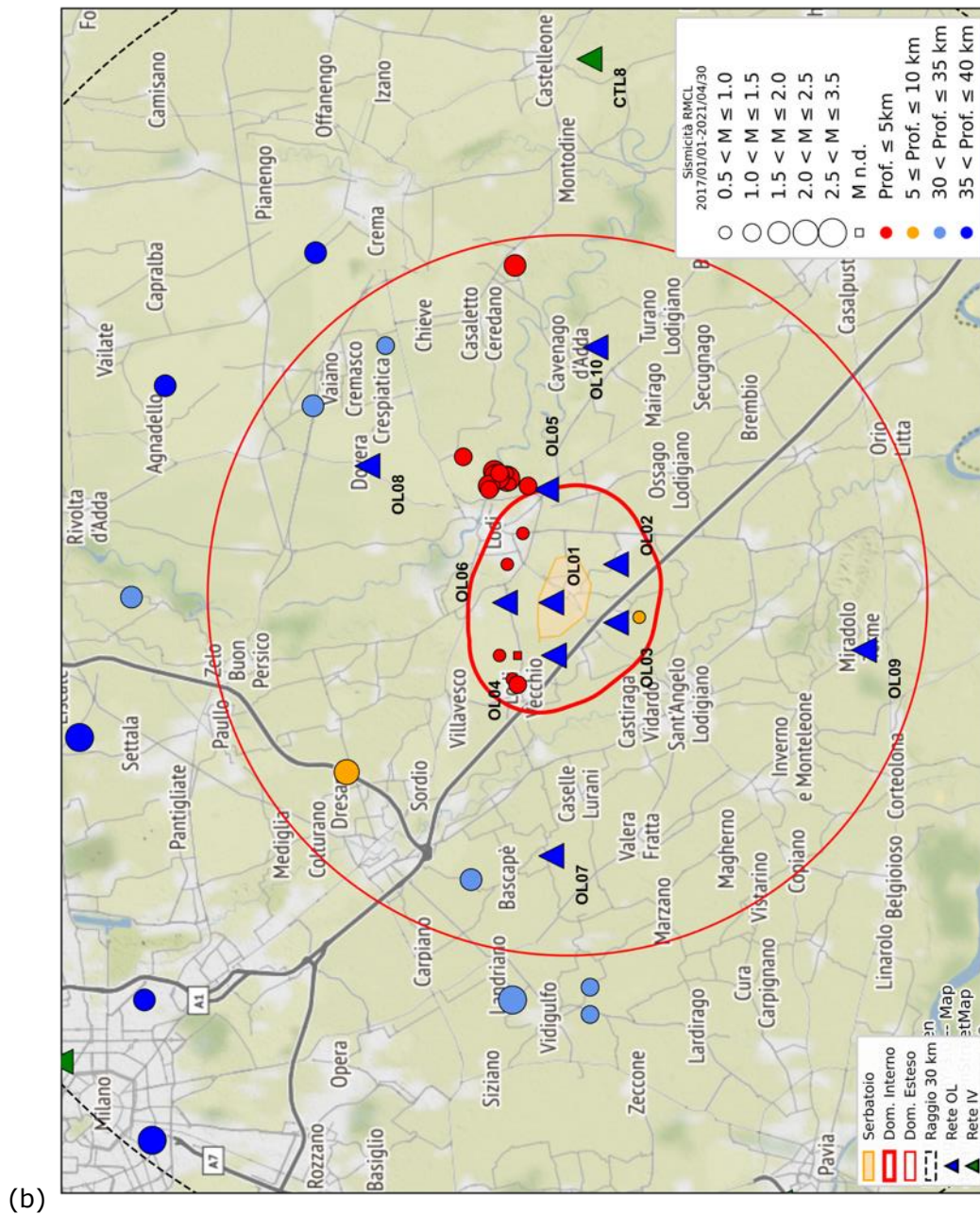


Figura 5 – Continua dalla pagina precedente.

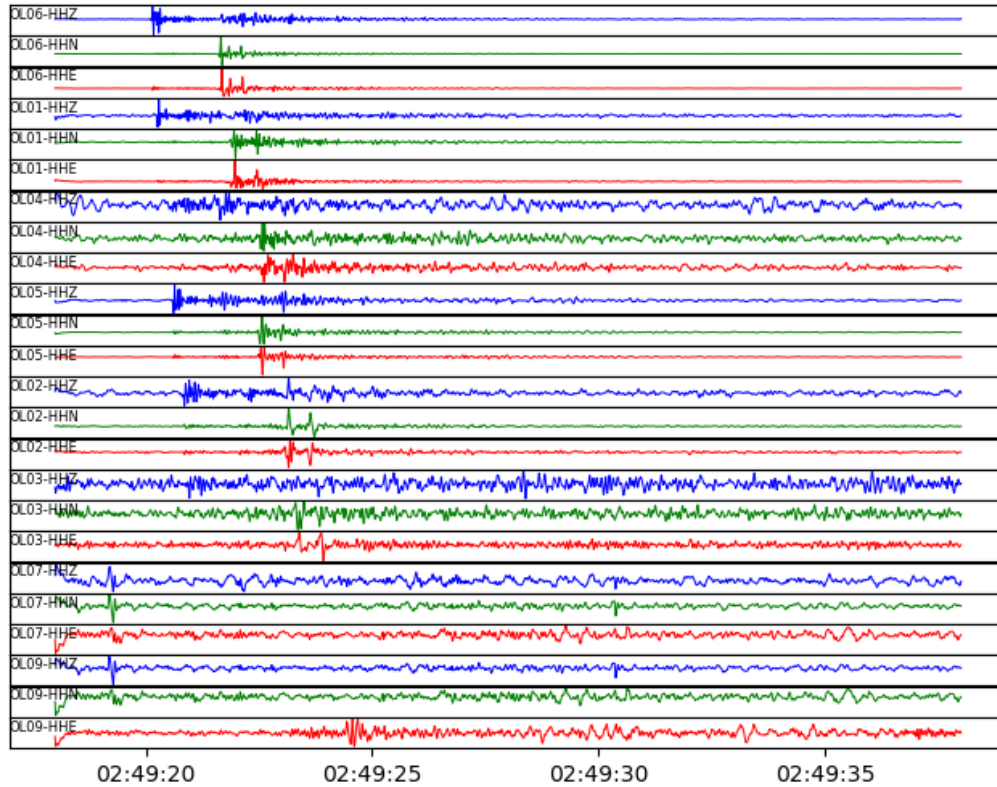
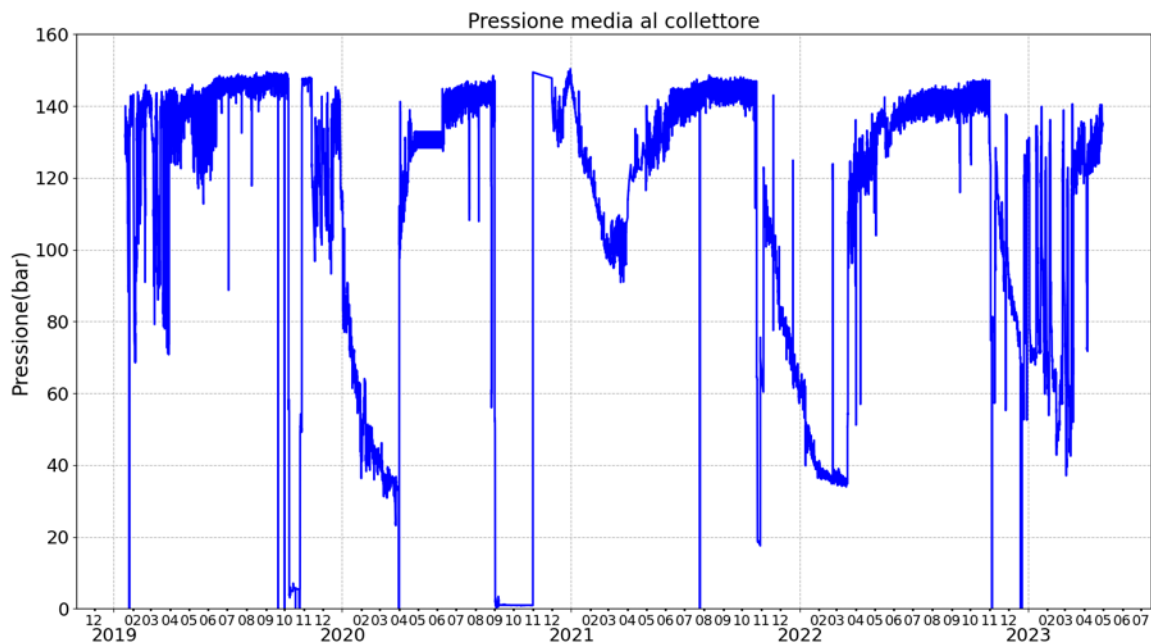


Figura 4 - Forme d'onda registrate per l'evento ML0.9 del 25/2/2023 ore 02:49:19 avvenuto nel Dominio Interno. Sono raffigurate tre componenti per ogni stazione (la componente verticale è in colore blu, le due componenti orizzontali rispettivamente in rosso (E-O) e verde (N-S)). Le tracce sono quelle registrate dai sismometri posti in pozzo dalle seguenti stazioni, ordinate dall'alto verso il basso in base alla distanza dall'evento: OL06, OL01, OL04, OL05, OL02, OL03, OL07 e OL09.

(a)



(b)

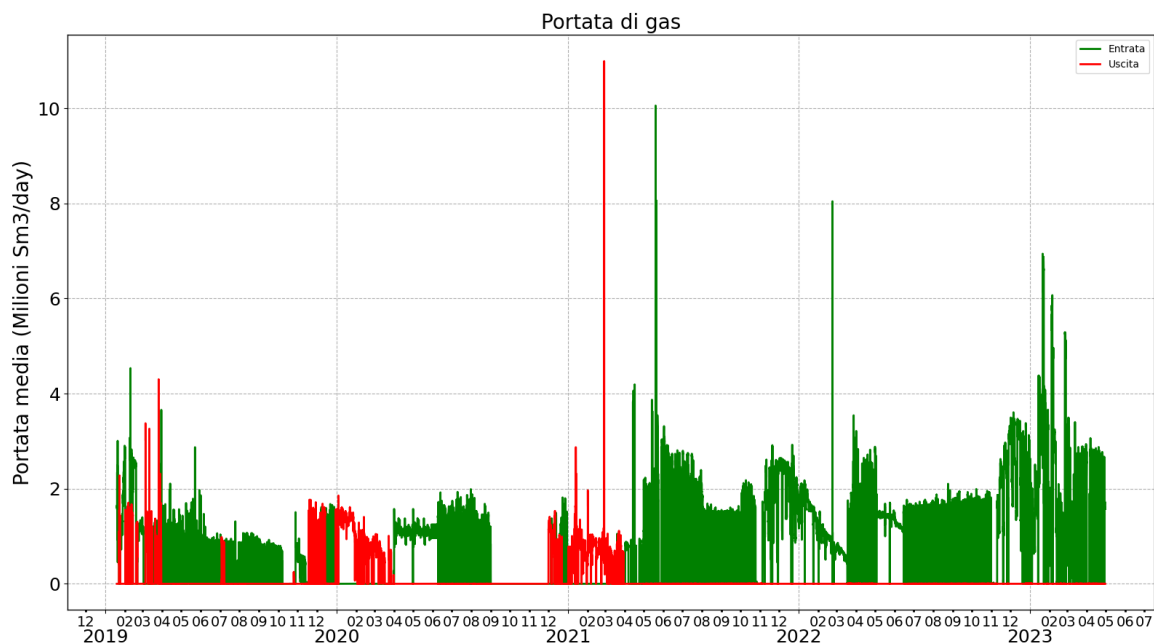


Figura 5 – (a) Pressione media misurata al collettore dei pozzi durante le attività dell'impianto del sito di Cornegliano Laudense. (b) Portata di gas (unità in milioni di metri cubi standard al giorno) durante le attività dell'impianto. In verde e rosso sono rappresentati rispettivamente i valori in entrata e uscita. (c) Volume complessivo del gas contenuto nel serbatoio naturale durante le attività dell'impianto, normalizzato al valore di volume massimo. I valori assoluti del volume sono mascherati di proposito in quanto rappresentano un dato commerciale sensibile e riservato. Continua alla pagina successiva.

(c)

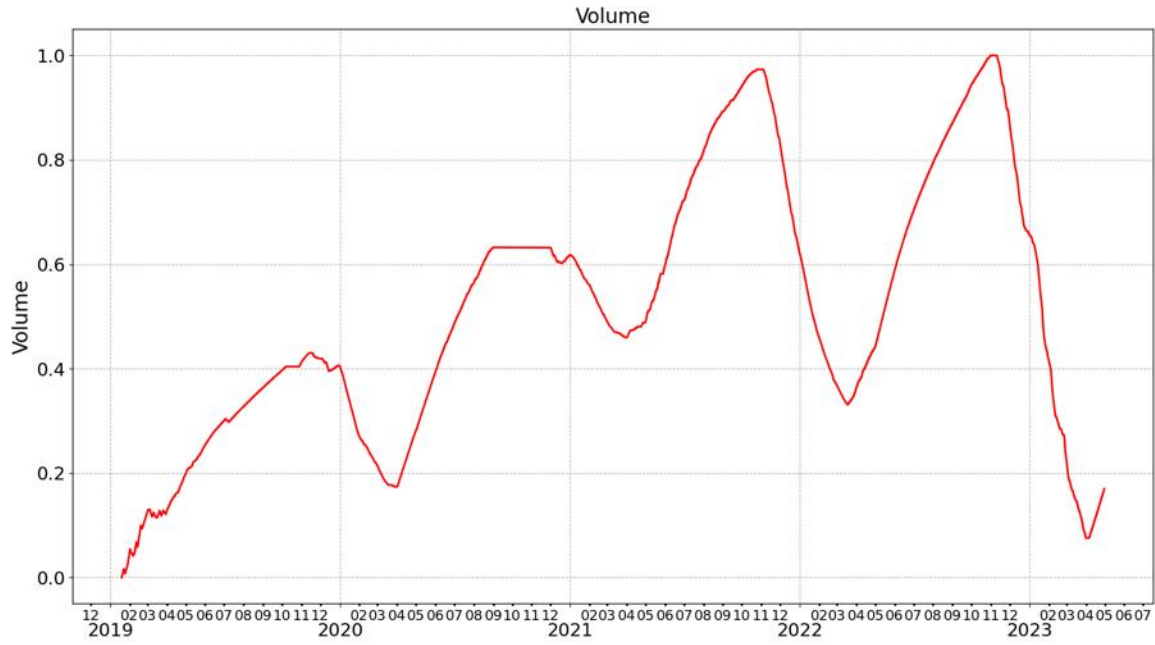


Figura 5 – Continua dalla pagina precedente.

2. Monitoraggio delle deformazioni superficiali

2.1 Elaborazione dei dati della stazione GNSS OL01

La stazione GNSS (*Global Navigation Satellite System*) OL01 è ubicata vicino al "Cluster A" dell'impianto di Cornegliano Laudense, il quale ospita anche la stazione sismometrica. La stazione GNSS è operativa da fine ottobre 2016 ed è in grado di ricevere i segnali di sei sistemi satellitari di navigazione: GPS, GLONASS, GALILEO, QZSS, SBAS e BeiDou.

Le osservazioni (dati in formato RINEX, *Receiver Independent Exchange Format*) della stazione GNSS OL01, sono stati elaborati in modo da ottenere le stime giornaliere delle coordinate e le serie temporali secondo due diversi sistemi di riferimento:

- il sistema di riferimento globale ITRF08 (*International Terrestrial Reference Frame 2008*, http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2008/), 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'ITRF08 è il 2008.
- il sistema di riferimento europeo EURA (Altamimi et al., 2012), 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.

In questo lavoro, l'intervallo di tempo considerato è 1/1/2017 - 28/4/2023.

È da segnalare che negli ultimi sei mesi il ricevitore NETG5 ha avuto dei malfunzionamenti che hanno causato delle interruzioni nell'acquisizione dei dati. È stato quindi sostituito a febbraio 2023. Dal 28 febbraio 2023 la stazione GNSS OL01 funziona di nuovo correttamente.

2.1.1 Dati elaborati

Il *dataset* della stazione OL01 viene registrato in file con formato RINEX ed è disponibile in sessioni giornaliere e con campionamento a 30 secondi (2880 osservazioni quotidiane).

Le osservazioni di OL01, così come quelle delle altre stazioni GNSS, sono state elaborate a partire dai dati disponibili dal 1/1/2017 con il pacchetto software GAMIT/GLOBK versione 10.71, sviluppato dal Massachusetts Institute of Technology (web.mit.edu),

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

I file RINEX di OL01 registrati dal 1/1/2017 fino al 28/4/2023 sono 1862, così come le giornate elaborate. L'elaborazione dei dati ha infatti prodotto, per OL01, 1754 soluzioni pari all'utilizzo del 94,2% dei dati iniziali. Tale percentuale è più bassa rispetto a quella riportata nelle relazioni precedenti (98,5% di soluzioni in Guidarelli et al., 2022) a causa del malfunzionamento del ricevitore di OL01. Tuttavia, dal 28/02/2023 la stazione funziona correttamente e questo contribuirà ad aumentare il numero di dati disponibili e quindi di soluzioni nei prossimi mesi.

La stazione GNSS OL01 è inquadrata all'interno di una rete di stazioni permanenti denominata Rete GNSS LODI ([Figura 6](#)), appartenenti al Servizio di Posizionamento Interregionale GNSS Piemonte-Lombardia (Rete SPIN):

- CREA (Crema), *baseline* (distanza dalla stazione OL01) pari a 18.6 km;
- CREM (Cremona), *baseline* pari a 45.1 km;
- MILA (Milano), *baseline* pari a 27.9 km;
- MIL2 (Milano), *baseline* pari a 27.8 km;
- PAVI (Pavia), *baseline* pari a 27.6 km.

Si ricorda che i dati della stazione MILA sono stati elaborati fino al giorno 8/2/2019, dopo il quale la stazione è stata dismessa ed è stata sostituita da MIL2. Dal 6/3/2019 nell'elaborazione dei dati abbiamo quindi introdotto MIL2 (coordinate: 45° 28' 42.145091" N, 09° 13' 45.193712" E, quota: 191.119 m).

Le stazioni della Rete GNSS LODI sono a loro volta inquadrare nel sistema ETRF2000 (2008.0) adottato da SPIN in conformità alla Rete Dinamica Nazionale (RDN) gestita dall'Istituto Geografico Militare (IGM). Il risultato dell'inquadramento della stazione OL01 è mostrato in [Tabella 6](#).

Per il calcolo delle serie temporali, a fianco della Rete GNSS LODI, sono state utilizzate le stazioni GNSS appartenenti alla Rete SPIN e le stazioni di riferimento gestite dall'International GNSS Service (IGS, <https://www.igs.org/network/>).

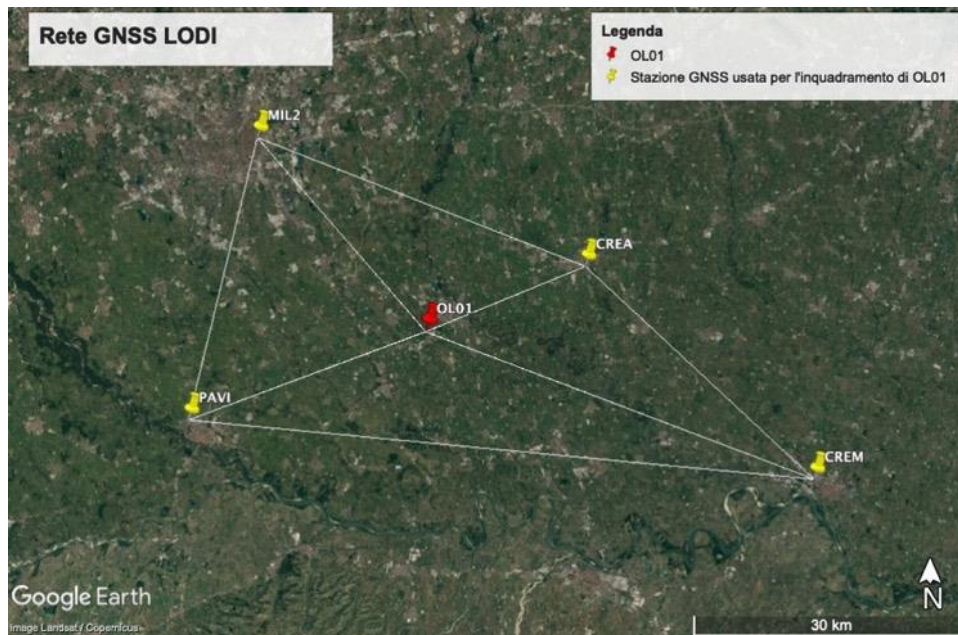


Figura 6 - Localizzazione delle stazioni GNSS utilizzate per l'inquadramento di OL01. Queste stazioni sono CREA (Crema), CREM (Cremona), MIL2 (Milano), PAVI (Pavia). La posizione della stazione MILA, rimasta attiva fino al 8/2/2019, è indistinguibile da quella di MIL2 in questo grafico.

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
PAVI	Pavia	STONEX SC2200 (GPS+GLO+GAL)	STXSA1200 STXR	45° 12' 10.732233" N 9° 08' 10.104212" E	143,638
OL01	Cornegliano Laudense	TPS NET-G5 (GPS+GLO)	CR-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, PAVI e del sito OL01. 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).

