Università degli Studi di Ferrara

Net4Fer

istituto per il rilevamento elettromagnetico dell'ambiente

Accordo tra

Comune di Ferrara e Struttura Preposta al Monitoraggio

(Università degli Studi di Ferrara e Consiglio Nazionale delle Ricerche)

in attuazione dell'Accordo Quadro

"Applicazione degli Indirizzi e Linee Guida alla Concessione di coltivazione di risorse geotermiche Ferrara"

Relazione Tecnica n. 4

Responsabili Scientifici:

Prof. Riccardo Caputo e Dott. Gianni Onorato

Comune di Ferrara

Servizio Ambiente e Agricoltura

Accordo tra

Comune di Ferrara e Struttura Preposta al Monitoraggio

(Università degli Studi di Ferrara e Consiglio Nazionale delle Ricerche)

Relazione Tecnica n. 4

con i contributi di
Brighenti F.[1], Caputo R.[1], Pellegrinelli A.[2], De Luca C.[3], Lanari R.[3], Onorato G.[3]

1) Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra, Università degli Studi di Ferrara
2) Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Ferrara
3) Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente, Consiglio Nazionale delle Ricerche

inviata al Comitato Tecnico: 05/06/2025

revisionata: 30/06/2025

approvata dal Comitato Tecnico: 30/06/2025

Premessa

Come previsto dall'Accordo tra il Comune di Ferrara e la Struttura Preposta al Monitoraggio (SPM), costituita dall'Università degli Studi di Ferrara e il Consiglio Nazionale delle Ricerche, in attuazione dell'Accordo Quadro "Applicazione degli Indirizzi e Linee Guida alla concessione di coltivazione di risorse geotermiche Ferrara", stipulato tra il Ministero della Transizione Ecologica, la Regione Emilia-Romagna, il Comune di Ferrara, l'Università degli Studi di Ferrara, il Consiglio Nazionale delle Ricerche ed Enel Green Power-HERA, la SPM ha redatto la presente Relazione Tecnica n. 4 relativa al periodo 1/012/2024-31/05/2025.

Per un approfondimento sui criteri seguiti per la definizione dei diversi domini di monitoraggio utilizzati per la sperimentazione, si rimanda alla Relazione n. 1 (Figura 1).

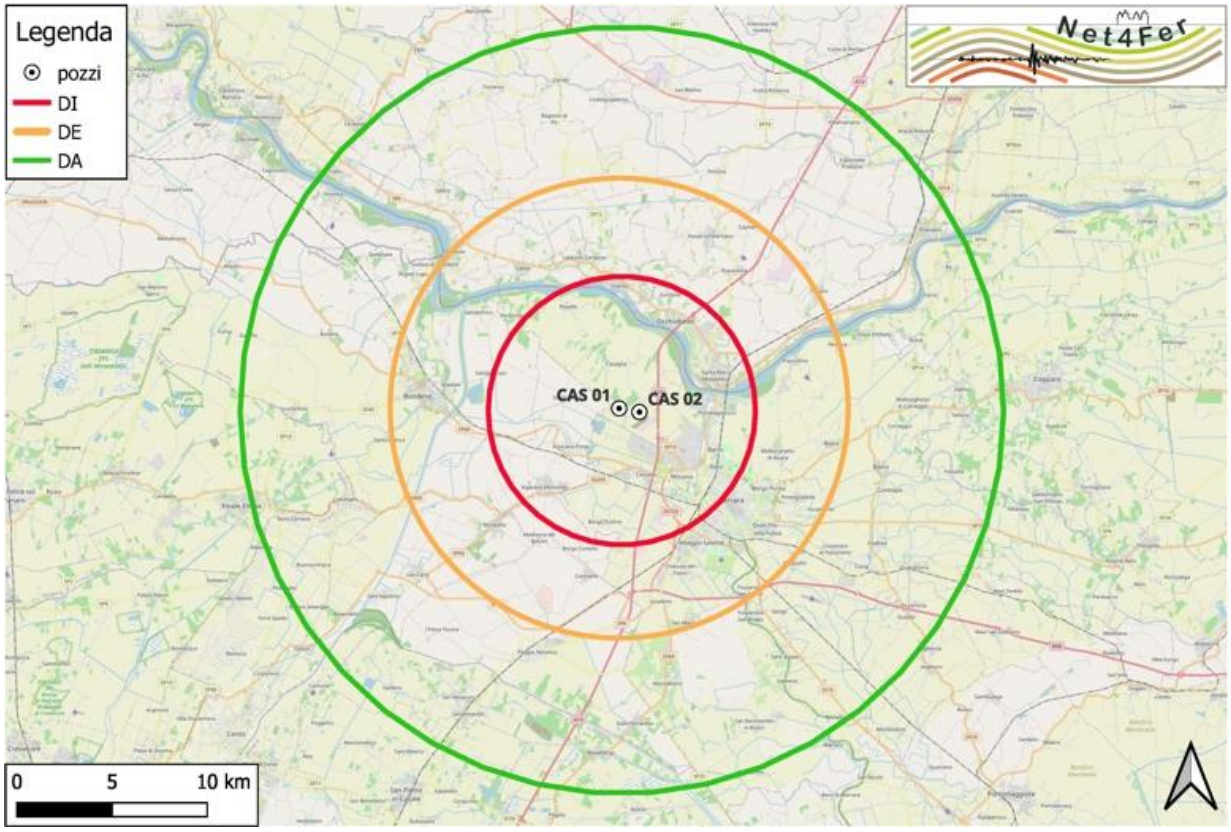


Figura 1: Limiti del Dominio Interno, DI (rosso), e Dominio Esteso, DE (arancio) e del Dominio di Attenzione, DA (verde) che utilizzati per il monitoraggio.

Per una descrizione dettagliata degli scopi e delle caratteristiche dei diversi monitoraggi effettuati si rimanda agli "Indirizzi e Linee Guida per il monitoraggio della sismicità, delle deformazioni del suolo e delle pressioni di poro nell'ambito delle attività antropiche" del 2014 (ILG14) e alle "Linee Guida per l'utilizzazione della risorsa geotermica a media e alta entalpia" del 2016 (ILG16).

Le infrastrutture e le strumentazioni previste nel Documento Tecnico dell'Accordo Quadro sono state descritte dettagliatamente nella Relazione Tecnica n. 1.