2.1.2 Risultati ottenuti

Riportiamo qui di seguito le serie temporali stimate per ciascun sito della Rete GNSS LODI. Come detto i risultati delle elaborazioni coprono il periodo temporale 1/1/2017 - 28/4/2023.

Le serie temporali sono disponibili in due sistemi di riferimento diversi: quello europeo EURA (Figure 7-12) e quello internazionale ITRF08 (Appendice B). Nel sistema internazionale gli spostamenti e le velocità sono stimati rispetto a un sistema inerziale geocentrico che mostra i moti delle placche litosferiche rispetto al centro della Terra. Le stime di velocità sono stimate attraverso un *fit* lineare sull'intera serie temporale degli spostamenti e quindi rappresentano un valore medio della velocità sull'intervallo considerato. I valori delle velocità sono abbastanza importanti: ad esempio àsi attestano su alcune decine di mm/anno sulla componente orizzontale per tutti i siti GNSS. Nel sistema EURA (Altamimi et al., 2012), 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 EURA quindi le velocità sul piano orizzontale sono nettamente ridotte rispetto a quelle in ITRF 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 prima 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 ITRF (Figure in Appendice B) e EURA (Figure 7-12). La stazione OL01 presenta uno spostamento marcato verso Nord e verso Ovest e un trend deformativo verticale positivo verso l'alto, presente già nell'ultima relazione (Guidarelli et al., 2022; Priolo et al. 2022).

La [Tabella 7](#) mostra le velocità stimate dal *fit* delle serie temporali considerando il periodo 1/1/2017 - 28/4/2023. Nel sistema di riferimento ITRF, le velocità stimate nelle componenti orizzontali sono simili (variano di meno di 2 mm/anno) per tutte le stazioni GNSS, con valori dai 15.9 mm/anno di CREA ai 17.5 mm/anno di OL01 in direzione Nord, e dai 19.7 mm/anno di MIL2 e OL01 ai 20.8 mm/anno di CREM in direzione Est. Nella direzione verticale, il range di variazione fra le stazioni è di circa 5 mm/anno, con valori che vanno da -1 mm/anno di MILA ai 4.1 mm/anno di OL01. I valori risultano coerenti con quelli della relazione precedente, con una variazione massima di 0.4 mm/anno per OL01 sulla componente verticale, paragonabili con l'incertezza propria di questo tipo di stima (Masson et al., 2019).

Nel riferimento Euroasiatico (EURA), come indicato nella [Tabella 7](#), i valori di velocità stimati nelle componenti orizzontali sono compresi, nella direzione Nord, fra 0.1 mm/anno (CREA) e 1.7 mm/anno (OL01), e fra -0.4 mm/anno (OL01) e 0.7 (CREM) mm/anno. Anche in questo caso i valori risultano coerenti con quelli della relazione precedente.

Tra le stazioni attorno a OL01, la stazione MIL2 registra un tasso di spostamento verticale (Vel. Up, Tabella 8) significativamente diverso da quello delle altre, ma che nel tempo si sta stabilizzando. Si nota infatti che, mentre nella relazione precedente lo spostamento verticale era di oltre 2 mm/anno, ora risulta diminuito a 1.5 mm/anno. Questo si deve al fatto che ora su questa stazione disponiamo di una serie temporale di circa 4 anni, che ci permette di ottenere delle stime più plausibili in tutte le sue componenti. Blewitt e Lavallée (2002) hanno infatti stimato che per misurazioni precise in campo tettonico e geofisico, almeno 4.5 anni di dati sono fondamentali per rendere trascurabili eventuali *bias* nelle velocità.

	ITRF08			EURA		
	Vel. Nord [mm/anno]	Vel. Est [mm/anno]	Vel. Up [mm/anno]	Vel. Nord [mm/anno]	Vel. Est [mm/anno]	Vel. Up [mm/anno]
OL01	17.5	19.7	4.1	1.7	-0.4	4.01
CREA	15.9	20.6	0.2	0.1	0.5	0.2
CREM	16.5	20.8	-0.1	0.7	0.7	-0.2
MILA	16.3	20.2	-1.0	0.4	0.2	-1.02
MIL2	16.2	19.6	1.5	0.3	-0.3	1.5
PAVI	16.2	20.6	0.6	0.3	0.6	0.6

Tabella 7 - Velocità dei siti della Rete GNSS OL01 nei sistemi di riferimento ITRF08 e EURA. Le stime ottenute per la stazione OL01 sono indicate in grassetto e colore rosso. 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 OL01 rispetto al trend tettonico medio delle stazioni di riferimento per mettere in luce eventuali anomalie locali sulla stazione OL01 che potessero essere messe in relazione con lo stoccaggio di gas nel serbatoio.

Ipotizzando che il moto delle stazioni attorno a OL01, ovvero delle stazioni CREA, CREM, PAVI, MILA e MIL2, 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 OL01, giorno per giorno nelle tre componenti. In questo modo, il segnale residuo su OL01 rappresenta il comportamento locale della stazione stessa. Il risultato è riportato in [Figura 15](#). Dalla Figura si nota che la stazione di OL01 registra un comportamento distinto da quello delle stazioni circostanti a partire dalla seconda metà del 2019, mostrando uno spostamento orizzontale in direzione Nord-Ovest e verticale

verso l'alto, accentuato soprattutto nell'estate del 2021, e di minore entità nell'estate del 2022.

OL01

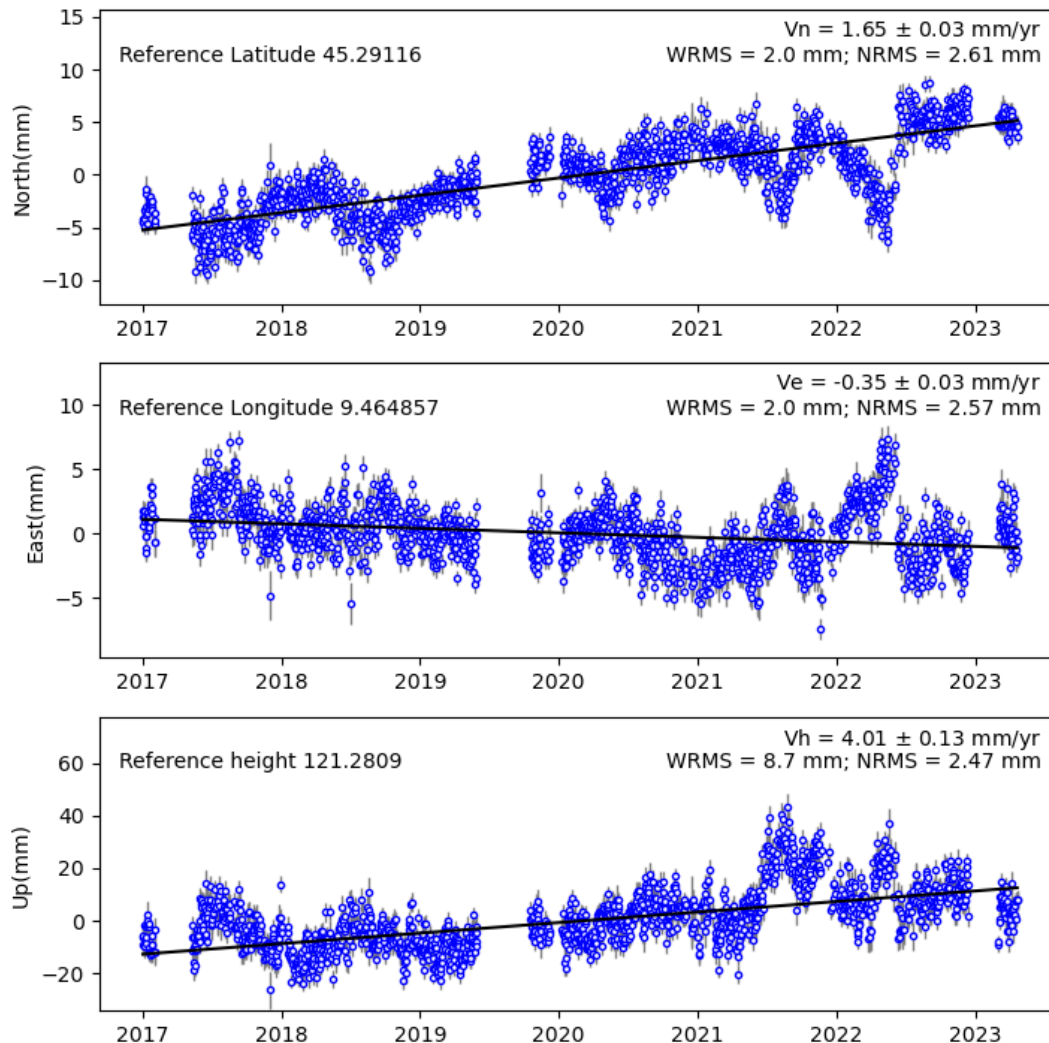


Figura 7 - Serie temporale di OL01 (nel sistema di riferimento EURA) nelle tre componenti: Nord-Sud (grafico in alto), Est-Ovest (in centro), e verticale (in basso). Ogni punto sul grafico indica lo spostamento stimato giornaliero in mm, mentre la barra di errore rappresenta la dispersione delle 2880 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

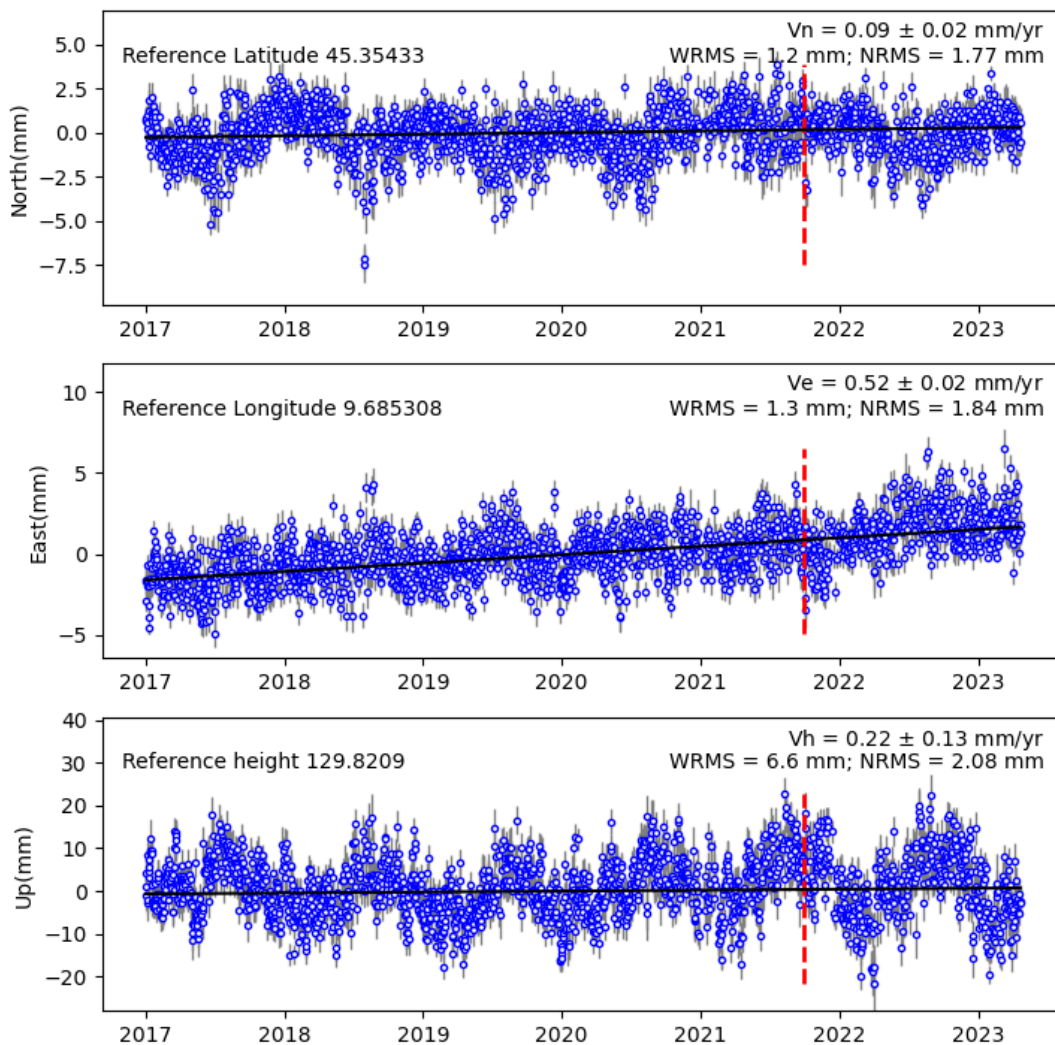


Figura 8 - Serie temporale della stazione CREA secondo il sistema di riferimento EURA. La linea tratteggiata rossa rappresenta il cambiamento di antenna avvenuto il giorno 28/9/2021. Dalla serie temporale è stato rimosso il salto stimato dovuto al cambio antenna. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di [Figura 7](#).

CREM

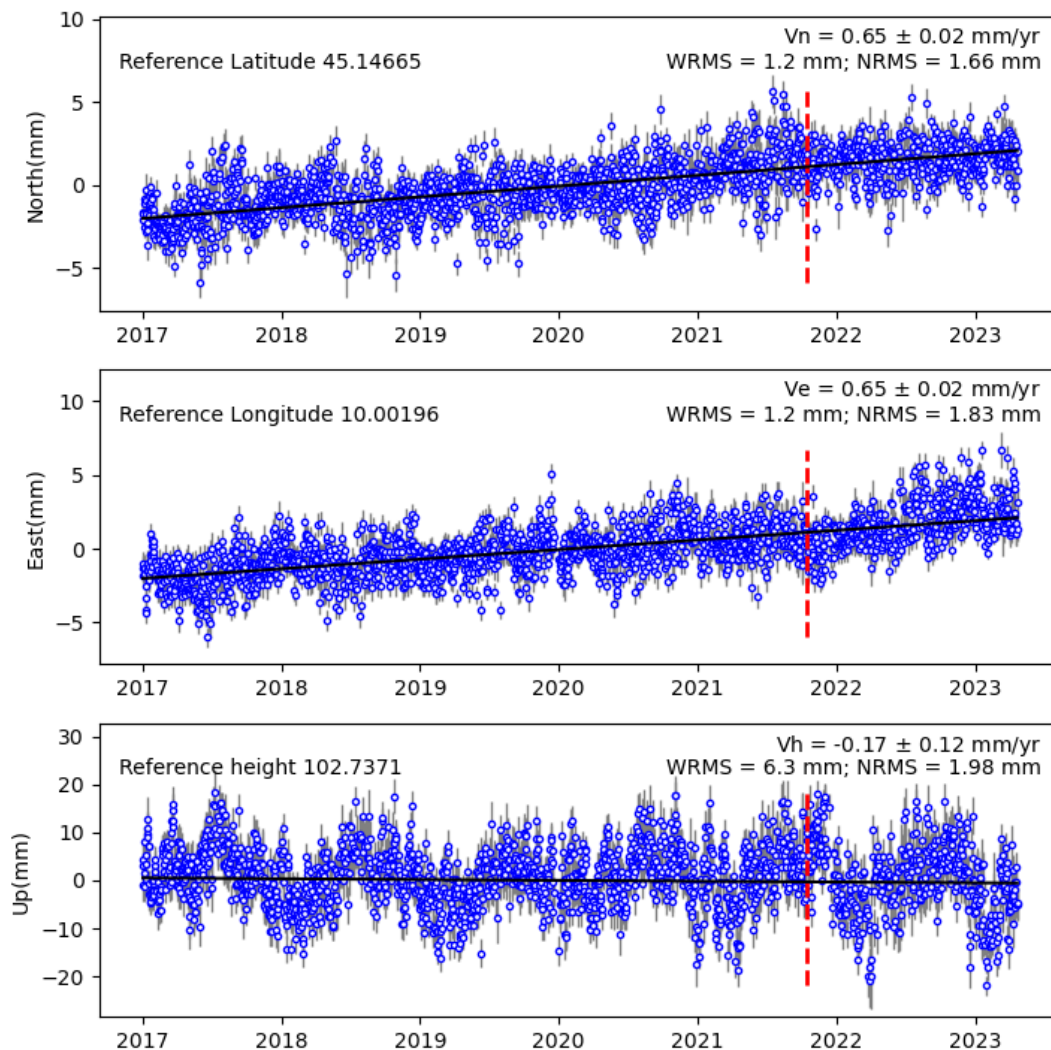


Figura 9 - Serie temporale della stazione CREM secondo il sistema di riferimento EURA. La linea tratteggiata rossa rappresenta il cambiamento di antenna avvenuto il giorno 15/10/2021. Dalla serie temporale è stato rimosso il salto stimato dovuto al cambio antenna. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di [Figura 7](#).

MILA

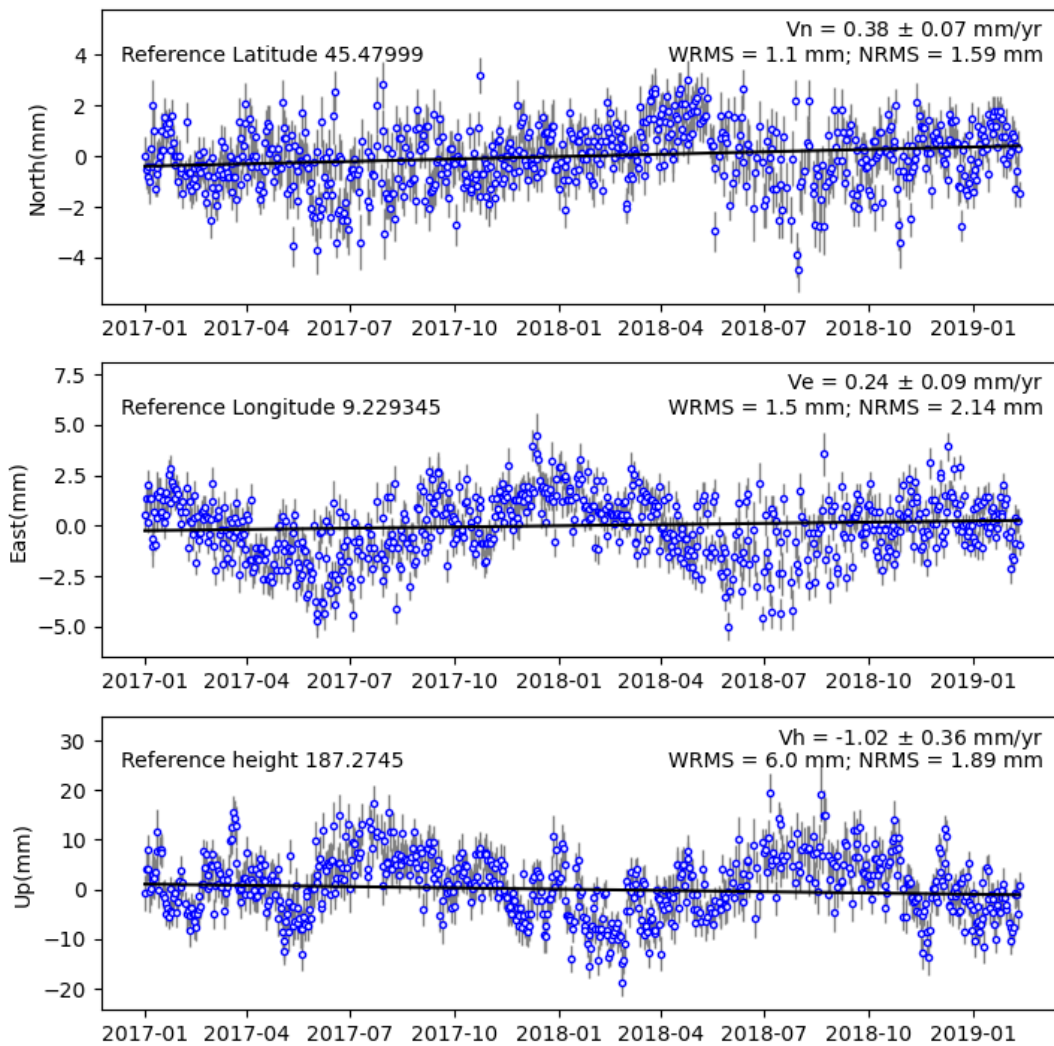


Figura 10 - Serie temporale della stazione MILA secondo il sistema di riferimento EURA. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di [Figura 7](#).

MIL2

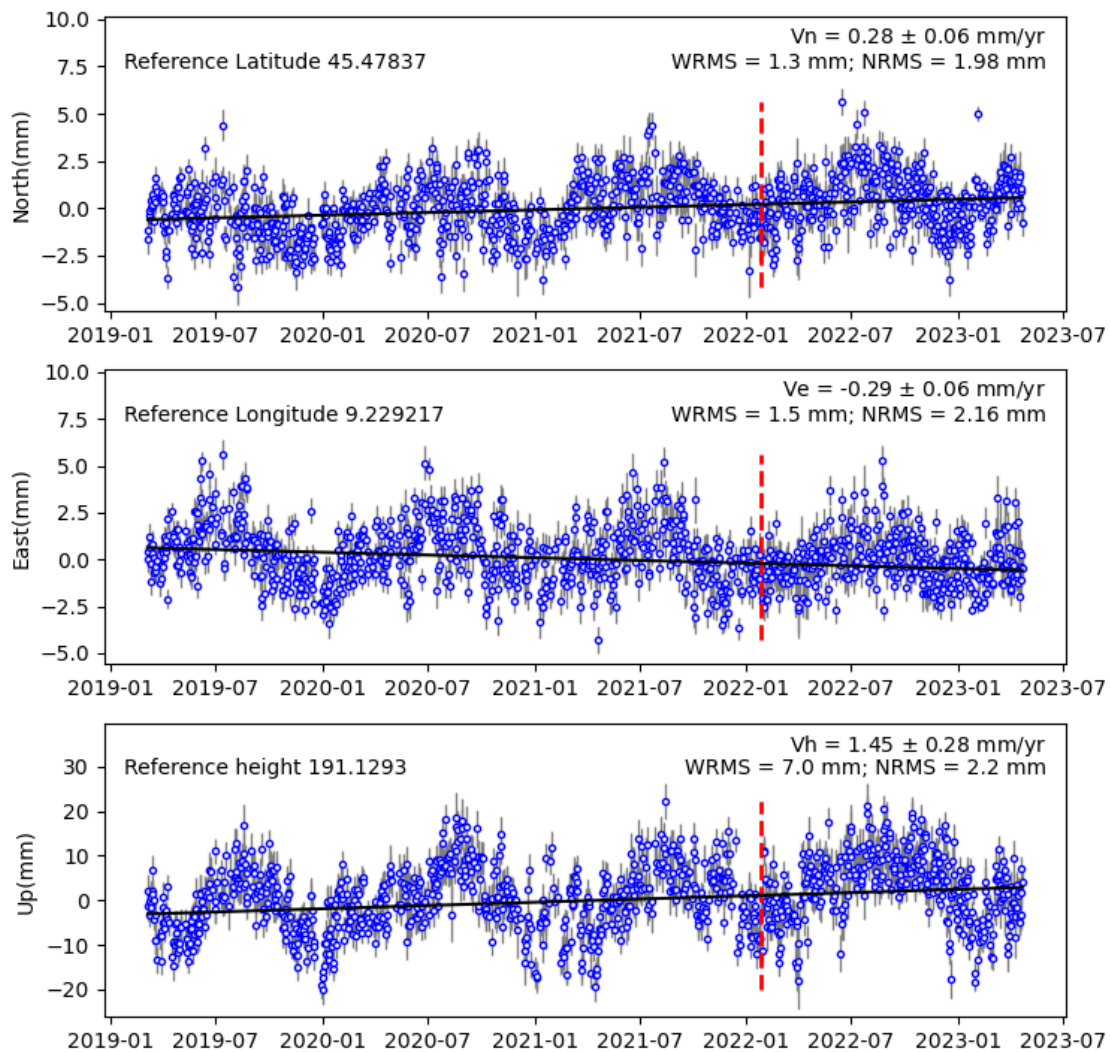


Figura 11 - Serie temporale della stazione MIL2 secondo il sistema di riferimento EURA. La linea tratteggiata rossa rappresenta il cambiamento di antenna avvenuto il giorno 26/1/2022. Dalla serie temporale è stato rimosso il salto stimato dovuto al cambio antenna. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di [Figura 7](#).

PAVI

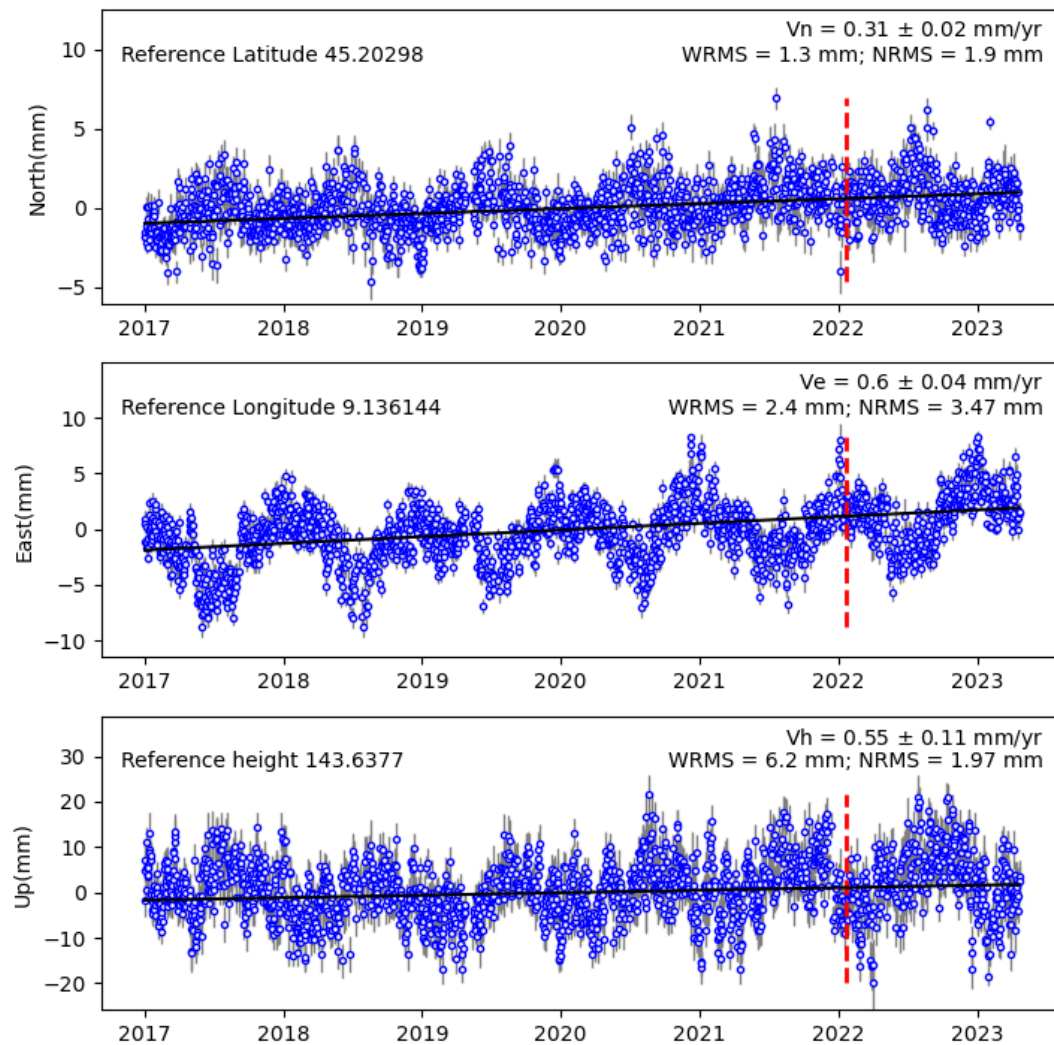


Figura 12 - Serie temporale della stazione PAVI secondo il sistema di riferimento EURA. La linea tratteggiata rossa rappresenta il cambiamento di antenna avvenuto il giorno 20/1/2022. Dalla serie temporale è stato rimosso il salto stimato dovuto al cambio antenna. Le notazioni dei grafici sono uguali a quelle di [Figura 7](#).

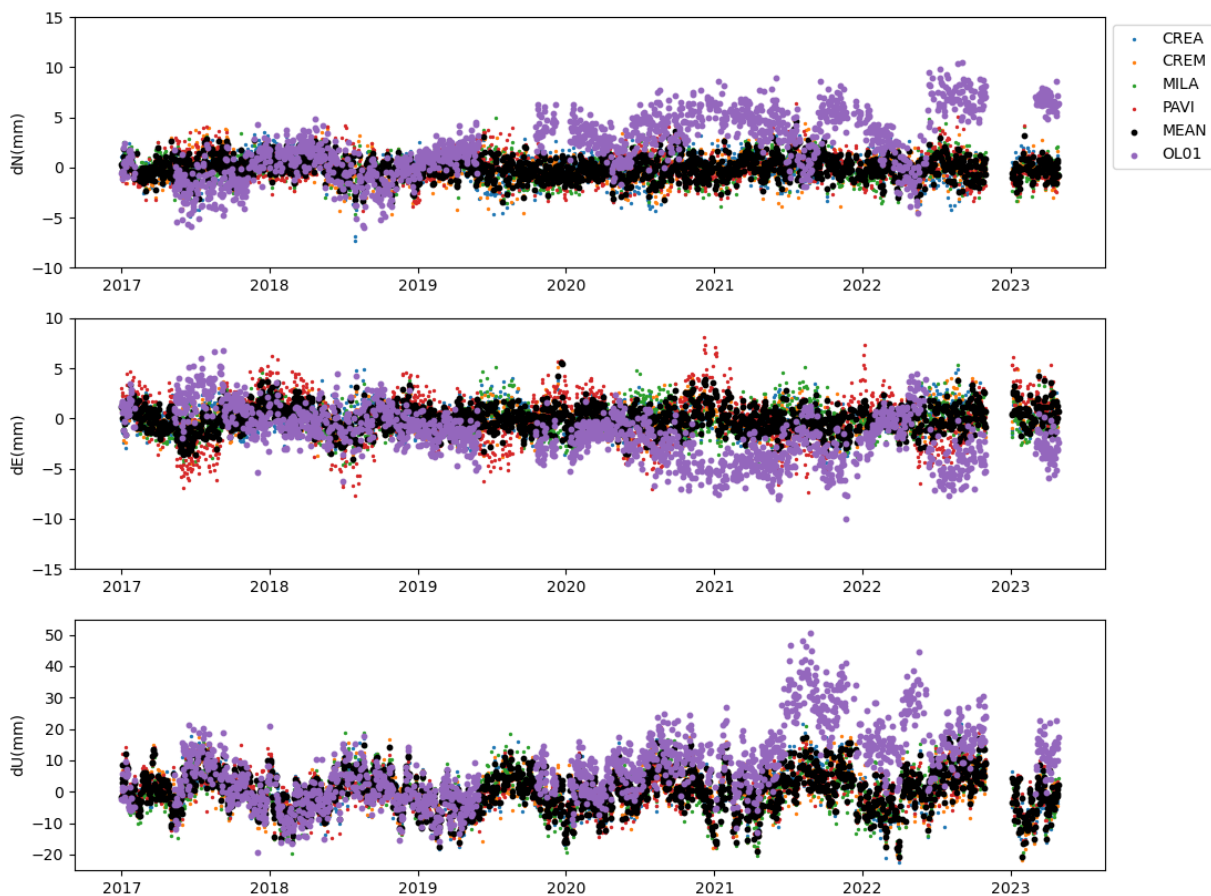


Figura 13 - Residui delle serie temporali NORTH, EAST, UP delle stazioni GNSS considerate nell'analisi. In colore sullo sfondo, i residui delle stazioni di riferimento: CREA, punti azzurri; CREM, punti arancioni; PAVI, punti rossi; MILA e MIL2, punti verdi (MILA e MIL2 sono state unite assieme per ricoprire l'intero arco temporale 2017-2022). In viola, in primo piano, la stazione OL01 a cui è stato tolto il trend delle altre stazioni. In nero la media dei residui delle stazioni di riferimento. Per "agganciare" le serie temporali ed evidenziare, graficamente, l'anomalia di OL01 abbiamo considerato come zero la media di OL01 calcolata dall'inizio fino a giugno 2019 (in corrispondenza dell'interruzione di dati). Per completezza, si evidenzia che in supporto alla stazione OL01 descritta in questa relazione, per supplire a malfunzionamenti della stessa, è stato accoppiato alla stessa antenna anche un ricevitore GNSS a basso costo che stiamo testando.

2.2 Analisi interferometrica delle deformazioni del suolo relative al periodo 2015-2023 (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 398 immagini acquisite lungo orbite discendenti e 388 lungo orbite ascendenti, relative al periodo marzo 2015 – aprile 2023; in [Figura 14](#) è mostrata la distribuzione dei dati S-1 nel piano tempo/baseline perpendicolare. Con tali dati sono stati generati, rispettivamente, 1118 e 1083 interferogrammi differenziali, caratterizzati da valori di baseline perpendicolare inferiori a 200 m. A partire da tali interferogrammi sono state generate le mappe di velocità media di deformazione del suolo e le corrispondenti serie temporali di deformazione.

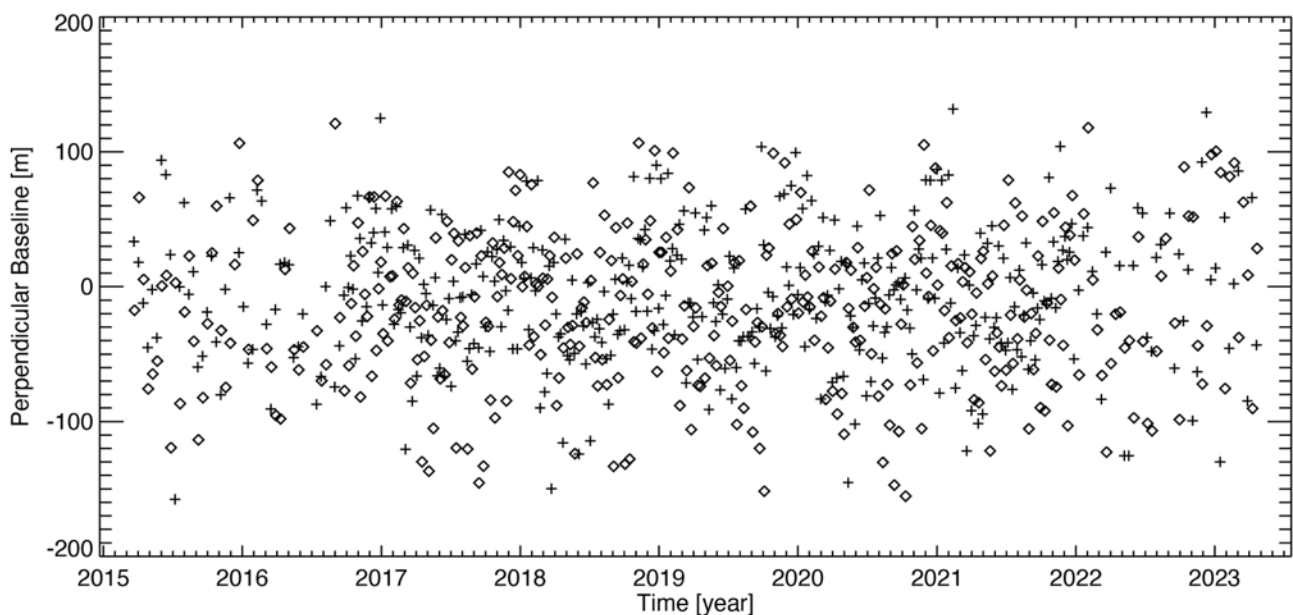


Figura 14 - Distribuzione nel piano tempo/baseline-perpendicolare dei dati SAR S-1 acquisiti sull'area di interesse. Ogni crocetta rappresenta un'immagine SAR acquisita da orbite discendenti, ogni rombo un'immagine SAR ottenuta da orbite ascendenti.

Per la generazione degli interferogrammi è stato utilizzato il DEM SRTM dell'area con uno spacing di circa 30m (1 arcsec). Sia gli interferogrammi differenziali, sia le successive mappe e serie temporali di deformazione hanno una risoluzione spaziale di

circa 30m x 30m, 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 GPS 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 GPS che, come testimoniato dalle relative misure GPS, 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 e ai pixel comuni alle analisi effettuate sui dati acquisiti dalle orbite discendenti ed ascendenti da parte dei satelliti Sentinel-1A (S-1A) e Sentinel-1B (S-1B) che compongono la costellazione. In proposito, si segnala che, a partire da dicembre 2021, non sono più disponibili i dati acquisiti dal sensore Sentinel-1B che non è più operativo a causa di un malfunzionamento, pertanto il tempo di rivisita della costellazione è aumentato da 6 a 12 giorni. Sentinel-1B dovrebbe essere sostituito da Sentinel-1C, il cui lancio è previsto per fine-2023/metà-2024. 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 0.99. 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 2023

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

	Periodo di osservazione	Numero di acquisizioni utilizzate	Numero di interferogrammi
Discendente	22/03/2015-21/04/2023	398	1118

Ascendente	23/03/2015-22/04/2023	388	1083
------------	-----------------------	-----	------

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 2023)

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, sono stati utilizzati 398 dati satellitari acquisiti nel periodo marzo 2015 – aprile 2023 la cui distribuzione nel piano tempo/baseline perpendicolare è rappresentata in [Figura 15](#); grazie ad essi sono stati generati 1118 interferogrammi differenziali, caratterizzati da valori di baseline perpendicolare inferiori a 200 m. A partire da tali interferogrammi 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 16](#), 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.

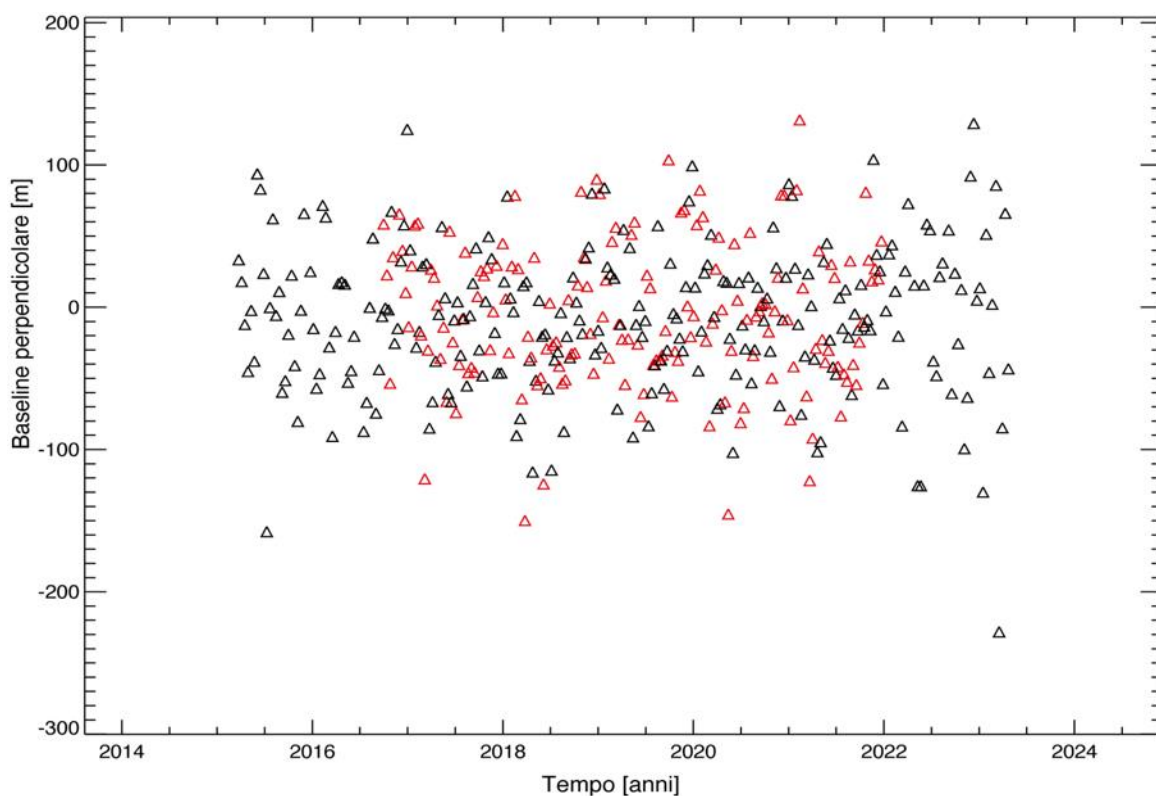


Figura 15 - Distribuzione nel piano tempo/baseline perpendicolare dei dati SAR S-1 acquisiti da orbite discendenti sull'area di interesse. I triangoli neri e rossi rappresentano rispettivamente i dati S-1A e S-1B. Si segnala l'assenza di acquisizioni S-1B a partire da Dicembre 2021.

Le serie temporali SBAS-DInSAR generate sono state confrontate con le corrispondenti serie GPS di deformazione rese disponibili da OGS. In particolare, in [Figura 16](#) sono evidenziate le posizioni delle tre stazioni GPS 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 GPS proiettate rispetto alla LOS 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.