1. Monitoraggio sismico

Relativamente al periodo oggetto del presente rapporto, risultano operative tutte le stazioni previste per il monitoraggio sismico: le 6 stazioni della rete del Comune di Ferrara (Tabella 1) e le 10 stazioni della rete EGP-HERA (Tabella 2). Come previsto inizialmente, la rete EGP-HERA ha raggiunto il totale di 10 stazioni con la messa in funzione, avvenuta nel dicembre 2024, delle ultime tre stazioni: FEM7 (Boara), FEM8 (San Carlo) e FEM9 (Pincara).

sigla	profondità [m da p.c.]	Lat.	Lon.	sensore	digitalizzatore	memoria interna [GB]	canali ambientali
PONT	12	44.873	11.548	L-4C	DM24S3EAM	8	sì
ALBE	38	44.917	11.539	L-4A	CD24S3EAM-RR	16	no
FORN	40	44.881	11.496	L-4A	CD24S3EAM-RR	16	no
SFRN	40	44.824	11.547	L-4A	CD24S3EAM-RR	16	no
DEPU	56	44.868	11.627	L-4A	CD24S3EAM-RR	16	no
TORR	57	44.784	11.593	L-4A	CD24S3EAM-RR	16	no

Tabella 1: Stazioni della rete sismometrica del Comune di Ferrara operative durante il periodo considerato nella presente Relazione Tecnica.

ID stazione	località	Lat.	Long.	quota m s.l.m.	sensore	sensitività (V/m/s)
FEM0	Casaglia	44.879	11.546	6.0	SS08, 20 s	1500
FEM1	Diamantina	44.881	11.497	6.0	SS-10	800
FEM2	Ravalle	44.924	11.515	8.0	SS-10	800
FEM3	Borgo Fondo Reno	44.824	11.547	10.0	SS-10	800
FEM4	San Martino	44.784	11.593	8.0	SS-10	800
FEM5	Ferrara	44.845	11.625	5.0	SS-10	800
FEM6	Santa Maria Maddalena	44.903	11.596	8.0	SS-10	800
FEM7	Boara	44.864	11.683	5.0	SS-10	800
FEM8	San Carlo	44.803	11.416	13	SS-10	800
FEM9	Pincara	44.984	11.611	6	SS-10	800

Tabella 2: Stazioni della rete di monitoraggio sismico EGP-HERA operative durante il periodo considerato nella presente Relazione Tecnica.

Per le analisi *off-line* sono state utilizzate anche diverse stazioni della rete nazionale dell'INGV (Tabella 3).

A partire da febbraio 2025, a seguito di un aggiornamento del software *SeismoServer* sulle macchine di EGP, la SPM ha rilevato interruzioni sistematiche nella trasmissione dei dati (60 secondi ogni ora, con recupero in 20 minuti) il problema è durato circa una settimana.

Una verifica successiva ha confermato che tali disconnessioni erano già presenti nella fase iniziale della trasmissione, sebbene in forma meno evidente. Attualmente, le disconnessioni si verificano ogni 58 minuti,

ID stazione	Rete	Lat.	Lon.	sensore
BRSN	INGV (IV)	44.284	12.080	LENNARTZ LE-1S
CAVE	INGV (IV)	44.866	11.003	NANOMETRICS TRILIUM-120S
FERS	INGV (IV)	44.904	11.541	LUNITEK TELLUS-5s
FIU	INGV (IV)	44.640	11.492	LENNARTZ LE-5S
IMOL	INGV (IV)	44.360	11.742	LENNARTZ LE-1S
NDIM	INGV (IV)	44.887	10.899	NANOMETRICS TRILIUM-40S
OPPE	INGV (IV)	45.308	11.172	NANOMETRICS TRILIUM-40S
SERM	INGV (IV)	45.010	11.296	LENNARTZ LE3D-1S
VENL	INGV (IV)	45.417	12.377	LUNITEK TELLUS-5s
IT09A	INGV (4P)	44.661	11.436	NANOMETRICS TRILIUM-120S
IT08A	INGV (4P)	44.984	12.070	NANOMETRICS TRILIUM-120S

Tabella 3: Stazioni della rete nazionale permanente (IV) o temporanea (4P) dell'INGV utilizzate durante il periodo considerato nella presente Relazione Tecnica per le analisi *off-line*.

durano circa 30 secondi e vengono recuperate entro un minuto. Tale comportamento, pur anomalo, non compromette l'efficacia delle analisi in *tempo quasi-reale*, che risultano comunque affidabili. EGP e la SPM hanno avviato una serie di prove per risolvere il problema, finora senza esito positivo. EGP ha inoltre segnalato che anomalie simili non si sono mai verificate nelle circa 300 VPN gestite, dove il *firewall* è affidato a dispositivi fisici e non a software su server, come nel caso della SPM. È in corso una collaborazione attiva con il concessionario per individuare e implementare una soluzione definitiva.

La percentuale media di operatività e trasmissione dati delle stazioni della rete del Comune di Ferrara è stata del 93,8%, con valori mensili compresi tra un minimo del 91,7% e un massimo del 97,0%.

Per le stazioni della rete EGP-HERA, la percentuale media è risultata pari al 91,2%, con valori mensili variabili tra un minimo del 78,8% e un massimo del 99,1%.

Per quanto riguarda le analisi *off-line*, grazie all'invio dei dati da parte di EGP, la completezza complessiva dei dati sale al 95,5%. Attendiamo tuttavia l'integrazione dei dati di aprile.

Va inoltre sottolineato che i dati delle analisi in tempo reale per il mese di maggio, così come le relative integrazioni che saranno richieste a mese concluso, sono ancora in fase di completamento.

Riteniamo che, una volta completate queste due integrazioni, i dati potranno essere aggiornati e migliorati in modo significativo. I valori mensili della rete EGP-HERA hanno comunque mostrato, in generale, un progressivo miglioramento nel tempo.

In Figura 2 e Tabella 4, sono riportati gli eventi sismici con epicentro all'interno del Dominio di Attenzione e sistematicamente rilocalizzati da operatore della SPM mediante procedura di *picking* manuale *off-line*.