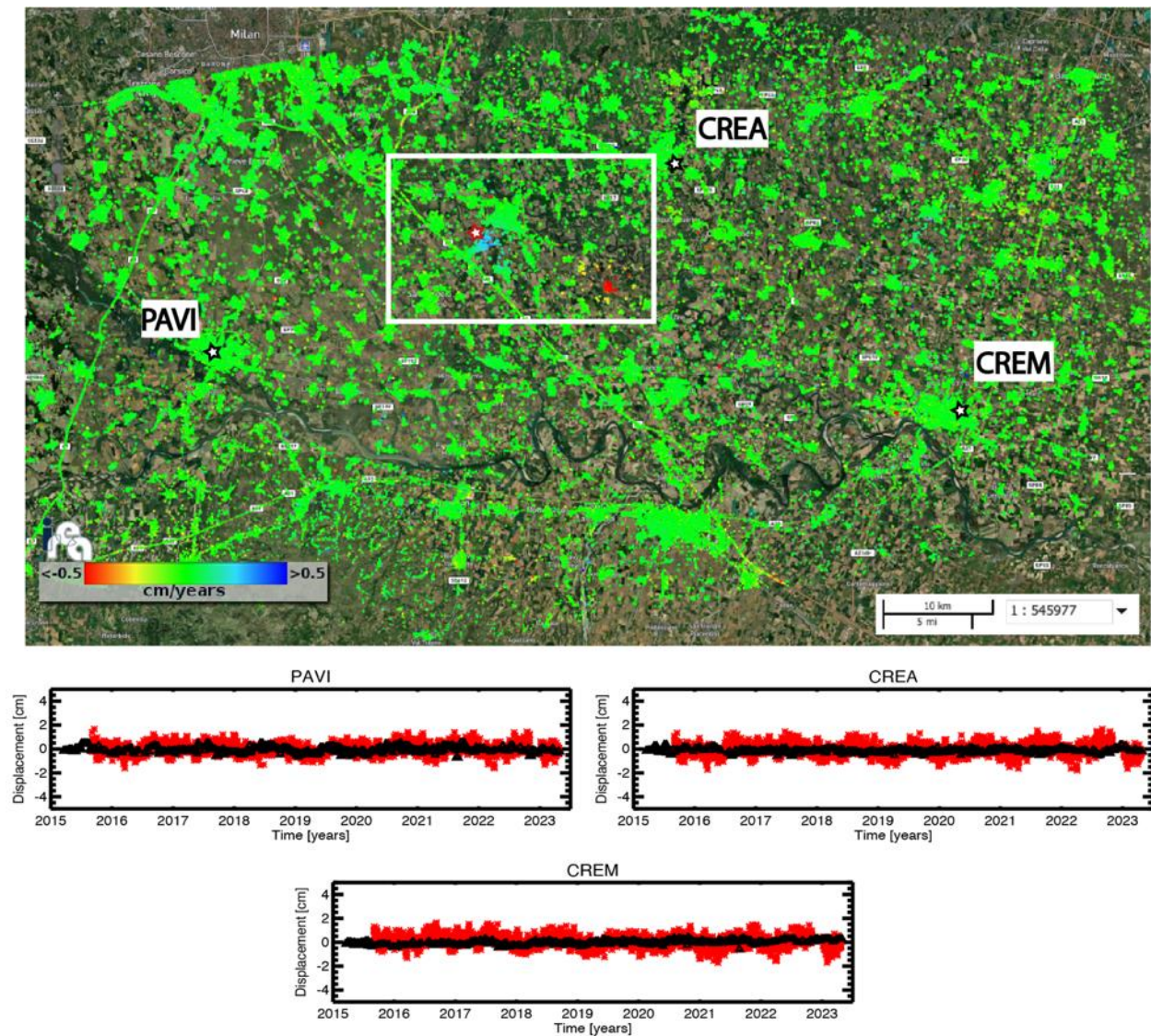


Figura 16 - Mappa di velocità di deformazione in LOS, geocodificata ed espressa in cm/anno, sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area di interesse. L'immagine si riferisce alla elaborazione dei dati S-1 acquisiti da orbite discendenti nel periodo marzo 2015 - aprile 2023. La stellina rossa nel riquadro bianco indica il sito dell'impianto di stoccaggio. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni GPS identificate sulla mappa tramite stelline nere, i grafici dei confronti tra le serie temporali di deformazione GPS 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 19](#).

Come si evince dai grafici in [Figura 16](#), 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 0.4 cm. Tale valore è consistente, se non migliore, rispetto alla stima dell'accuratezza della tecnica SBAS riportata in letteratura.

In [Figura 17](#) viene mostrato un ingrandimento della mappa di deformazione in LOS di [Figura 16](#) relativa all'area di interesse. Si riportano, inoltre, alcuni grafici che mostrano l'andamento temporale dello spostamento superficiale in LOS per tre punti localizzati a Ovest di Cornegliano Laudense (P1, P2 e P3 in [Figura 17](#)) e un punto localizzato nell'area di Turano Lodigiano (P4 in [Figura 17](#)).

L'analisi effettuata evidenzia che nelle aree identificate dai punti P1 e P3 non si rilevano deformazioni significative (superiori a qualche mm/anno). Nella zona circostante il punto P2, invece, si nota 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, con un andamento oscillante, che raggiunge un'escursione massima di circa 2 cm. 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.

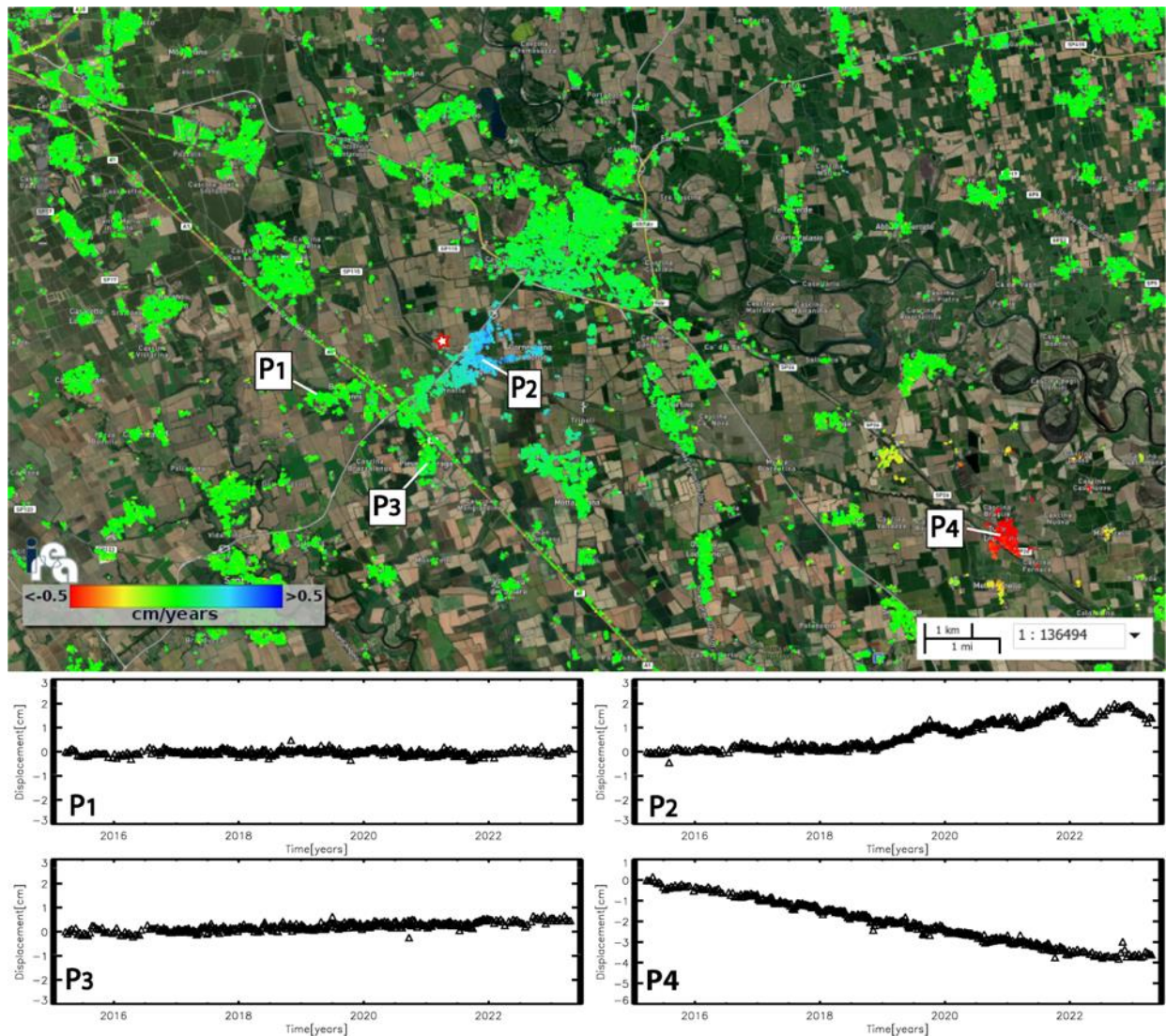


Figura 17 - Zoom della mappa di velocità media di deformazione di [Figura 16](#) in corrispondenza dell'area identificata dal rettangolo bianco, incentrato sull'area che comprende i comuni di Cornegliano Laudense e di Turano Lodigiano. La stellina con contorno rosso indica la posizione dell'impianto 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 2023.

2.2.2 Analisi SBAS Sentinel-1: orbite ascendenti (periodo marzo 2015 – aprile 2023)

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 2023 lungo orbite ascendenti (track 15). In particolare, sono stati utilizzati 388 dati satellitari, la cui distribuzione nel piano tempo/baseline perpendicolare è rappresentata in [Figura 18](#), con i quali sono stati generati 1083 interferogrammi differenziali, caratterizzati da valori di baseline perpendicolare inferiori a 200 m. A partire da tali interferogrammi 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 19](#), 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.

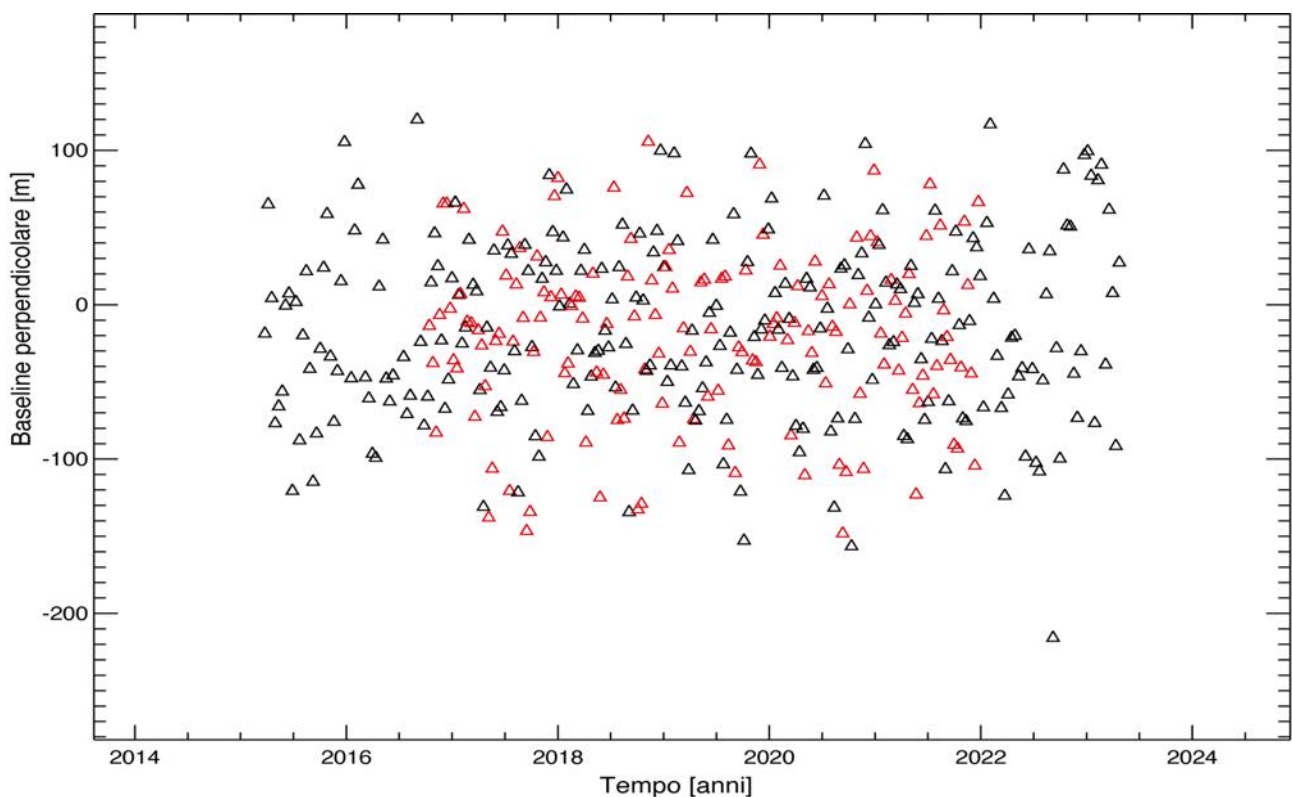


Figura 18 - Distribuzione nel piano tempo/baseline perpendicolare dei dati SAR S-1 acquisiti da orbite ascendenti sull'area di interesse. I triangoli neri e rossi rappresentano rispettivamente i dati S-1A e S-1B. Si segnala l'assenza di acquisizioni S-1B a partire da Dicembre 2021.

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 19](#) sono rappresentate le 3 stazioni GPS 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 GPS proiettate rispetto alla LOS 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.

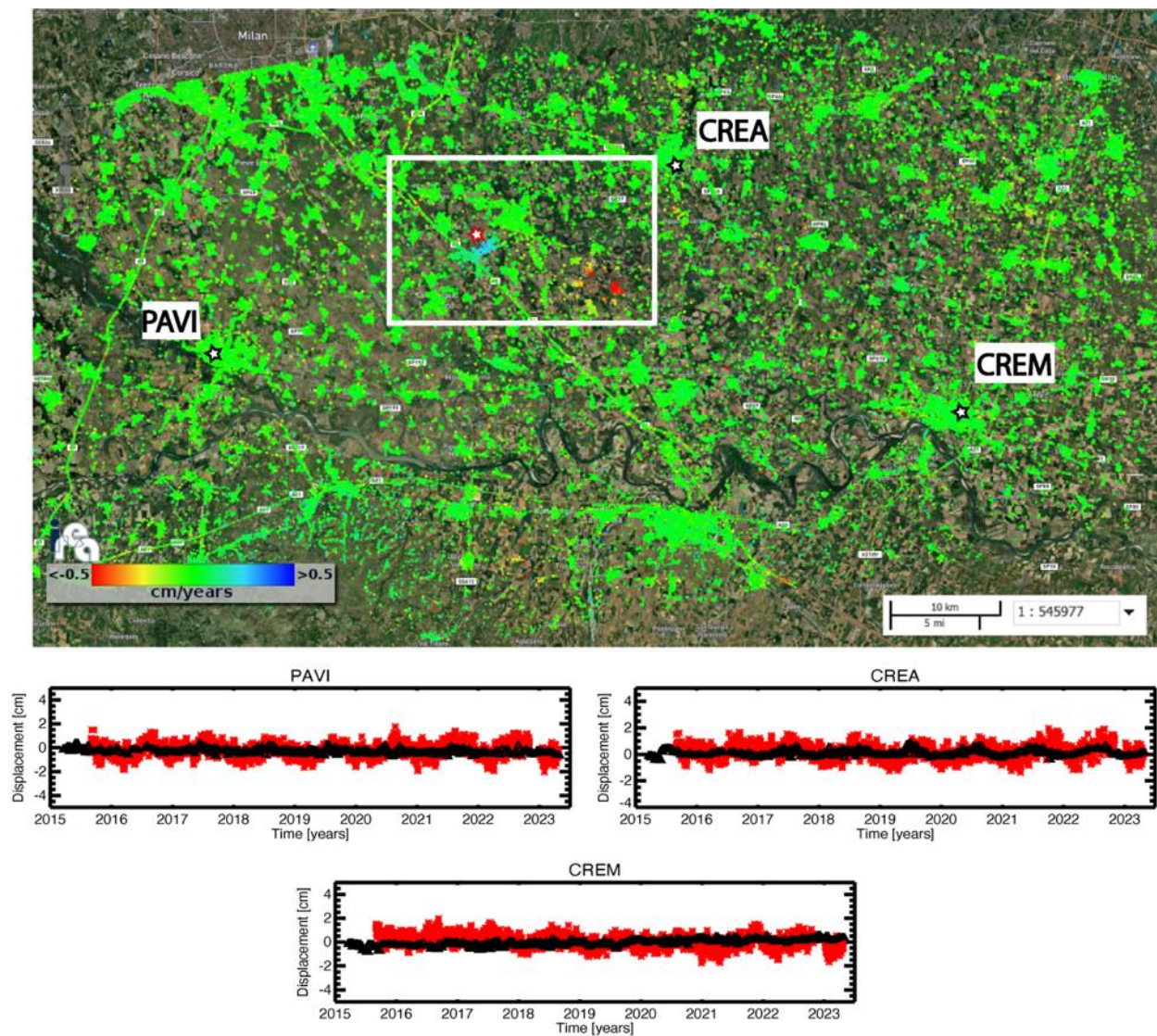


Figura 19 - Mappa di velocità di deformazione in LOS, geocodificata ed espressa in cm/anno, sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area di interesse. L'immagine si riferisce alla

elaborazione dei dati S-1 acquisiti da orbite ascendenti nel periodo marzo 2015 – aprile 2023. La stellina rossa nel riquadro bianco indica il sito dell'impianto di stoccaggio. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle 3 stazioni GPS identificate sulla mappa tramite stelline nere, i grafici dei confronti tra le serie storiche di deformazione GPS 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 20](#).

Come si evince dai grafici in [Figura 19](#), 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 20](#) viene mostrato un ingrandimento della mappa di deformazione in LOS di [Figura 19](#) 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 20](#)) e un punto localizzato nell'area di Turano Lodigiano (P4 di [Figura 20](#)).

L'analisi effettuata evidenzia che nell'area identificata dai punti P1 e P3 si rilevano lievissime deformazioni, inferiori al cm/anno. Nella zona circostante il punto P2, invece, si nota 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, con un andamento oscillante, che raggiunge un'escursione massima di circa 2 cm. 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.

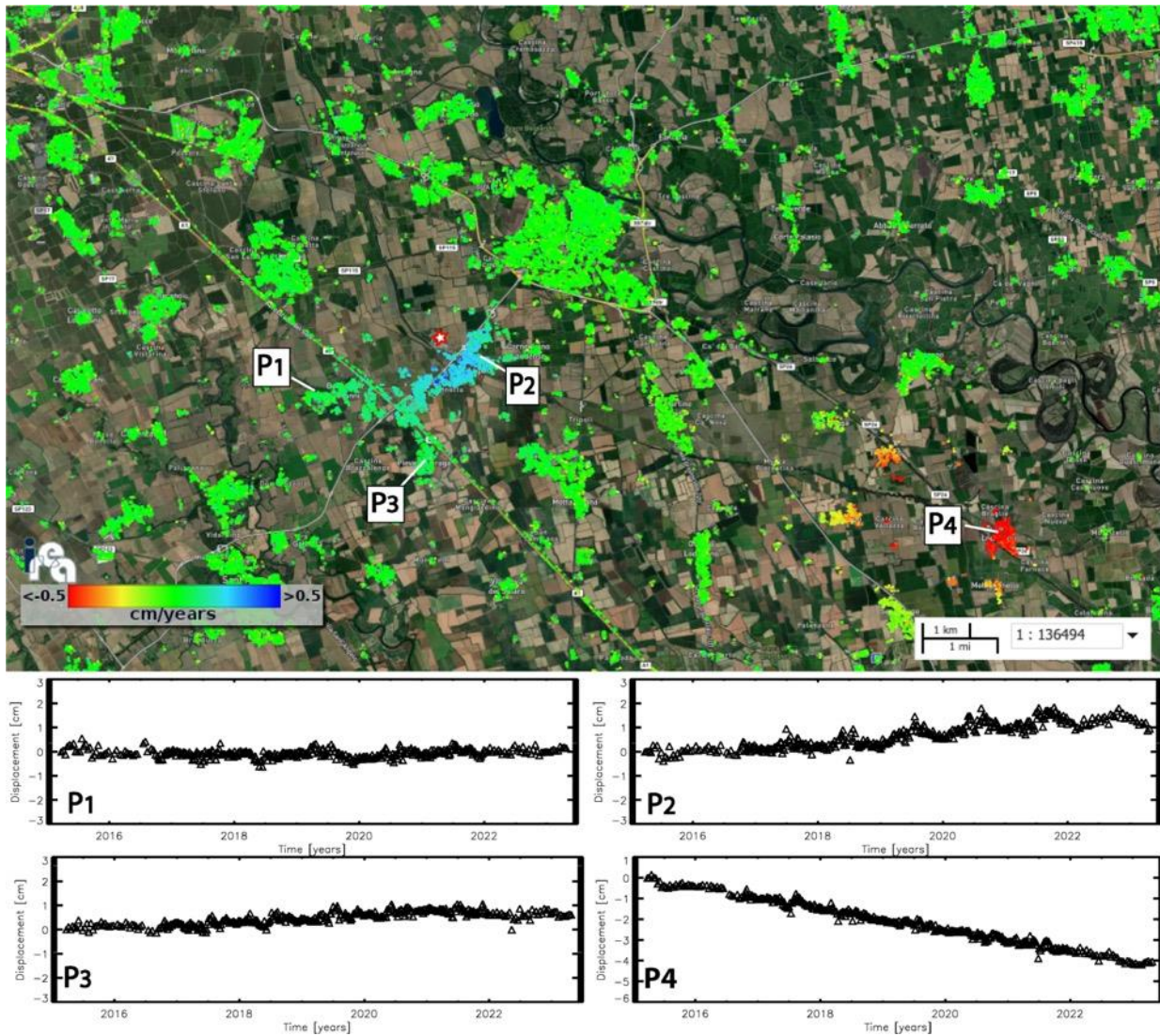


Figura 20 - Zoom della mappa di velocità media di deformazione di [Figura 19](#) in corrispondenza dell'area identificata dal rettangolo bianco, incentrato sull'area che comprende i comuni di Cornegliano Laudense e di Turano Lodigiano. La stellina con contorno rosso indica la posizione dell'impianto 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 2023.

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 [Figura 21](#) e [22](#), rispettivamente. Anche in questo caso, utilizzando le misure delle tre stazioni GNSS rese disponibili da OGS e 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 21](#) 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 0.5 cm. In [Figura 22](#), 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 0.4 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 23](#) e [24](#) 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 21](#) e [22](#). Sono inoltre rappresentati i grafici relativi all'andamento temporale della deformazione di quattro punti selezionati. L'analisi dei risultati mostrati nelle [Figure 23](#) e [24](#) evidenzia che nel periodo marzo 2015-aprile 2023 non si rilevano deformazioni significative nell'area di Cornegliano Laudense nelle aree identificate dai punti P1 e P3, mentre la zona corrispondente al punto P2 mostra un effetto deformativo prevalentemente in direzione verticale, con 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. 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 massimo è di circa 1 cm/anno.

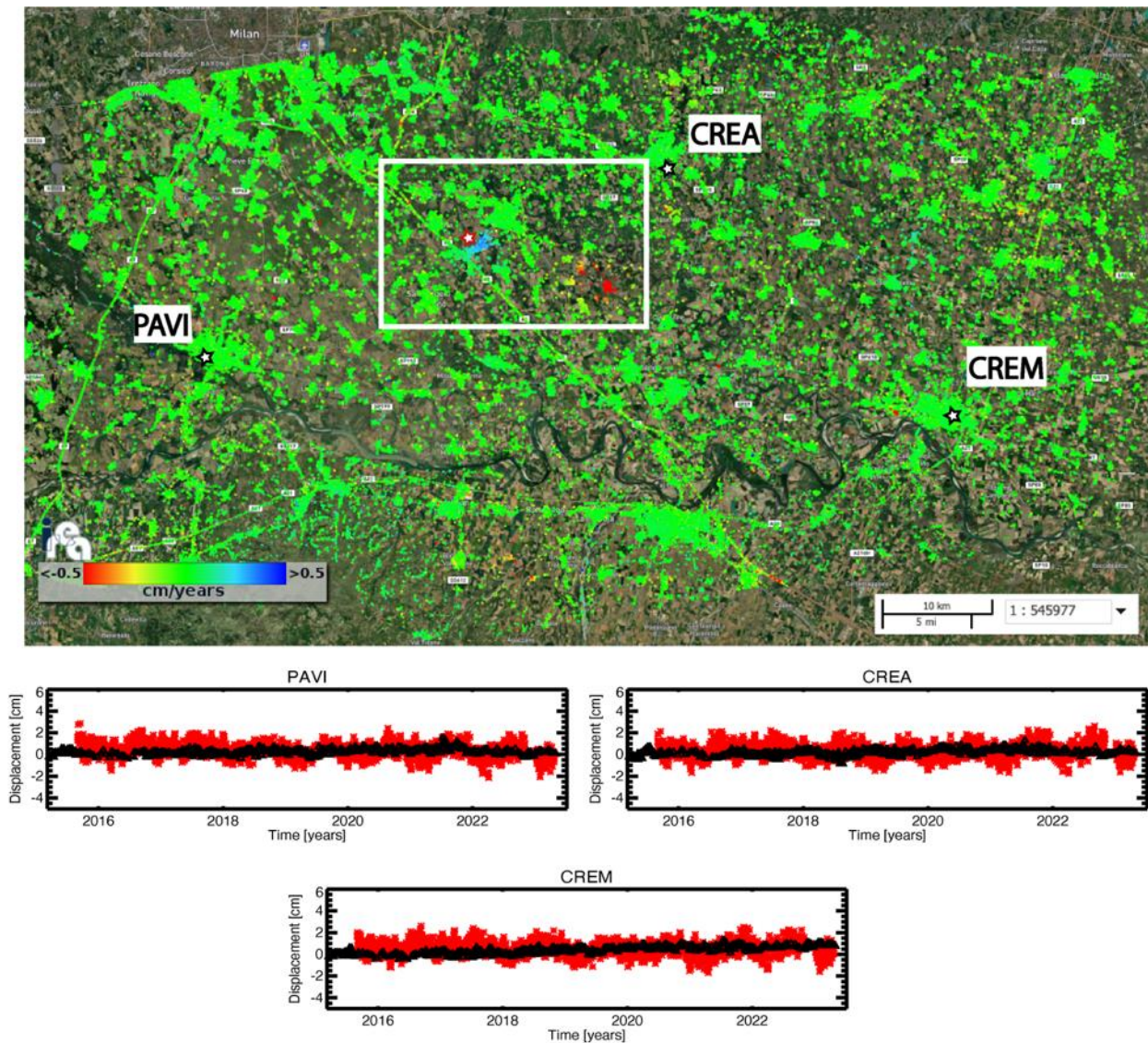


Figura 21 - Mappa della componente verticale della velocità di deformazione, geocodificata ed espressa in cm/anno, sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area di interesse. La stellina rossa nel riquadro bianco indica il sito dell'impianto di stoccaggio. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle tre stazioni GPS identificate sulla mappa tramite stelline nere, i grafici dei confronti tra la componente verticale delle serie storiche di deformazione GPS (asterischi rossi) e quella ottenute tramite i dati DInSAR (triangoli neri). Il rettangolo bianco fa riferimento alla zona analizzata in dettaglio in [Figura 23](#).

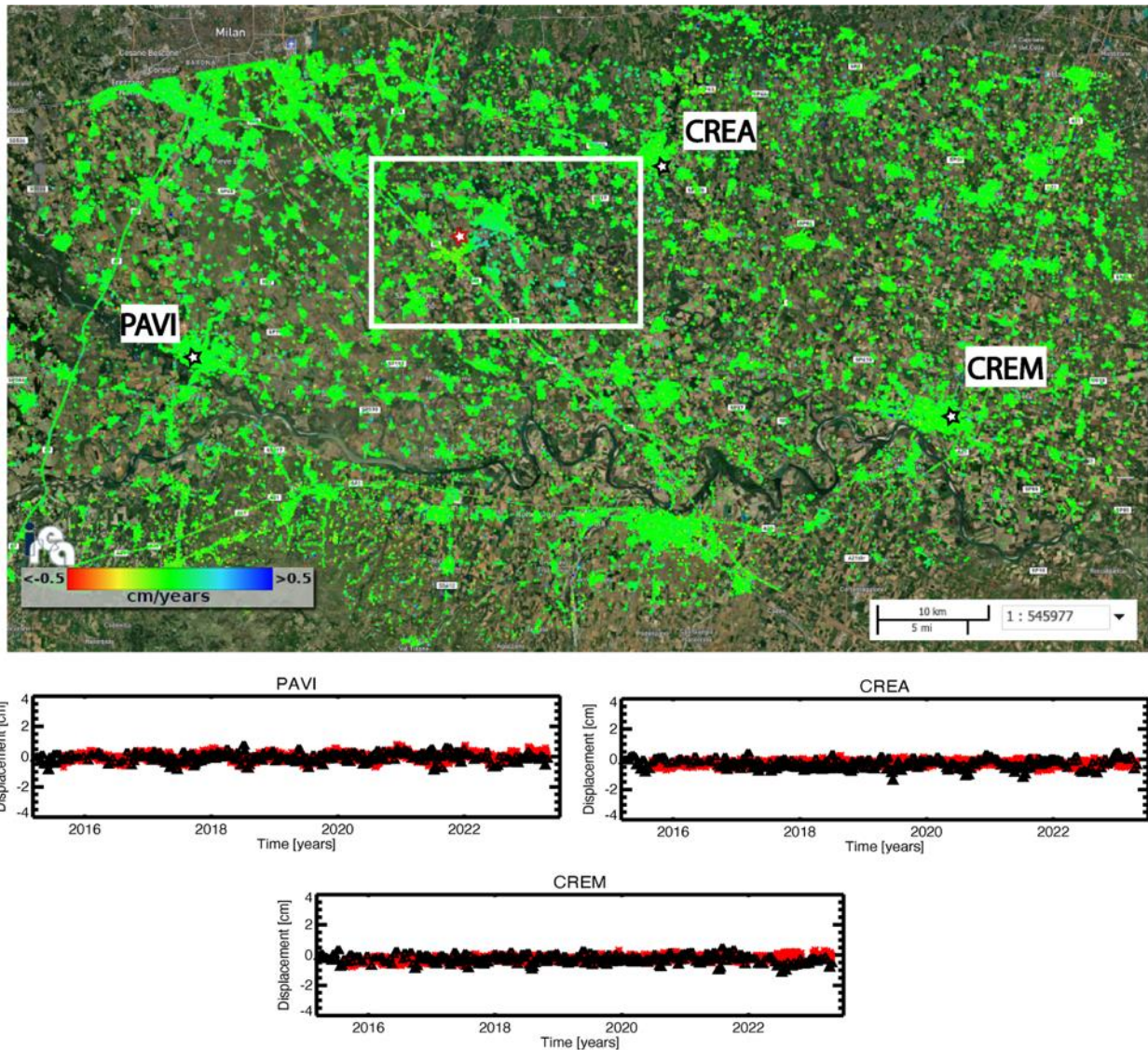


Figura 22 - Mappa della componente Est-Ovest della velocità di deformazione, geocodificata ed espressa in cm/anno, sovrapposta ad un'immagine ottica dell'area di interesse. La stellina rossa nel riquadro bianco indica il sito dell'impianto di stoccaggio. Si riportano, inoltre, in corrispondenza delle tre stazioni GPS identificate sulla mappa tramite stelline nere, i grafici dei confronti tra le serie storiche di deformazione GPS 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 24](#).

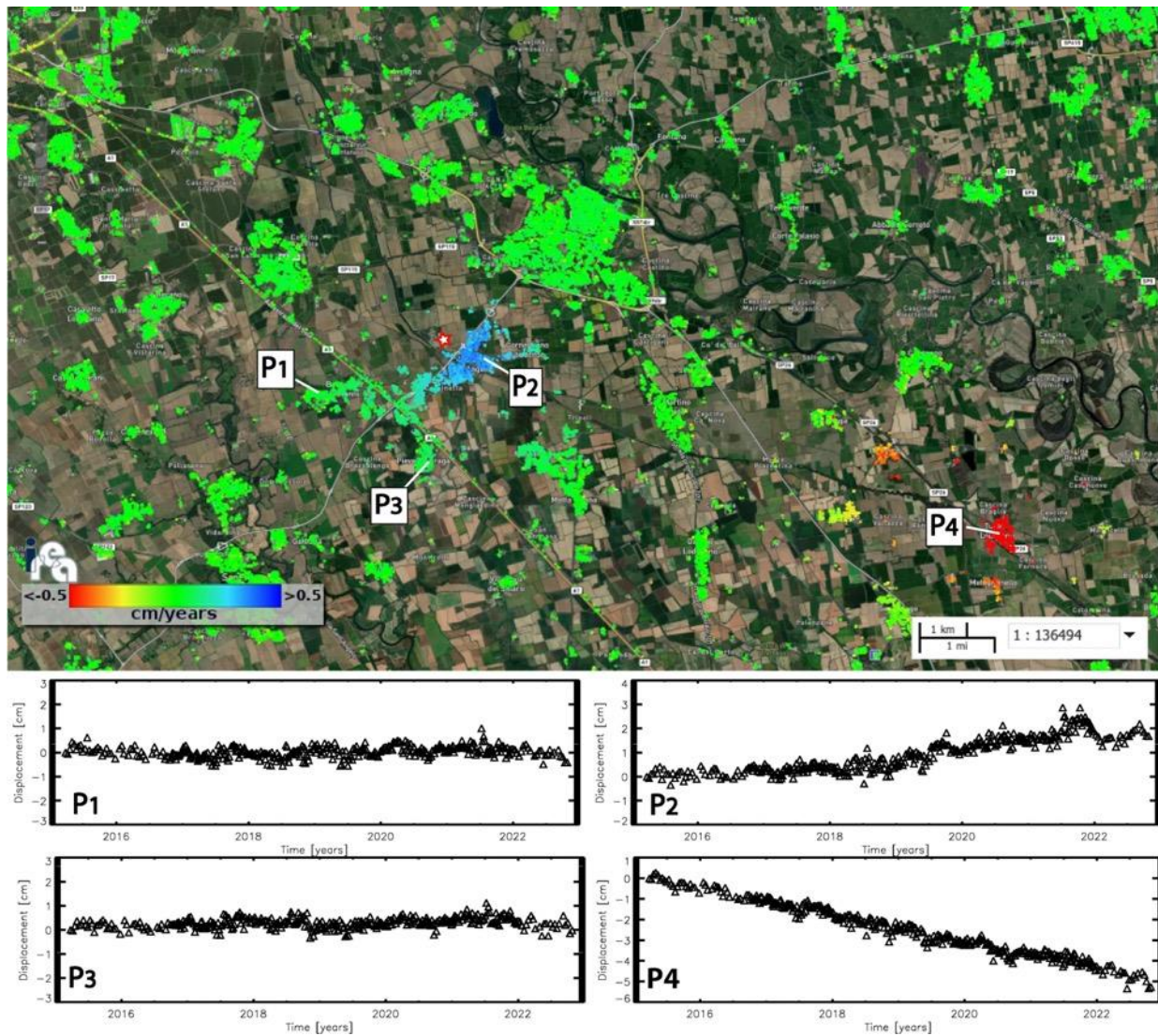


Figura 23 - Zoom della mappa della componente verticale della velocità media di deformazione di [Figura 21](#) in corrispondenza del riquadro bianco, incentrato sull'area che comprende i comuni di Cornegliano Laudense e di Turano Lodigiano. La stellina rossa indica la posizione dell'impianto di stoccaggio (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).

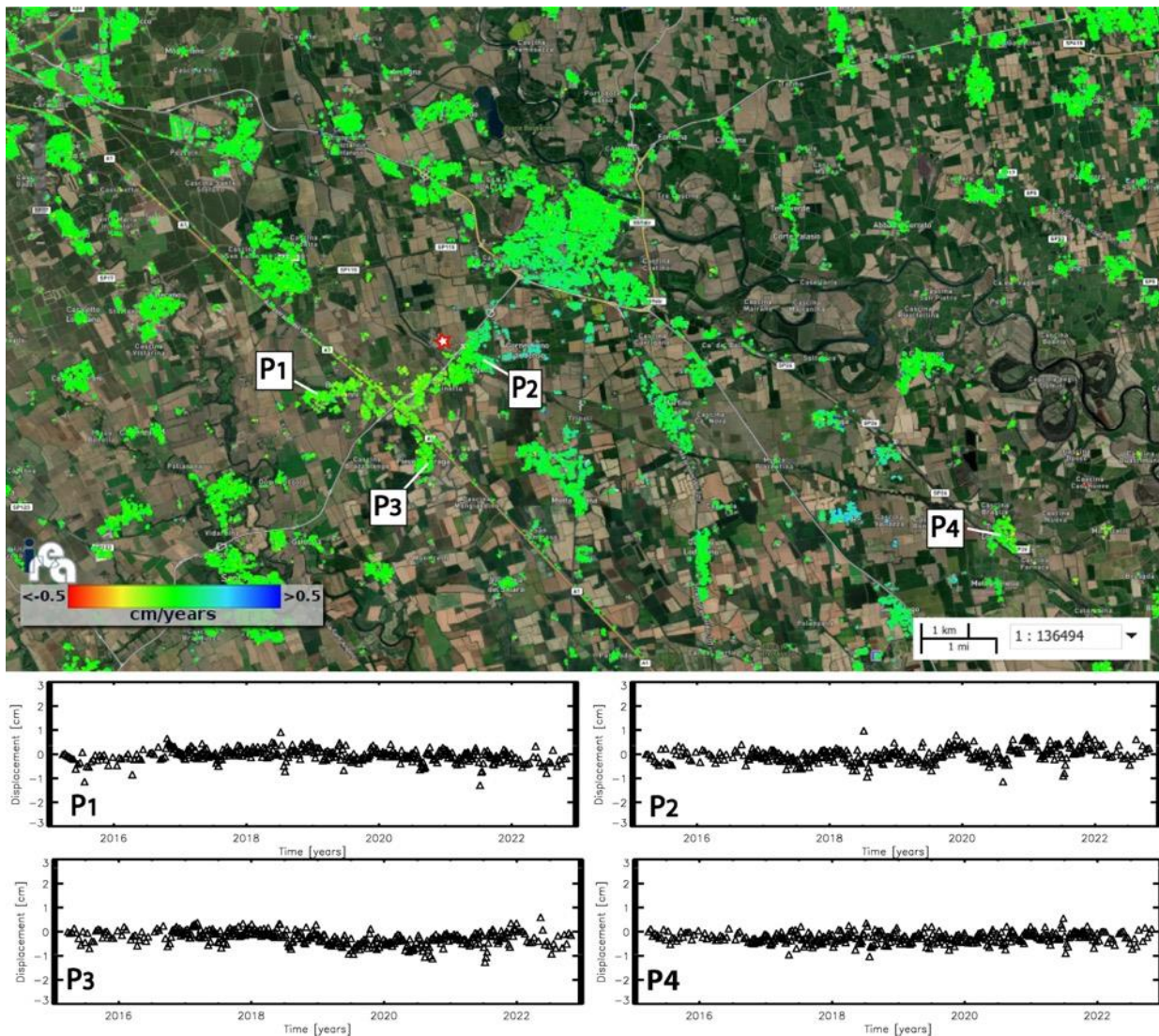


Figura 24 - Zoom della mappa della componente Est-Ovest della velocità media di deformazione [Figura 22](#) in corrispondenza del riquadro bianco, incentrato sull'area che comprende i comuni di Cornegliano Laudense e di Turano Lodigiano. La stellina rossa indica la posizione dell'impianto di stoccaggio (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 identificata dal punto P2 nelle [Figure 17, 20, 23 e 24](#), che è quella più vicina all'impianto di stoccaggio, 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, l'area circostante il punto P2 mostra anche delle lievi deformazioni in direzione Est-Ovest. Questo paragrafo è finalizzato a mostrare con maggior dettaglio tali fenomeni. In particolare, nelle [Figure 25 e 26](#) 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, completati con le serie temporali dello spostamento superficiale di alcuni pixel scelti nell'area caratterizzata dalla maggior deformazione rilevata.

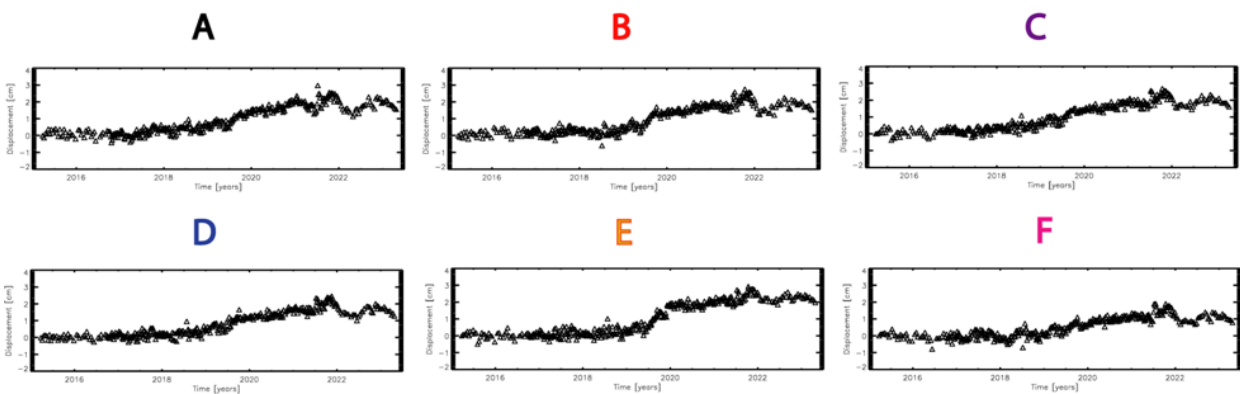


Figura 25 - Zoom della mappa della componente verticale della velocità di deformazione sull'area di Cornegliano Laudense situata in prossimità del sito di stoccaggio (la stellina bianca corrisponde al Cluster A). Sono inoltre mostrate le serie temporali della componente verticale dello spostamento superficiale di tutti i pixel evidenziati tramite i rettangoli colorati A-F sulla mappa di deformazione.