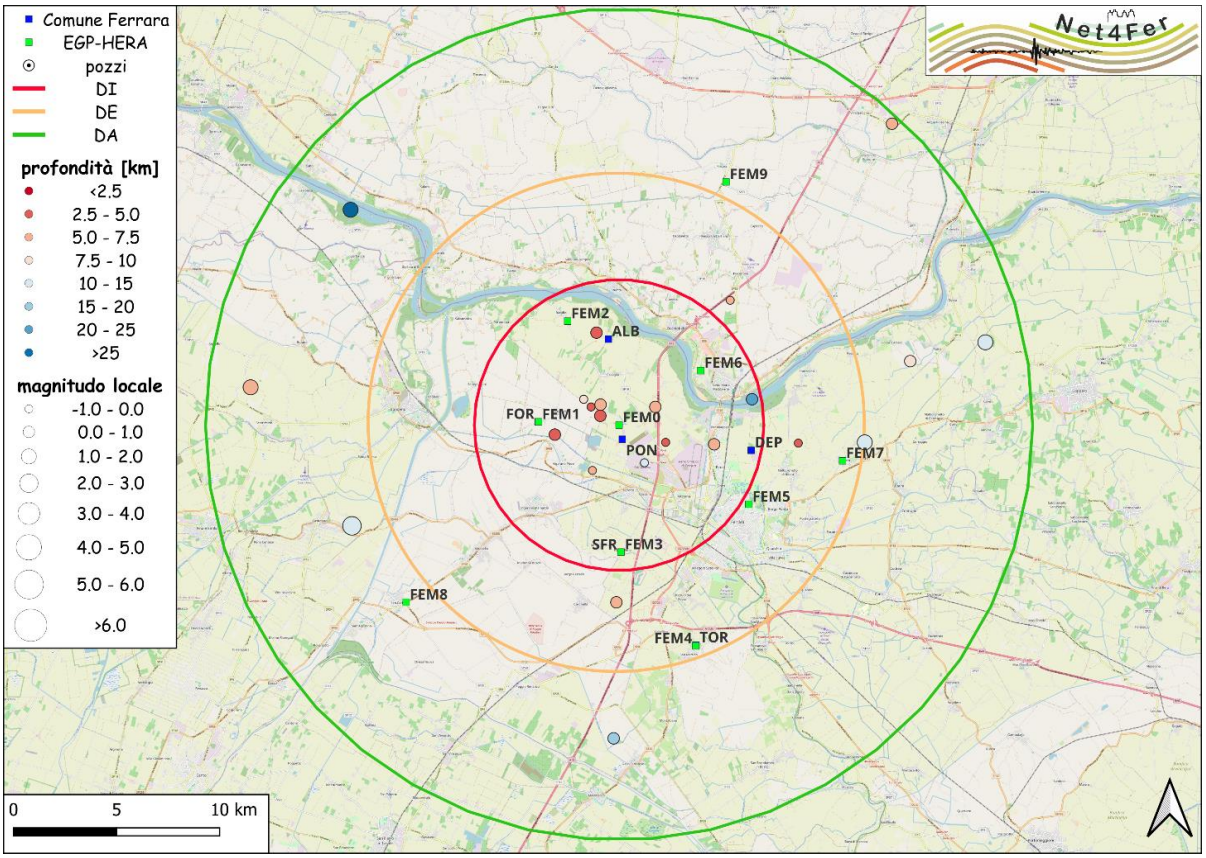


Figura 2: Eventi sismici con epicentro all'interno del Dominio di Attenzione e sistematicamente rilocalizzati da operatore mediante procedura di *picking* manuale.

In Figura 3 e Tabella 5, sono invece riportati gli eventi sismici con epicentro in un raggio di 110 km dal pozzo Casaglia_01 e sistematicamente rilocalizzati da operatore mediante procedura di *picking* manuale con l'ausilio di stazioni della rete nazionale.

#UTC [date time]	dominio	lat. [°N]	long. [°E]	prof. [km]	magnitudo locale	loc. err. [km]	prof. err. [km]	mag. err.
2025-05-26 10:14:02	DE	44.8025	11.54433	5.28	0.02	0.1	2.7	0.39
2025-05-21 16:49:18	DE	44.8905	11.62733	20.88	0.43	0.1	0.1	0.08
2025-05-19 12:41:04	DA	44.8356	11.38250	10.4	2.41	0.1	0.2	0.55
2025-05-16 11:40:10	DE	44.8715	11.65566	4.8	-0.23	0.1	0.1	0.08
2025-05-15 13:56:47	DI	44.8630	11.56150	10.43	-0.0	0.2	0.2	0.09
2025-05-09 19:05:47	DI	44.8718	11.57450	3.21	-0.53	0.4	0.6	0.17
2025-04-12 22:12:20	DI	44.8596	11.52966	5.91	-0.52	0.6	0.7	0.2
2025-03-10 15:57:02	DA	44.9151	11.77016	13.37	1.36	0.7	0.5	0.4
2025-03-03 09:47:48	DI	44.8881	11.53466	5.1	0.17	0.1	0.2	0.23
2025-02-28 23:48:44	DI	44.8871	11.52883	2.88	-0.03	0.1	0.3	0.37
2025-02-28 20:06:58	DI	44.8833	11.53450	2.83	0.75	0.6	0.2	0.29
2025-02-26 21:07:37	DE	44.9333	11.61400	6.55	-0.3	0.1	0.2	0.2
2025-02-15 04:21:17	DI	44.8751	11.50666	4.38	0.06	0.1	0.1	0.14
2025-02-08 05:25:44	DA	44.8956	11.32050	6.99	1.9	0.1	0.2	0.26
2025-01-26 02:51:02	DA	45.0096	11.71300	5.1	0.36	0.2	0.6	0.15
2025-01-11 06:37:12	DI	44.8871	11.56816	7.19	0.64	0.2	0.1	0.09
2025-01-03 12:04:29	DI	44.9193	11.53216	3.51	0.81	0.1	0.01	0.13
2024-12-17 10:00:15	DI	44.8905	11.52433	8.5	-0.18	0.1	0.2	0.38
2024-12-10 02:47:28	DA	44.7435	11.54266	18.77	0.44	0.1	0.2	0.11
2024-12-08 10:36:42	DA	44.9725	11.38166	38.59	1.37	0.3	0.2	0.22
2024-11-28 14:10:37	DI	44.8710	11.60416	5.81	0.35	0.2	0.5	0.15
2024-11-10 04:14:06	DA	44.9070	11.72416	8.41	0.13	0.4	0.2	0.21
2024-11-10 00:18:43	DA	44.8718	11.69633	11.94	1.51	0.2	0.2	0.26

Tabella 4: Elenco degli eventi con epicentro all'interno dei Domini di Attenzione e sistematicamente rilocalizzati da operatore mediante procedura di *picking* manuale. DI: dominio interno; DE: dominio esteso; DA: dominio di attenzione.

La SPM ha anche affinato il protocollo *off-line* per il riconoscimento e la revisione dei dati per effettuare analisi di dettaglio, sempre con le tempistiche definite al Capitolo 9 degli ILG14. A tal riguardo, la SPM ha revisionato regolarmente i dati relativi agli eventi registrati avvalendosi, laddove ritenuto utile, anche dei segnali sismici provenienti dalla rete nazionale. In nessun caso, nel periodo preso in esame, si è osservato il superamento dei valori soglia definiti dagli ILG14 (Cap. 9, Par. 4, Tab. 4) e temporaneamente recepiti dal Comitato Tecnico (Documento Tecnico approvato il 16 marzo 2023).

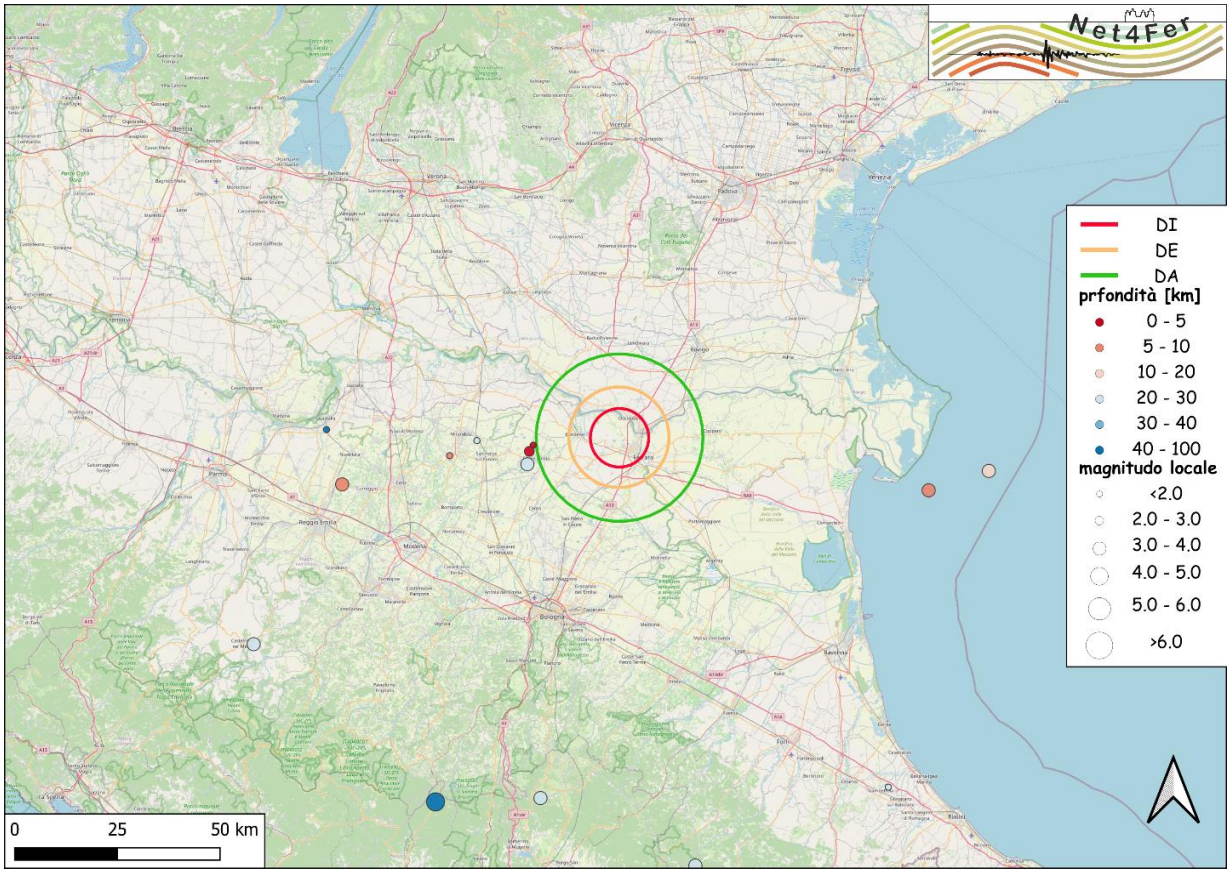


Figura 3: Eventi sismici con epicentro entro un raggio di 110 km dal pozzo Casaglia_01, ricadenti all'esterno dei Domini e sistematicamente rilocalizzati da un operatore mediante procedura di *picking* manuale includendo stazioni della rete nazionale (Tabella 3).

#UTC [date time]	lat. [°N]	long. [°E]	prof. [km]	magnitudo locale	loc. err. [km]	prof. err. [km]	mag. err.
2025-05-17 10:46:33	44.8968	10.6575	47.36	1.83	1.8	4	0.3
2025-05-03 03:08:20	44.0916	10.9881	55.10	3.81	1.1	2.6	0.17
2025-03-18 01:53:31	44.7790	10.7048	9.40	2.52	0.6	0.7	0.23
2025-03-09 20:11:52	44.8408	11.0310	10.00	0.44	0.4	9	0.31
2025-01-25 22:04:33	44.8733	11.1136	21.33	1.05	0.6	0.9	0.44
2025-01-25 05:37:31	44.1000	11.3063	23.55	2.35	2.9	4	0.3
2025-01-24 21:05:42	44.8223	11.2666	20.53	2.4	0.1	0.1	0.36
2025-01-23 01:45:08	44.1238	12.3613	24.0	1.86	6.1	2.8	0.36
2025-01-17 02:31:08	44.8635	11.2845	2.01	1.35	0.1	0.1	0.59
2025-01-15 15:34:50	44.8501	11.2725	2.14	2.94	0.1	0.1	0.36
2024-12-20 00:35:14	44.8080	12.6660	14.29	2.84	0.4	0.9	0.16
2024-12-20 00:23:01	44.7663	12.4835	8.00	2.28	1	1.2	0.29
2024-12-16 09:16:41	43.9528	11.7761	26.33	2.9	0.7	0.9	0.15
2024-11-24 23:40:56	44.4341	10.4365	26.57	2.45	2	3	0.14

Tabella 5: Elenco degli eventi verificatesi in un raggio di 110 km dal pozzo Casaglia_01 e sistematicamente rilocalizzati da un operatore mediante procedura di *picking* manuale con l'ausilio di stazioni della rete nazionale.