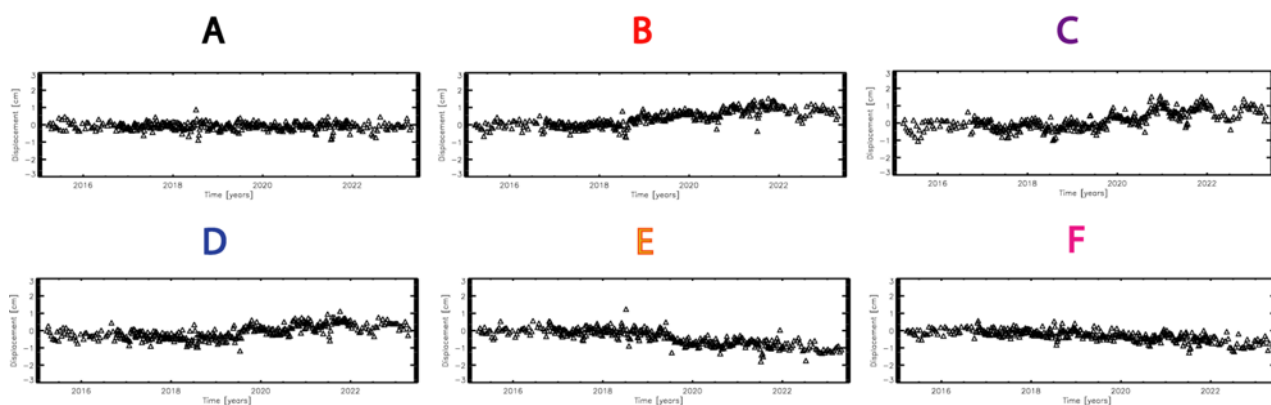
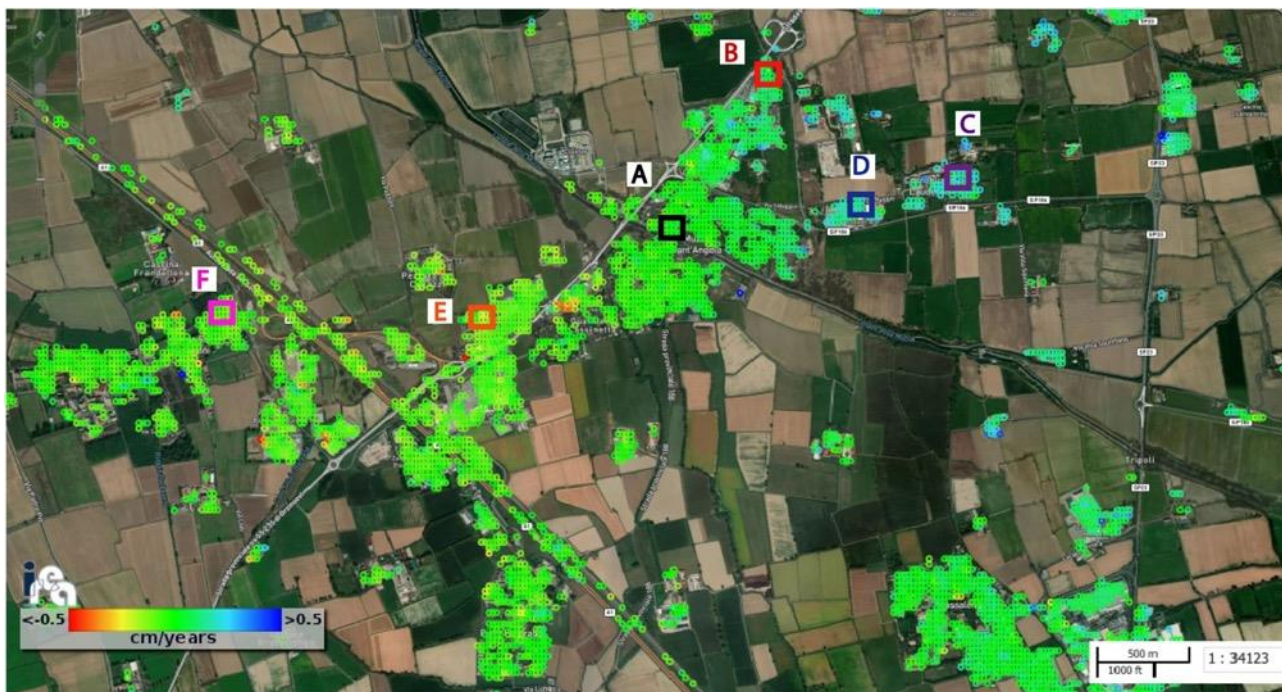


Figura 26. Zoom della mappa della componente Est-Ovest della velocità di deformazione sull'area di Cornegliano Laudense situata in prossimità del sito di stoccaggio (la stellina bianca corrisponde al Cluster A). Sono inoltre mostrate le serie temporali della componente Est-Ovest dello spostamento superficiale di tutti i pixel evidenziati tramite i rettangoli colorati A-F sulla mappa di deformazione.

In [Figura 25](#) 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 di poco inferiore a 3 cm raggiunta nei periodi di settembre/ottobre 2021 e 2022.

In [Figura 26](#) 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 massimi di circa 1.5 cm (punti B, C e D di [Figura 26](#)), mentre nella zona ad Ovest del sito di stoccaggio si rilevano degli spostamenti in direzione Ovest con valori di circa 1 cm (punti E ed F di [Figura 26](#)). Dall'osservazione congiunta delle Figure 25 e 26 si rileva un effetto deformativo compatibile con una leggera inflazione, ovvero un rigonfiamento del suolo.

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 attualmente da 10 stazioni sismometriche collocate in pozzo e superficie e da una stazione di posizionamento satellitare, è operativa dal 1° gennaio 2017. Il presente rapporto riguarda il periodo di sei mesi 1/10/2022-30/4/2023 e corrisponde alla fase di estrazione del quinto anno di stoccaggio.

Nei sei mesi rendicontati l'infrastruttura di monitoraggio ha operato correttamente con alcuni malfunzionamenti causati senza interruzioni di rilievo. Nel semestre cui si riferisce la presente relazione sono stati localizzati due eventi sismici nelle aree di rilevazione della RMCL. Tali eventi rientrano nel quadro della sismicità già evidenziato nelle precedenti relazioni. Anche alla fine di questo semestre d'esercizio non si sono rilevate variazioni statisticamente significative nella sismicità successivamente all'avvio delle attività di stoccaggio.

Monitoraggio delle deformazioni superficiali

Per ciascun sito della Rete GNSS Lodi sono state calcolate le serie temporali fino alla data del 28/4/2023 nei due sistemi di riferimento ITRF08, riferito al centro di massa della Terra, ed EURA, solidale con la placca continentale europea. La stazione OL01 presenta uno spostamento marcato verso Nord e verso Ovest e un trend deformativo verticale positivo verso l'alto, già evidenziato nelle relazioni precedenti. In particolare, la stazione OL01 registra un comportamento distinto da quello delle stazioni circostanti a partire dalla seconda metà del 2019, mostrando uno spostamento orizzontale in direzione Nord-Ovest e verticale verso l'alto, accentuato soprattutto nell'estate del 2021, e di minore entità nell'estate del 2022.

È stata inoltre effettuata l'analisi relativa alla distribuzione spaziale delle deformazioni superficiali ed alla loro evoluzione temporale nell'area di interesse, mediante l'utilizzo di dati Radar ad Apertura Sintetica (SAR), elaborati tramite la tecnica avanzata di Interferometria Differenziale SAR (DInSAR) nota con l'acronimo SBAS (Small Baseline Subset) e sviluppata presso l'IREA-CNR. In particolare sono state generate mappe e serie temporali della deformazione superficiale relative all'area di interesse utilizzando sia dati di archivio, sia di recente acquisizione fino al 30/4/2023.

Ricordiamo che per il periodo pregresso maggio 1993 - ottobre 2010, l'analisi interferometrica effettuata con i dati ERS-1/2 ed ENVISAT su orbite sia discendenti sia ascendenti non aveva evidenziato spostamenti significativi (superiori a 2-3 mm/anno)

nell'area di interesse, ad eccezione di deformazioni molto localizzate e di un significativo effetto deformativo presente nell'area di Turano Lodigiano che mostrava un trend di deformazione sostanzialmente lineare, con un tasso di circa 1 cm/anno. Risultati simili erano stati ottenuti anche dall'analisi delle mappe di velocità media di deformazione relative alle componenti verticale ed Est-Ovest dello spostamento superficiale, e confermavano la deformazione significativa presente a scala locale nell'area di Turano Lodigiano con un tasso di circa 1 cm/anno nella componente verticale e di circa 0.5 cm/anno nella direzione Est-Ovest. Data la distanza di circa 15 km che intercorre tra Turano Lodigiano e il sito di stoccaggio, si ritiene che la deformazione rilevata non sia correlata con le attività di stoccaggio.

L'analisi interferometrica effettuata con i dati più recenti acquisiti dai sensori Sentinel-1 (S-1) è consistente con i risultati ottenuti con i dati del precedente report. In particolare, si conferma che a partire dall'inizio del 2019 le mappe e le serie temporali di deformazione relative ai dati acquisiti da orbite discendenti ed ascendenti mostrano un effetto deformativo nell'area di Cornegliano Laudense situata in prossimità del sito di stoccaggio, con una significativa componente verticale, avente un trend di sollevamento del suolo con velocità variabile tra 0.5 e 1 cm all'anno, ed un'escursione massima di poco inferiore a 3 cm raggiunta nei periodi di settembre/ottobre 2021 e 2022; è presente anche una lieve componente Est-Ovest che raggiunge un massimo di 1.5 cm nella zona ad Est nella zona orientale del sito di stoccaggio e di 1 cm verso Ovest nella zona occidentale del suddetto sito.

Il comportamento deformativo osservato è compatibile con una leggera inflazione. Tale effetto deformativo è coerente con quelli rilevati e studiati in altri siti caratterizzati da attività di stoccaggio del gas, 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. Tale fenomeno deformativo appare distribuito uniformemente sui punti campionati, con livelli di deformazione locale ridottissimi ricadente quindi entro la massima deformazione accettabile. Questa quantità sarà stimata con maggiore accuratezza successivamente, con il progredire del fenomeno deformativo.

Sono inoltre confermate, anche dalle analisi S-1, le deformazioni molto localizzate presenti nell'area di Turano Lodigiano aventi una significativa componente verticale con un trend di deformazione sostanzialmente lineare e un tasso di subsidenza fino a circa 1 cm/anno. Essendo tale area caratterizzata da fenomeni deformativi già evidenti nelle serie ERS-ENVISAT, e trovandosi a circa 15 km dal sito di stoccaggio di Cornegliano Laudense, si ritiene che le deformazioni rilevate non siano correlate con le attività del suddetto stoccaggio.

Si evidenzia inoltre che è stata effettuata anche una dettagliata analisi dei risultati SBAS attraverso confronti tra le misure di spostamento DInSAR e le corrispondenti misure GPS/GNSS rese disponibili da OGS. Tali confronti hanno prodotto valori delle deviazioni standard delle differenze tra le misure di spostamento DInSAR e quelle geodetiche che sono non superiori a 0.5 cm, risultando quindi assolutamente in linea con l'accuratezza della tecnica SBAS riportate in letteratura.

Bibliografia

- Altamimi, Z., Métivier, L., e Collilieux, X. (2012). ITRF2008 plate motion model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B7):n/a–n/a. B07402.
- Blewitt, G., and D. Lavallée, Effect of annual signal on geodetic velocities, *J. Geophys. Res.*, 107, 2145, doi: 10.1029/2001JB000570, 2002.
- Bragato, P. L. e Tento, A. (2005). Local Magnitude in Northeastern Italy. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 95(2):579–591.
- 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.
- 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.
- 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 Sperimentative per la Stima dell'Amplificazione Sismica*, Studi teorici ed applicazioni

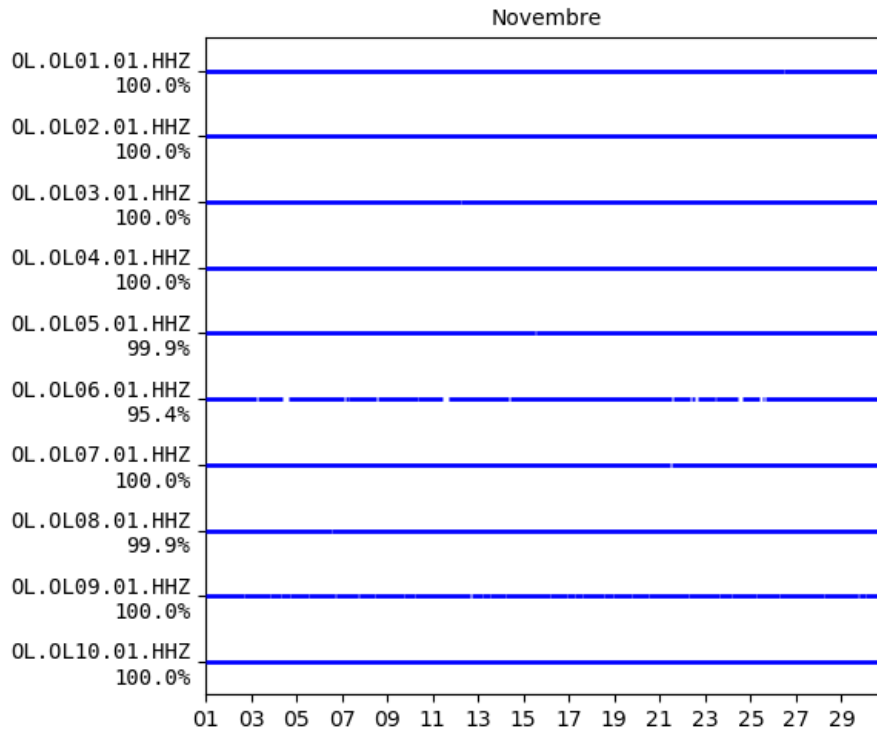
professionali, Aracne Ed., 431-445.

- 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.
- Tregoning, P., and van Dam T. (2005). Atmospheric pressure loading corrections applied to GPS data at the observation level. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L22310, doi:10.1029/2005GL024104.
- 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>.

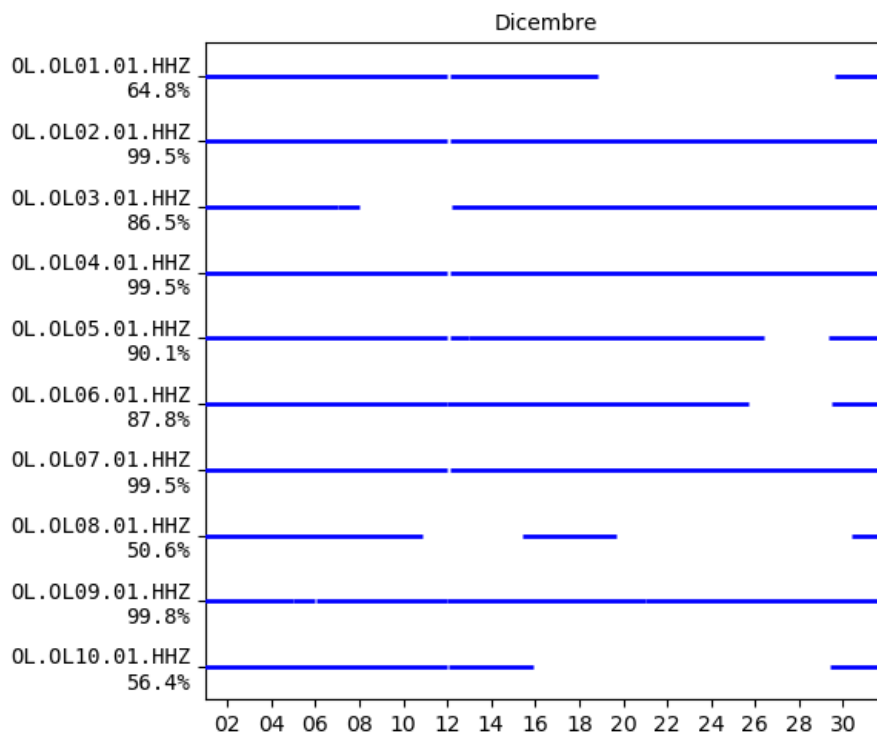
Appendice A – Disponibilità dei dati registrati dalla RMCL

I grafici raffigurano la disponibilità dei dati registrati dalle stazioni della Rete di Monitoraggio di Cornegliano Laudense (RMCL) nel periodo 1/11/2022-30/4/2023, considerato in questa relazione. Ogni tabella si riferisce a un mese. Le barre orizzontali grigie indicano la disponibilità dei dati per le stazioni corrispondenti (codice OL##). L'ascissa indica il tempo rappresentato come giorno del mese corrente. Per ogni stazione è mostrato solo il canale verticale (HHZ) del sismometro posto in pozzo.

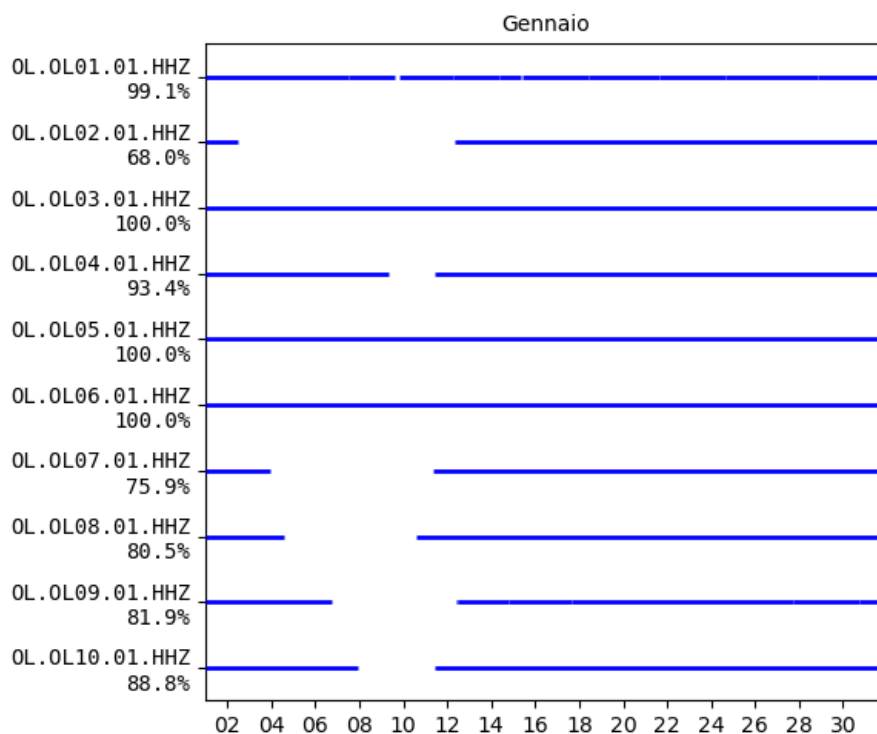
Novembre 2022



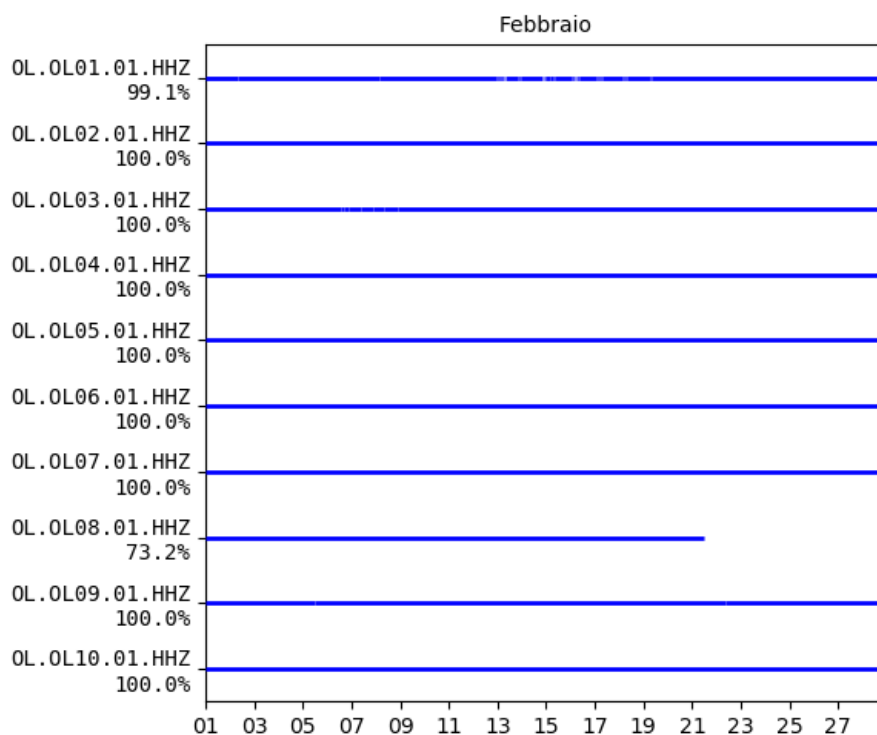
Dicembre 2022



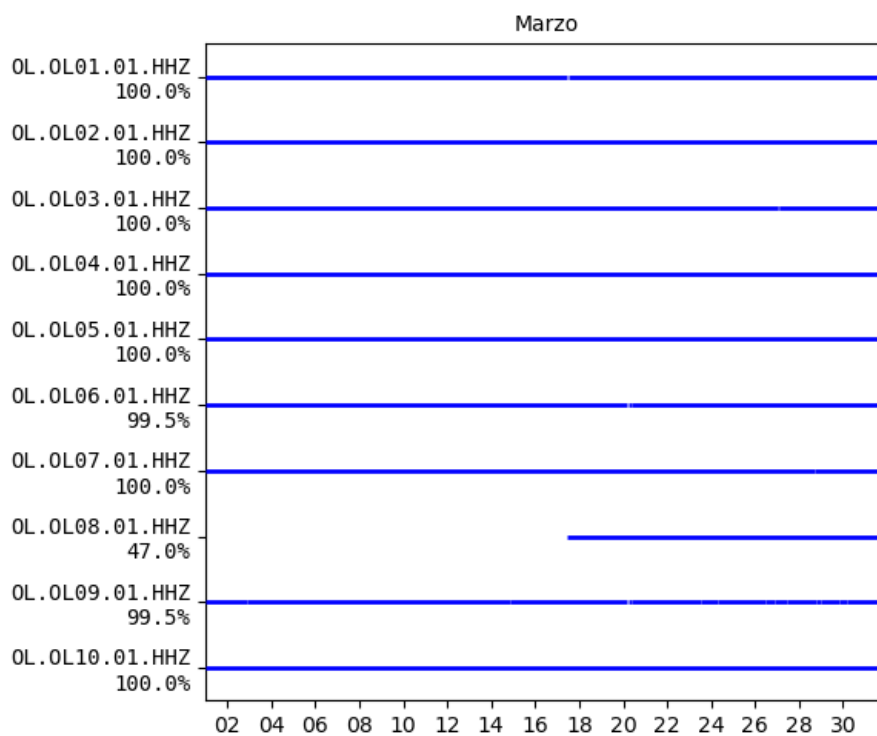
Gennaio 2023



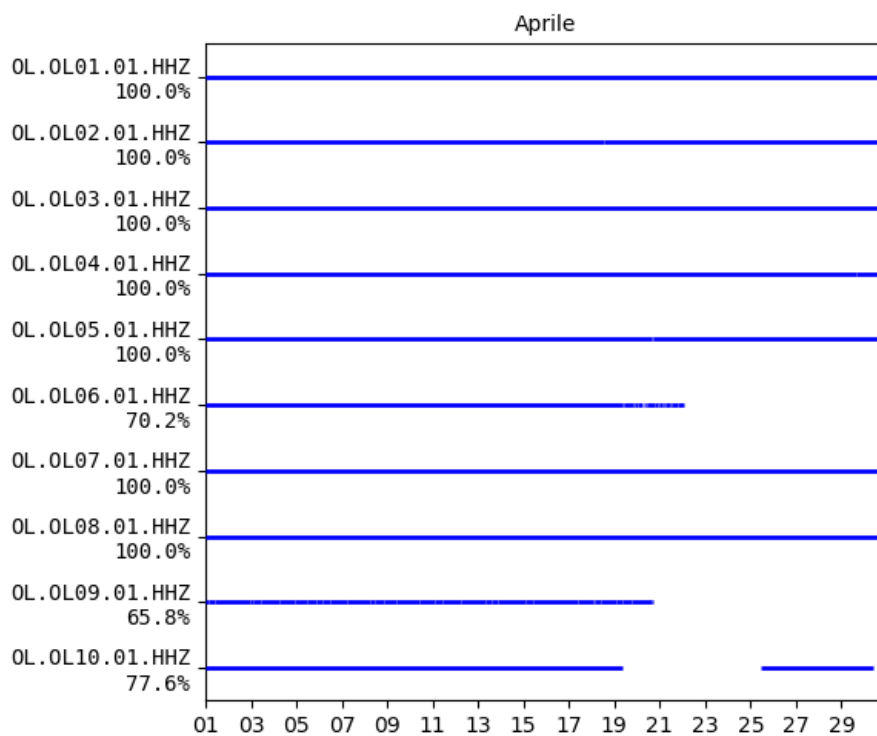
Febbraio 2023



Marzo 2023



Aprile 2023



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
GAP	angolo di gap (gradi)
No	numero di fasi
Ns	numero di stazioni
errh1	errore orizzontale 1 (km)
errh2	errore orizzontale 2 (km)
errv	errore verticale (km)
rms	residuo medio (s)
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.