2. Monitoraggio delle deformazioni del suolo

Interferometria SAR

In questa sezione sono presentati i risultati dell'analisi interferometrica Radar ad Apertura Sintetica (SAR) finalizzata ad investigare le caratteristiche spazio-temporali di eventuali fenomeni deformativi presenti nell'area del sito geotermico di Casaglia, rilevati attraverso la generazione di mappe e serie temporali della deformazione superficiale.

In particolare, le analisi effettuate si basano sull'utilizzo dell'Interferometria Differenziale SAR (DInSAR; Gabriel et al. 1989; Burgmann et al. 2000; Massonnet e Feigl, 1998), una tecnica di telerilevamento che permette di misurare le deformazioni (useremo nel testo indistintamente il termine "deformazioni" e "spostamenti") della superficie terrestre a partire dalla differenza di fase (interferogramma) tra due immagini SAR relative alla stessa scena osservata, ed acquisite in tempi diversi lungo due orbite caratterizzate da una distanza ridotta. In particolare, tale tecnica consente di rilevare fenomeni di deformazione che producono una variazione di distanza dei target osservati, sia in termini di avvicinamento (segnali positivi) sia di allontanamento (segnali negativi) dal sensore SAR utilizzato, misurando le proiezioni dello spostamento lungo la linea di vista del radar (Line Of Sight, LOS) con una precisione che è una frazione della lunghezza d'onda alla quale opera il sistema, quindi tipicamente di pochi centimetri (Figura 4).

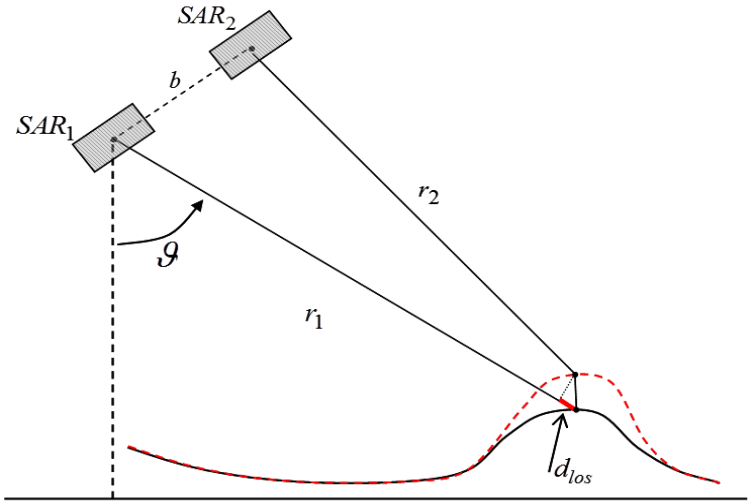


Figura 4: Scenario DInSAR nel piano ortogonale alla direzione di volo (azimuth). SAR1 e SAR2 indicano la posizione del sensore SAR nei due passaggi avvenuti negli istanti di tempo t_1 e t_2, tra i quali si verifica una deformazione del suolo (linea rossa tratteggiata). I fattori r_1 e r_2 indicano la distanza sensore-target rispettivamente agli istanti t_1 e t_2, θ l'angolo di vista del sensore, b la distanza tra le due orbite (*baseline* spaziale) lungo cui avvengono le due acquisizioni e d_{los} (linea rossa continua) lo spostamento avvenuto, nell'intervallo di tempo t_1-t_2 (baseline temporale) e misurato lungo la linea di vista del sensore, denominata LOS (*Line Of Sight*).

La capacità della tecnica DInSAR di rilevare gli effetti prodotti da singoli eventi deformativi (ad esempio un'eruzione vulcanica o un terremoto) è stata ampiamente dimostrata a partire dagli anni '90 (Massonnet et al. 1993; 1995; Peltzer et al., 1995; Rignot, 1998; Tesauro et al. 2000). Successivamente, l'interesse della comunità scientifica e degli enti di sorveglianza si è concentrato sulla possibilità di analizzare/monitorare l'evoluzione temporale delle deformazioni individuate, specie in zone con dinamica fortemente non lineare, come ad esempio, nel caso di aree soggette ad attività di estrazione/stoccaggio di idrocarburi e/o di re-iniezione di fluidi nel sottosuolo. In questo contesto, negli ultimi venti anni sono state sviluppate numerose tecniche interferometriche denominate "avanzate" (per distinguerle dalle tecniche DInSAR "classiche" che prevedono la produzione di singoli interferogrammi, pertanto di mappe di spostamento superficiale, associate ad un evento deformativo singolo), basate su approcci "multi-temporali" (Ferretti et al., 2000; 2011; Berardino et al., 2002; Mora et al., 2003; Hooper et al., 2004; Lanari et al., 2004; Kampes, 2006; Pepe et al., 2005; Hooper, 2008; Bonano et al., 2012). Tali tecniche, sfruttando efficacemente grandi data-set costituiti originariamente da alcune decine (oggi alcune centinaia) di immagini SAR e da centinaia di interferogrammi differenziali generati a partire da esse, si basano su un'adeguata scelta delle coppie di immagini SAR per la generazione dei corrispondenti interferogrammi, dalla cui opportuna elaborazione è possibile ottenere serie temporali di deformazione relative a fenomeni lenti, caratterizzati da velocità di spostamento fino al alcune decine di cm/anno.

Uno dei punti di forza delle tecniche DInSAR avanzate (anche dette multi-temporali), che ne ha favorito lo sviluppo e incentivato l'utilizzo in vari scenari di rischio, è l'accuratezza con cui è possibile misurare gli spostamenti superficiali rilevati: si possono raggiungere, infatti, accuratezze molto "spinte", di circa 1-2 mm/anno, per quanto riguarda le misure di velocità media di deformazione, e di circa 5-10 mm per le misure di deformazione (Casu et al., 2006; Lanari et al., 2007). Inoltre, rispetto alle tecniche di monitoraggio in situ, come misure di levelling di precisione, da GNSS o inclinometri, le tecniche DInSAR avanzate consentono di analizzare ampie porzioni della superficie terrestre (da alcune migliaia fino a centinaia di migliaia di km^2), garantendo un'elevata densità spaziale dei punti di misura e preservando, quindi, le caratteristiche sinottiche, di ampia mappatura spaziale, tipiche dei sistemi satellitari di imaging. Pertanto, nel caso di fenomeni deformativi spazialmente estesi, come quelli legati ad attività di sfruttamento del sottosuolo, le tecniche DInSAR avanzate risultano essere particolarmente efficaci in termini di costi/benefici, soprattutto se esse vengono rapportate all'estensione dell'area analizzabile.