# id	Area	date	time	lat	lon	depth	Ml	Q	GAP	No	Ns	errh1	errh2	errz	rms	distance	Location
1	DE*	2017/03/06	20:12:37.93	45.370	9.371	9.12	2.2	D	251	7	0	1.77	4.16	99.00	0.41	12.58	Dresano
2	AE	2017/05/23	04:16:32.54	45.448	9.246	37.95	1.9	A	175	16	7	0.44	1.05	0.65	0.15	43.15	Milano
3	DI*	2017/07/11	22:25:03.54	45.306	9.422	1.43	0.9	D	294	8	3	0.11	0.17	99.00	0.07	1.99	Lodi Vecchio
4	DI	2017/07/12	00:17:53.87	45.304	9.419	2.19	1.1	A	156	15	6	0.14	0.20	0.14	0.18	2.21	Lodi Vecchio
5	DI	2017/07/12	00:18:30.95	45.304	9.435	1.25	--	A	256	8	3	0.05	0.25	0.04	0.04	1.04	Lodi Vecchio
6	DE	2017/10/20	21:37:06.65	45.325	9.544	3.22	1.2	C	208	5	2	0.12	0.71	4.97	0.10	6.23	Lodi
7	DI	2018/01/27	04:01:44.44	45.311	9.435	1.51	0.8	A	278	11	5	0.06	0.09	1.16	0.11	1.84	Tavazzano con Villavesco
8	DE	2018/05/27	20:01:35.35	45.257	9.456	5.66	0.7	A	150	13	6	0.14	0.19	0.19	0.14	4.84	Pieve Fissiraga
9	AE	2018/06/18	21:45:20.87	45.276	9.253	33.33	1.2	A	191	18	9	0.40	0.65	0.47	0.37	35.29	Vidigulfo
10	AE	2018/06/20	00:49:07.48	45.276	9.238	34.0	1.3	A	301	15	7	0.59	0.72	0.37	0.23	36.41	Vidigulfo
11	AE	2018/10/30	05:03:37.61	45.383	9.572	34.01	1.9	A	153	22	11	0.39	0.79	0.72	0.17	34.89	Palazzo Pignano
12	DE	2018/11/21	03:26:44.47	45.308	9.532	3.14	2.1	A	284	12	6	0.18	0.22	0.38	0.19	4.41	Lodi
13	AE	2018/12/23	15:06:12.55	45.440	9.583	35.61	1.6	B	197	14	7	0.29	2.29	0.93	0.00	38.81	Vailate
14	AE	2019/04/25	23:11:31.35	45.355	9.605	31.97	1.5	A	255	21	9	0.36	0.59	0.49	0.10	32.73	Bagnolo Cremasco
15	DI	2019/06/12	10:24:02.07	45.302	9.502	1.65	1.0	B	191	10	5	0.11	0.17	1.50	0.16	1.82	Lodi
16	DE	2019/06/21	15:22:39.47	45.308	9.535	2.17	1.0	A	290	10	5	0.10	0.22	0.08	0.21	4.28	Lodi
17	DE	2019/06/21	15:49:01.16	45.307	9.529	2.27	0.9	A	179	10	5	0.08	0.16	0.17	0.16	3.84	Lodi
18	AE	2019/06/30	12:01:20.47	45.332	9.312	35.0	2.0	A	115	30	14	0.20	0.46	0.42	0.15	35.36	Cerro al Lambro
19	DE	2019/07/13	03:01:35.97	45.300	9.528	2.49	1.2	A	180	16	8	0.10	0.15	0.06	0.16	3.54	Lodi
20	DE	2019/08/17	09:40:07.14	45.305	9.649	4.24	2.0	A	222	17	7	0.71	0.85	1.02	0.23	13.04	Credera Rubbiano
21	AE*	2020/10/28	09:28:30.08	45.453	9.467	12.19	1.7	D	177	5	2	0.58	3.84	99.00	0.21	20.52	Truccazzano
22	AE	2020/12/17	15:59:23.86	45.445	9.169	41.63	3.3	A	224	25	9	0.83	0.97	1.08	0.24	48.51	Milano
23	AE	2021/01/17	10:27:25.98	45.473	9.390	36.99	2.7	A	124	31	15	0.18	0.20	0.22	0.27	40.92	Settala
24	AE	2021/02/21	08:54:21.16	45.212	9.112	31.81	1.7	B	257	15	7	0.72	1.45	0.71	0.22	41.03	Pavia
25	DI	2021/08/14	06:26:48.34	45.303	9.436	1.23	0.2	A	252	5	2	0.08	0.48	0.10	0.01	0.97	Lodi Vecchio
26	DI	2021/08/14	06:27:10.49	45.304	9.427	1.85	0.5	A	259	11	5	0.17	0.33	0.49	0.14	1.58	Lodi Vecchio
27	AE	2021/10/11	23:18:21.81	45.306	9.246	23.94	2.9	A	179	27	12	0.14	0.23	0.20	0.47	27.30	Landriano
28	AE	2021/11/06	11:00:57.57	45.496	9.581	34.95	1.7	A	113	20	9	0.27	0.41	0.57	0.14	41.29	Casirate d'Adda
29	DE	2021/12/21	23:37:57.32	45.313	9.536	2.51	1.6	A	195	16	8	0.14	0.46	0.18	0.25	4.68	Lodi
30	DE	2021/12/22	05:17:15.26	45.312	9.533	2.43	2.2	A	189	16	8	0.09	0.17	0.07	0.14	4.45	Lodi
31	DE	2022/02/14	01:02:55.81	45.315	9.528	2.14	1.6	A	107	17	8	0.10	0.15	0.13	0.14	4.36	Lodi
32	AE	2022/03/21	21:33:20.29	45.382	9.653	36.12	1.8	A	247	17	6	0.43	0.83	0.95	0.08	38.45	Cremosano
33	DE	2022/06/15	00:38:54.27	45.315	9.526	2.1	1.3	A	168	11	5	0.07	0.08	0.20	0.12	4.20	Lodi
34	DI	2023/02/25	02:49:19.04	45.308	9.485	2.25	0.9	A	199	14	6	0.05	0.09	0.16	0.12	2.15	Lodi
35	DE	2023/03/28	02:02:44.34	45.311	9.535	2.89	1.3	A	194	16	7	0.16	0.34	0.12	0.34	4.60	Lodi

Appendice C – Serie temporali della Rete GNSS LODI nel sistema di riferimento ITRF08

In questa sezione sono riportate le serie temporali delle stazioni GNSS della RETE LODI secondo il sistema di riferimento ITRF08. 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).

OL01

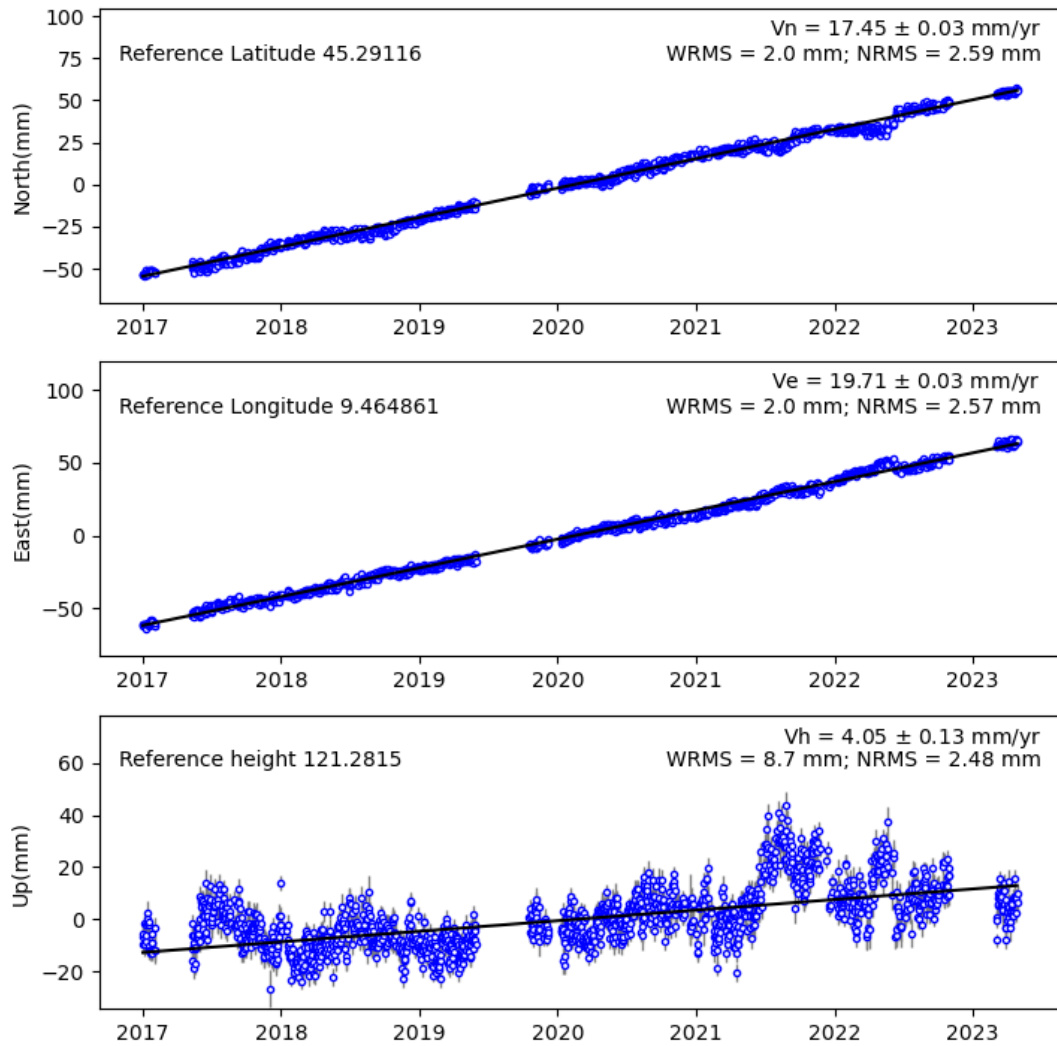


Figura C.1 – Serie temporale della stazione OL01 secondo il sistema di riferimento ITRF08.

CREA

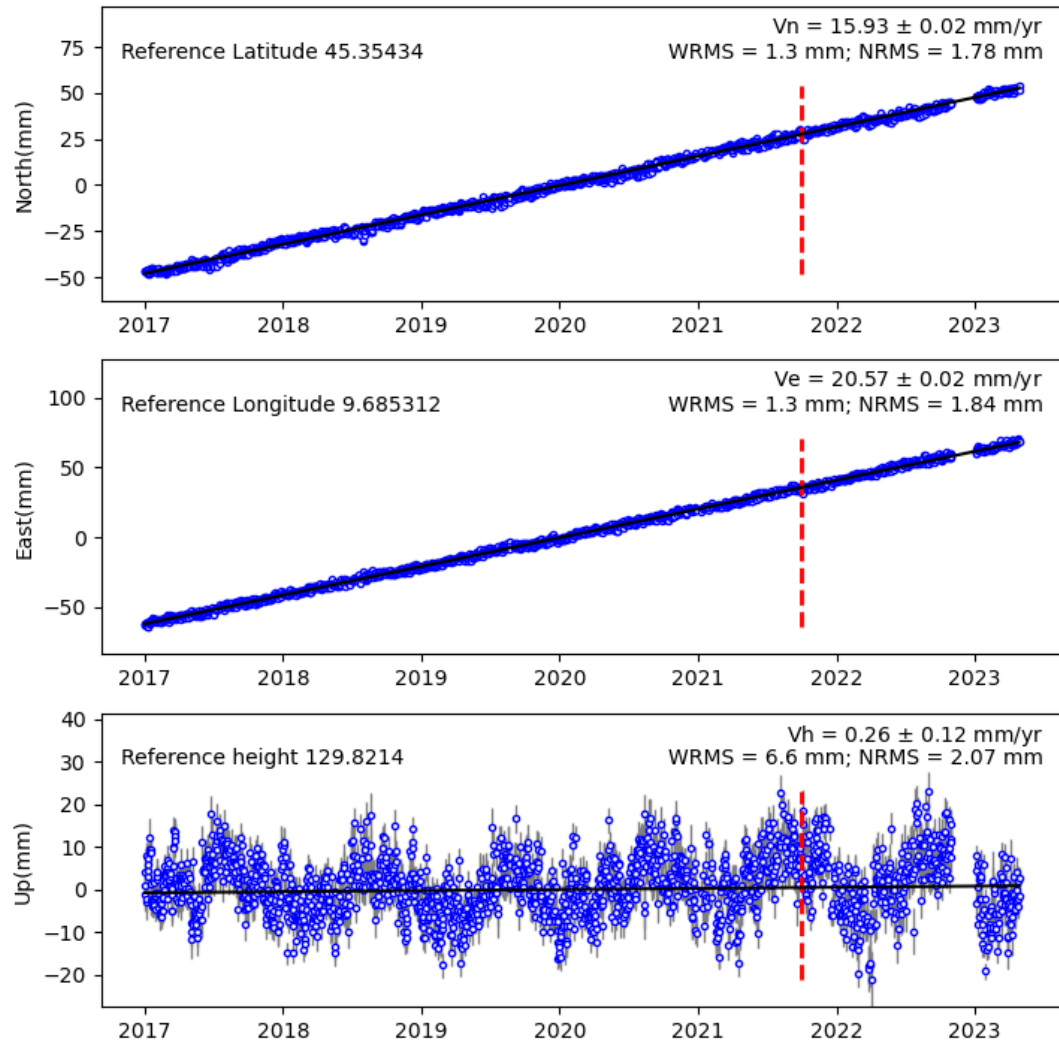


Figura C.2 – Serie temporale della stazione CREA secondo il sistema di riferimento ITRF08. La linea tratteggiata rossa rappresenta il cambiamento di antenna avvenuto il giorno 28/9/2021. Dalla serie temporale è stato rimosso il salto stimato dovuto al cambio antenna.

CREM

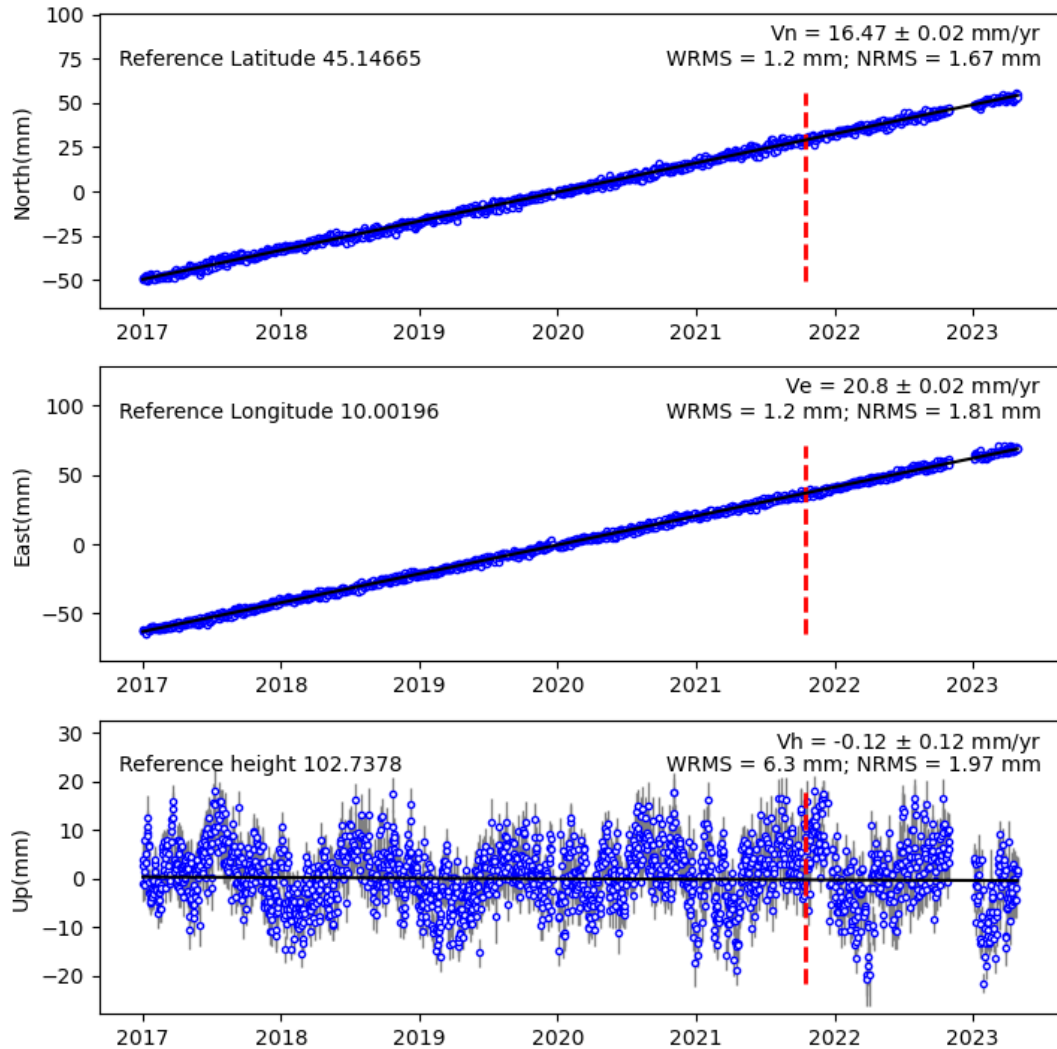


Figura C.3 – Serie temporale della stazione CREM secondo il sistema di riferimento ITRF08. La linea tratteggiata rossa rappresenta il cambiamento di antenna avvenuto il giorno 15/10/2020. Dalla serie temporale è stato rimosso il salto stimato dovuto al cambio antenna.

MILA

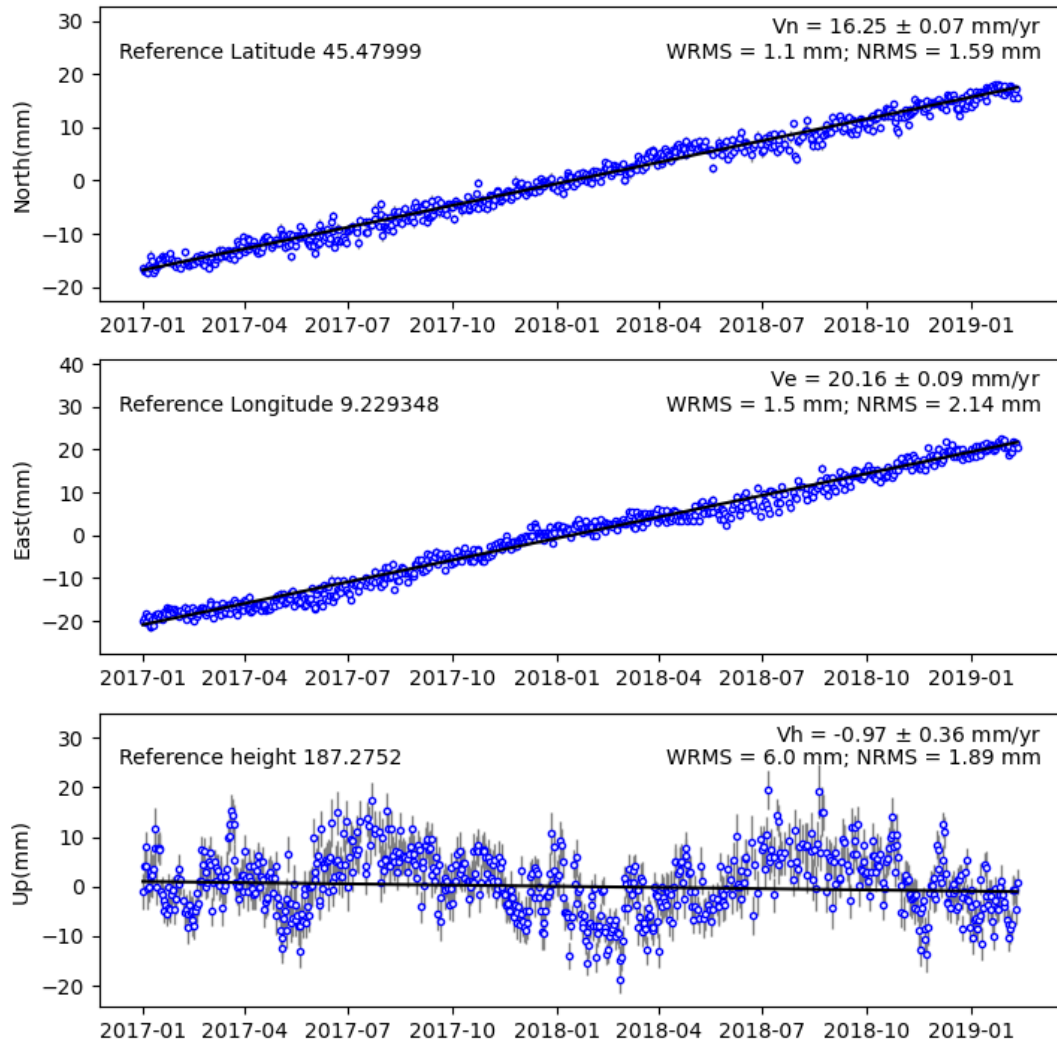


Figura C.4 – Serie temporale della stazione MILA secondo il sistema di riferimento ITRF08.

MIL2

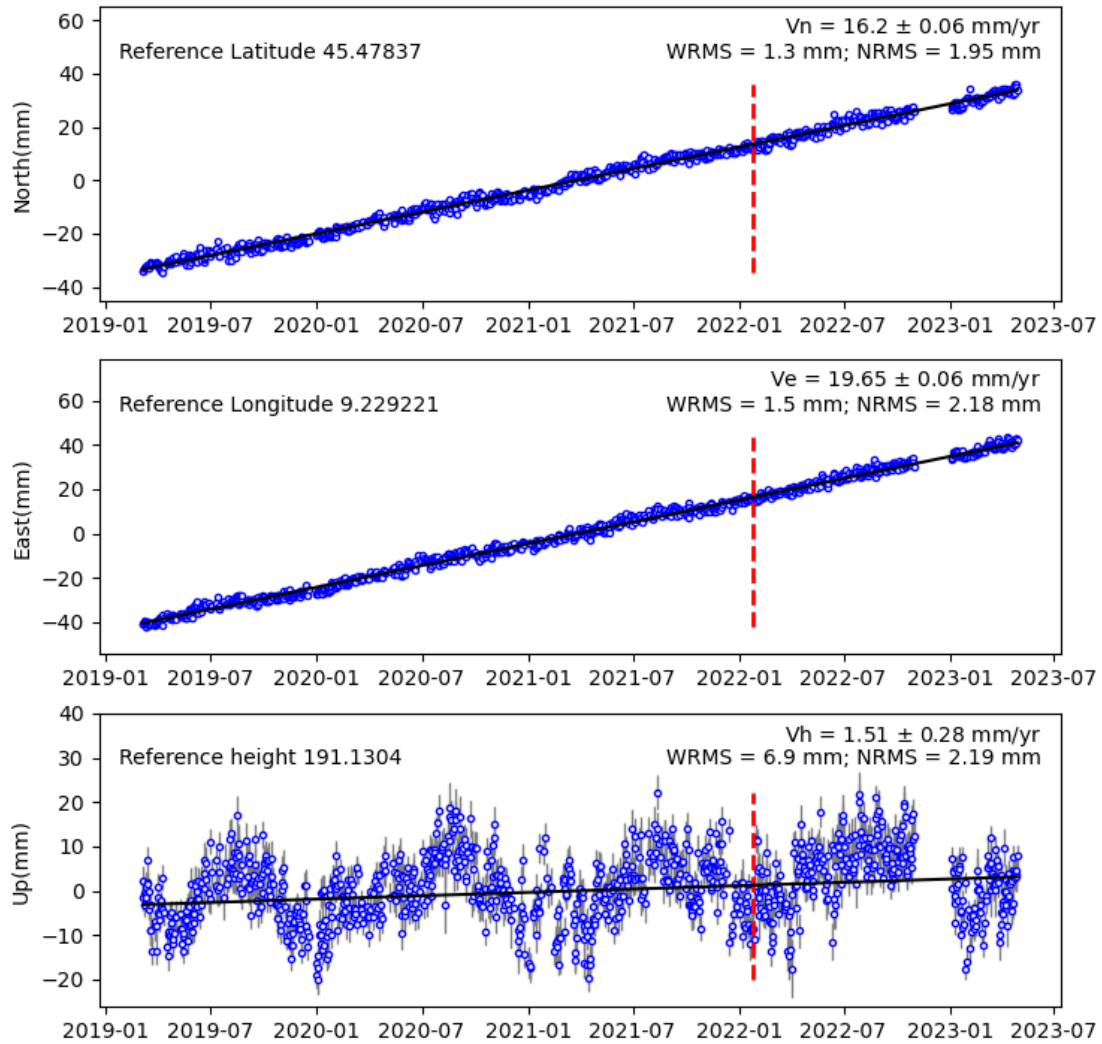


Figura C.5 – Serie temporale della stazione MIL2 secondo il sistema di riferimento ITRF08. La linea tratteggiata rossa rappresenta il cambiamento di antenna avvenuto il giorno 26/1/2022. Dalla serie temporale è stato rimosso il salto stimato dovuto al cambio antenna.

PAVI

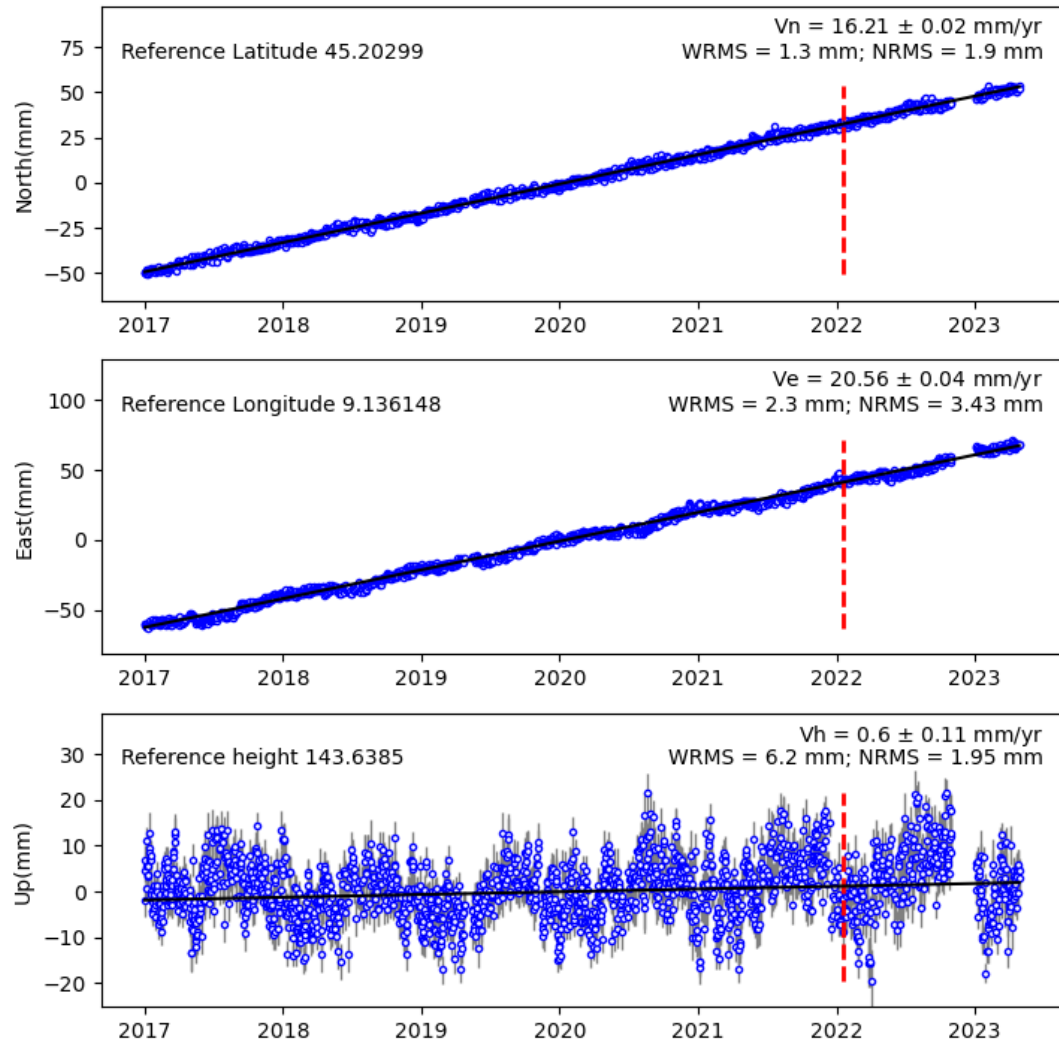
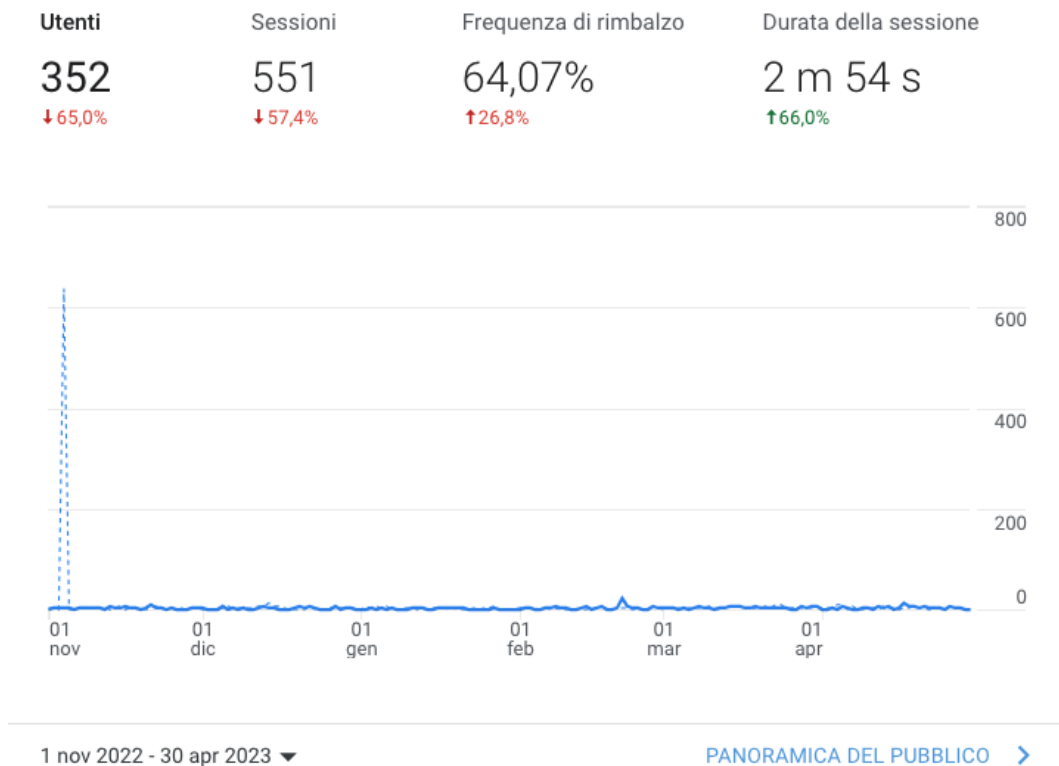


Figura C.6 – Serie temporale della stazione PAVI secondo il sistema di riferimento ITRF08. La linea tratteggiata rossa rappresenta il cambiamento di antenna avvenuto il giorno 20/1/2022. Dalla serie temporale è stato rimosso il salto stimato dovuto al cambio antenna.

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

Da novembre 2019 è attivo il sito web che descrive le attività di monitoraggio sismico e geodetico dello stoccaggio di Cornegliano Laudense. Nel periodo 01/11/2022-30/4/2023 sono state aperte circa 551 sessioni sul sito web da 351 utenti, come riportato in Figura D.1. In Figura D.1 (b) è riportato un ingrandimento della stessa serie temporale in cui si evidenzia con più chiarezza l'andamento degli accessi al sito web; si può notare come gli accessi non siano particolarmente numerosi ma comunque regolari. Come si può notare nella Figura D.2 nel periodo considerato gli utenti hanno visitato il sito web soprattutto dall'Italia (86,4%) ma è comunque presente una notevole componente di utenti stranieri. Gli accessi al sito vengono effettuati principalmente da computer (v. Figura D.3). Infine, dalla Figura D.4 si può notare come le pagine di maggiore interesse per gli utenti che accedono al sito sono quelle relative al monitoraggio geodetico e alla deformazione superficiale, oltre alle eventuali notizie anche in merito a terremoti registrati dalla rete RMCL, verificatisi in altre regioni.

(a)



(b)

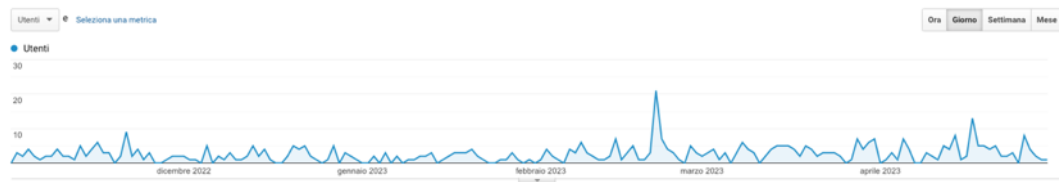
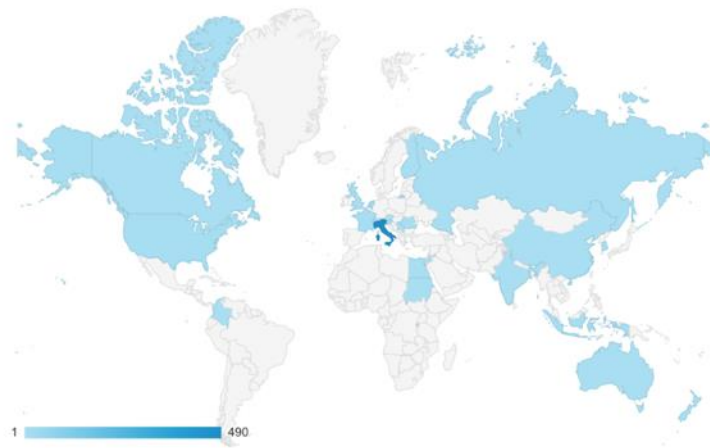


Figura D.1 – (a) Rendiconto delle visite effettuate sul sito web nel periodo 1/11/2022-30/4/2023 e del numero di utenti. (b) Dettaglio della stessa serie temporale di (a).

(a)

Sessioni ▾



(b)

Paese	Utenti	% Utenti
1. Italy	305	86,40%
2. France	6	1,70%
3. United States	6	1,70%
4. Indonesia	5	1,42%
5. Netherlands	4	1,13%
6. Switzerland	3	0,85%
7. New Zealand	3	0,85%
8. China	2	0,57%
9. Finland	2	0,57%
10. United Kingdom	2	0,57%

Figura D.2 – (a) Distribuzione del numero di visite effettuate sul sito web nel periodo 1/11/2022-30/4/2023 in funzione del paese di accesso; (b) Lista dei dieci paesi con il numero più alto di accessi al sito nel periodo esaminato.

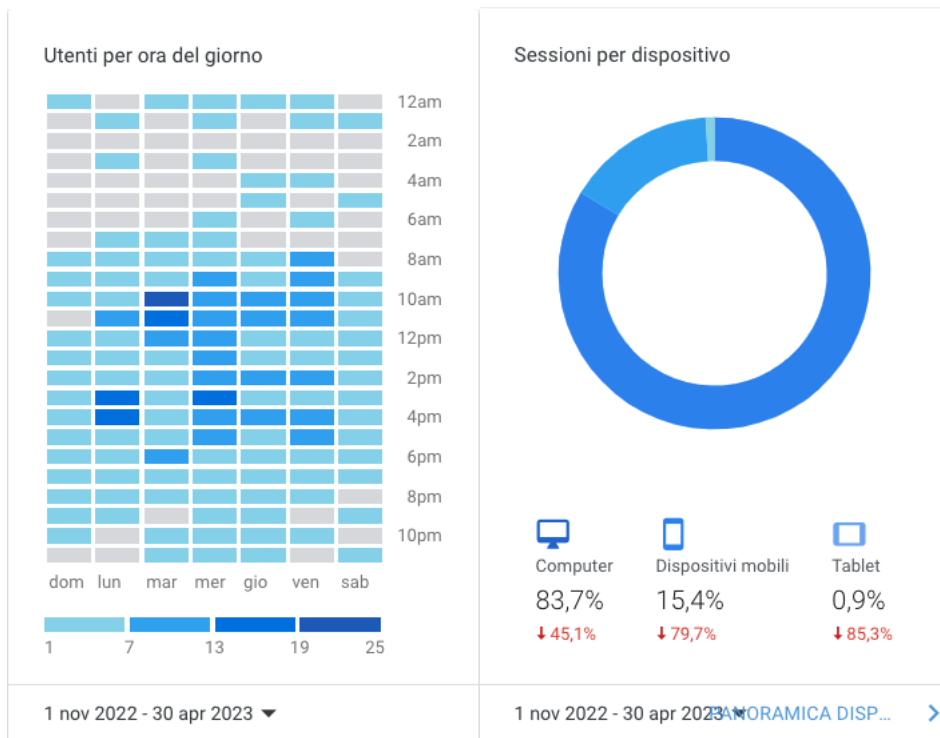


Figura D.3 – (sinistra) Distribuzione del numero di utenti in funzione delle ore del giorno nel periodo 1/11/2022-30/4/2023; (destra) percentuale di sessioni in funzione del tipo di dispositivo.

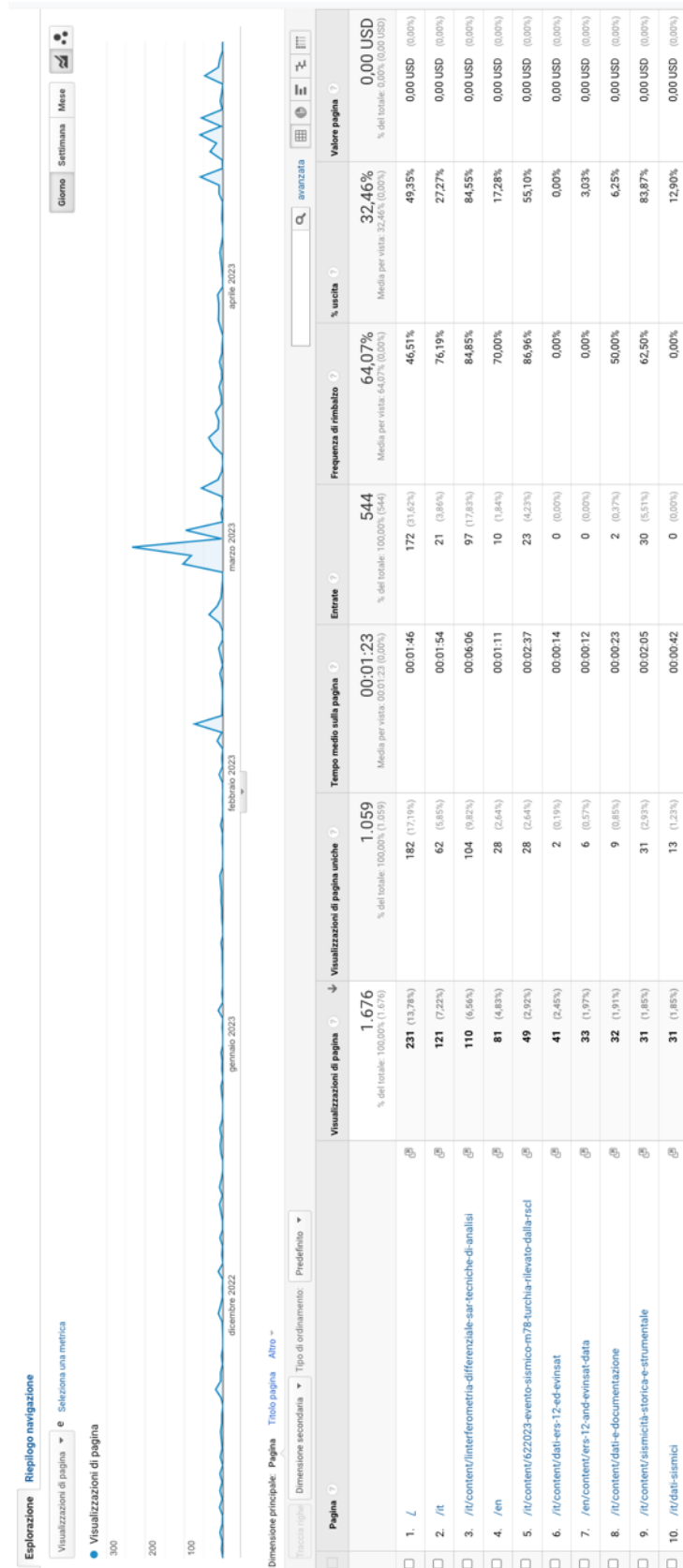


Figura D.4 – Rendiconto delle pagine di maggiore interesse del sito web nel periodo 1/11/2022-30/4/2023.