L'approccio SBAS

L L'algoritmo Small BAseline Subset (SBAS; Berardino et al., 2002) è una tecnica DInSAR avanzata, sviluppata presso il CNR-IREA, che consente di analizzare le caratteristiche spazio-temporali dei fenomeni deformativi rilevati mediante la generazione di mappe e serie temporali della deformazione superficiale. Esso

si basa su una opportuna combinazione di interferogrammi multi-temporali, ottenuti a partire da coppie di dati acquisiti da orbite sufficientemente vicine (la distanza tra le posizioni lungo l'orbita del satellite durante le due acquisizioni considerate prende il nome di baseline spaziale ed è indicata con "b", in Figura 4) e possibilmente con tempi di rivisitazione tra le acquisizioni non elevati (piccole baseline temporali); queste caratteristiche consentono di minimizzare gli effetti di rumore (denominati di decorrelazione spaziale e temporale; Zebker e Villasenor, 1992), incrementando pertanto il numero di punti per unità di area sui quali si riesce a fornire una misura affidabile della deformazione rilevata. Inoltre, tutte le misure di spostamento superficiale sono riferite ad un unico punto nello spazio, scelto in una zona ritenuta stabile, e ad un istante nel tempo, che tipicamente corrisponde alla prima acquisizione disponibile, e si riferiscono alla componente degli spostamenti superficiali rilevati, proiettata lungo la LOS del radar.

Un aspetto cruciale dell'approccio SBAS è quello di permettere analisi DInSAR delle deformazioni superficiali a due differenti scale spaziali, definite scala regionale (analisi a media risoluzione spaziale; Berardino et al., 2002; Pepe et al., 2005) e locale (analisi a piena risoluzione spaziale; Lanari et al., 2004; Bonano et al. 2012). L'analisi alla scala regionale permette di ricavare informazioni sugli spostamenti relativi ad aree che si estendono per alcune centinaia di migliaia di chilometri quadrati (risoluzione media spaziale che varia dai 30 ai 100 m, a seconda del tipo di dati SAR utilizzati), ed è particolarmente utile per analisi di fenomeni quali eventi sismici, vulcanici, subsidenze ed estrazione/stoccaggio di fluidi. L'analisi alla scala locale (analisi a piena risoluzione spaziale) consente di "zoomare", tipicamente in aree sensibili, sfruttando la piena risoluzione del sensore (da 3 a 10 m circa, a seconda del tipo di dati SAR utilizzato), al fine di rilevare pattern deformativi anche molto localizzati spazialmente (tipicamente alla scala di un singolo edificio o porzioni di esso) che mostrano uno spostamento relativo rispetto a quello medio del terreno.

Inoltre, è stato ampiamente verificato che la tecnica SBAS consente di ottenere mappe di velocità media e serie temporali di deformazione, con un'accuratezza di circa 1-2 mm/anno e 5-10 mm per quanto riguarda, rispettivamente, le misure di velocità media di deformazione e le singole misure di spostamento (Casu et al., 2006; Lanari et al, 2007; Bonano et al., 2013).

Recentemente, è stata poi sviluppata una versione parallela di tale tecnica, nota con l'acronimo di P-SBAS (Parallel SBAS; Casu et al., 2014; Manunta et al., 2019). P-SBAS sfrutta infrastrutture di calcolo High Performance Computing (HPC) (cluster, GRID, cloud computing), applicando tecniche di programmazione multi-core e multi-nodo; essa è, quindi, in grado di eseguire l'elaborazione di grandi moli di dati SAR abbattendo notevolmente i tempi di calcolo rispetto alla versione originale, sequenziale dell'approccio SBAS. La tecnica P-SBAS, sfruttando in modo efficiente infrastrutture di calcolo HPC, consente la realizzazione di servizi satellitari avanzati, basati sull'aggiornamento automatico delle serie temporali di deformazione quando nuove acquisizioni sono disponibili. Questo tipo di applicazione è particolarmente rilevante se utilizzata in combinazione con dati SAR della costellazione europea Sentinel-1 (S-1), la quale acquisisce sistematicamente

immagini SAR con piccole baseline spaziali (il tubo orbitale nominale ha un diametro non superiore ai 200 m), quindi intrinsecamente in linea con la logica dell'approccio SBAS, copertura quasi globale e con tempi di rivisitazione (interferometrica) tra i 6 ed i 24 giorni1 . Tale risultato, infatti, ricopre un'enorme rilevanza nell'utilizzo delle tecniche satellitari per il monitoraggio del territorio e per la gestione del rischio ambientale, in quanto consente di utilizzare la catena di elaborazione dei dati SAR non solo in ambito scientifico, ma anche in contesti sempre più operativi (fase di pre-allerta e/o in condizioni di emergenza) di monitoraggio dei fenomeni deformativi del suolo (di origine naturale o antropica), e di valutazione e mitigazione del rischio ad essi associato.

Analisi P-SBAS Sentinel-1: Orbite ascendenti e discendenti, periodo 06/2016-04/2025

L'analisi interferometrica relativa al territorio di interesse è stata effettuata applicando la tecnica precedentemente citata, denominata P- SBAS (Berardino et al., 2002; Casu et al., 2014; Manunta et al., 2019), a dati SAR acquisiti dalla costellazione S-1 lungo orbite ascendenti (Track 117) e discendenti (Track 95), nel periodo giugno 2016 – aprile 2025.

In particolare, sono stati utilizzati per l'orbita ascendente 443 dati, per un totale di 419 immagini, risultanti in 1174 interferogrammi differenziali analizzati; per l'orbita discendente sono stati utilizzati 806 dati, per un totale di 416 immagini risultanti in 1165 interferogrammi differenziali. In Figura 5 è mostrata la distribuzione delle immagini utilizzate, rappresentate in un piano con la data di acquisizione sull'asse delle ascisse e la componente perpendicolare alla LOS della baseline spaziale (denominata baseline perpendicolare) sull'asse delle ordinate, per l'orbita ascendente (Figura 5a) e discendente (Figura 5b), rispettivamente.

Si segnala alla fine del periodo analizzato un incremento delle baseline perpendicolari causato dalla degradazione dei sistemi di assetto del sensore Sentinel-1A. Gli interferogrammi analizzati sono, per costruzione, caratterizzati da valori limitati di baseline spaziale, come si evince dalla Figura 6a,b, dove ogni interferogramma è rappresentato dal segmento congiungente le due immagini di cui è composto. Ad essi è stato applicato un algoritmo per il filtraggio del rumore di decorrelazione relativo a interferogrammi differenziali, mediante l'utilizzo di reti interferometriche temporalmente ridondanti (Pepe et al. 2015). A partire da tali interferogrammi sono state generate le serie temporali di deformazione del suolo e le corrispondenti mappe di velocità media.

Per la generazione degli interferogrammi è stato utilizzato un DEM (Digital Elevation Model) SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) dell'area. Sia gli interferogrammi differenziali, sia le successive mappe

[1] Attualmente non è possibile effettuare analisi interferometriche ogni 6 giorni a causa del malfunzionamento di uno dei due sensori che compongono la costellazione S-1.

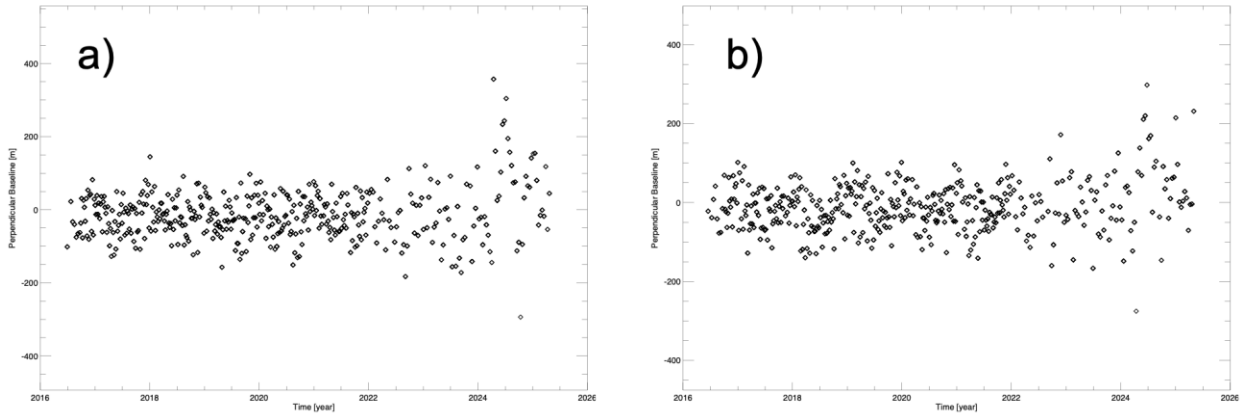


Figura 5: Distribuzione delle immagini SAR utilizzate per l'orbita ascendente (a) e per l'orbita discendente (b). Sull'asse delle ascisse è riportata la data di acquisizione, sull'asse delle ordinate la lunghezza della baseline perpendicolare.

e serie temporali di deformazione hanno una dimensione spaziale del pixel di circa 30 m x 30 m, ottenuta a valle di un'operazione di multilooking (media spaziale complessa).

I risultati dell'analisi interferometrica effettuata a media risoluzione spaziale (circa 30 m x 30 m) sono riportati in Figura 7a (analisi su orbita ascendente) e in Figura 7b (analisi su orbita discendente), dove sono mostrate (in falsi colori) le mappe geocodificate di velocità media dello spostamento, sovrapposte ad un'immagine ottica del territorio di interesse; si segnala che le mappe in falsi colori in Figura 7a,b si riferiscono esclusivamente ai pixel delle immagini SAR non significativamente affetti dal rumore di decorrelazione,

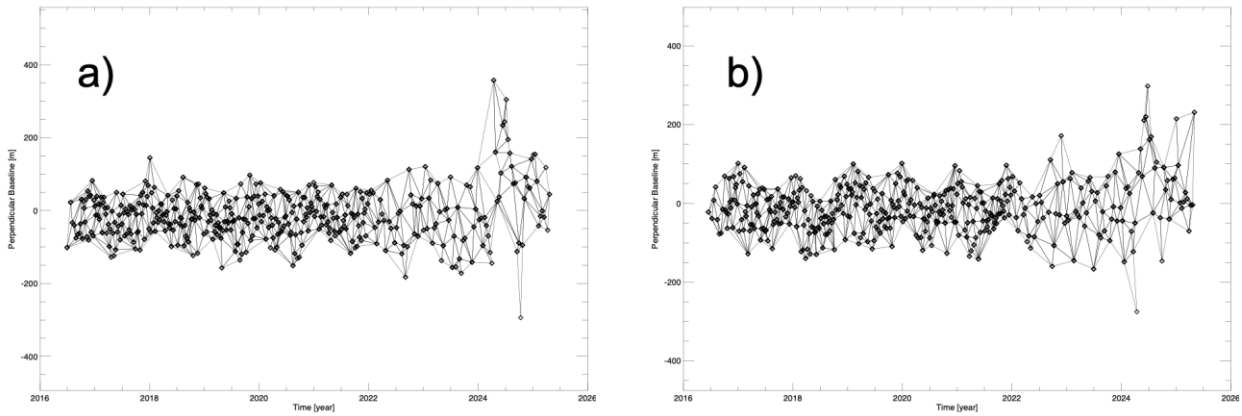


Figura 6: Distribuzione delle immagini SAR utilizzate per l'orbita ascendente (a) e per l'orbita discendente (b) e degli interferogrammi generati a partire da esse. Sull'asse delle ascisse è riportata la data di acquisizione, sull'asse delle ordinate la lunghezza della baseline perpendicolare. I segmenti congiungenti ogni coppia di immagini rappresentano le coppie interferometriche, corrispondenti agli interferogrammi analizzati.

denominati pixel coerenti. Inoltre, l'analisi DInSAR è stata effettuata rimuovendo eventuali componenti deformative a bassa frequenza spaziale, grazie all'uso di informazioni GNSS (Lanari et al. 2020). Dall'ispezione delle immagini presentate in Figura 5a,b risulta evidente che l'intero territorio analizzato non sia caratterizzato da significativi effetti deformativi, nella finestra temporale considerata.

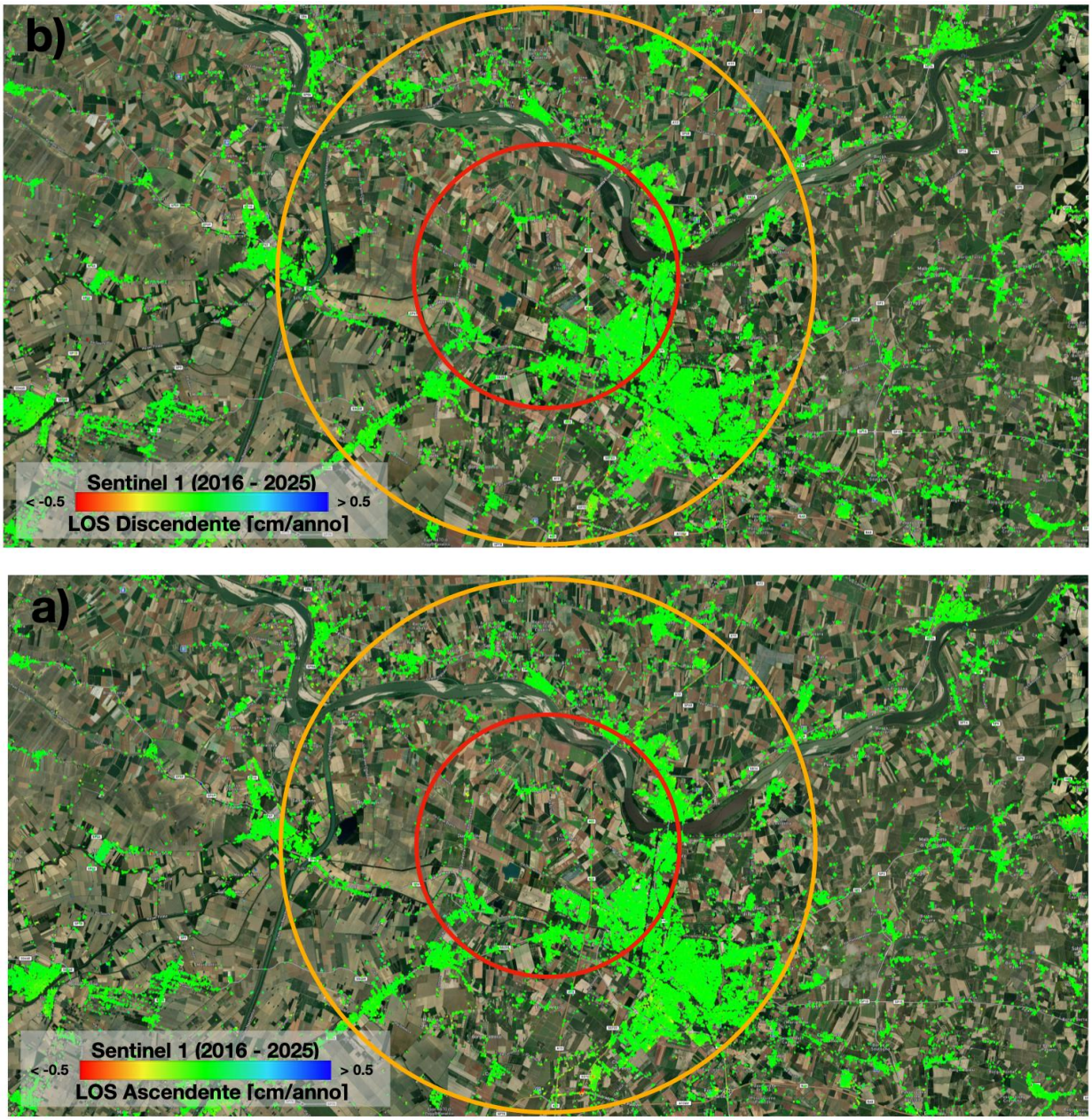


Figura 7: Mappe di velocità di deformazione lungo la LOS, dell'area relativa al sito di Casaglia, ottenute elaborando i dati Sentinel-1 acquisiti da orbite ascendenti (sopra) e discendenti (sotto) nel periodo Giugno 2016 – Aprile 2025 (vedi Figura 5). La circonferenza rossa rappresenta il dominio interno, quella arancione, il dominio esteso.

Ricostruzione delle componenti verticali ed Est-Ovest delle deformazioni

A partire dalle misure di deformazione relative alle LOS delle orbite di acquisizione ascendenti e discendenti dei sistemi Sentinel-1, mostrate rispettivamente in Figura 7a e Figura 7b, è possibile ricavare le componenti dello spostamento lungo le direzioni verticale ed Est-Ovest, fornendo così una più immediata comprensione degli effetti del fenomeno deformativo rilevato, sia esso di origine naturale o antropica. A tal riguardo, si sottolinea che è già presente in letteratura una metodologia, sviluppata anch'essa presso il CNR-IREA, che consente l'integrazione di serie temporali di deformazione SBAS-DInSAR relative alle LOS delle orbite ascendenti e discendenti (De Luca et al., 2017).

Tale algoritmo è completamente automatizzato e sviluppato, come nel caso della menzionata tecnica P-SBAS (Casu et al. 2014; Manunta et al., 2019), secondo logiche di calcolo parallelo, in modo da garantire efficienza e scalabilità su piattaforme di calcolo HPC (GRID e cloud computing), anche nel caso di grandi moli di dati SAR.

In Figura 8a,b, sono riportate le mappe di velocità di deformazione della zona di interesse, relative alle componenti verticali ed Est-Ovest, rispettivamente. In Figura 6 sono riportate le serie temporali di deformazione per sette pixel identificati in Figura 8, ritenuti rappresentativi della zona, relative alla componente verticale ed Est-Ovest. Si evince dall'analisi di Figura 9 che i pixel analizzati, escludendo l'ultimo, non presentano segnali di deformazione significativi, a conferma di quanto già mostrato nelle mappe di Figura 7 e 8. Specificatamente, i pixel analizzati sono relativi a:

- 1) centro della regione interessata (dominio interno), in corrispondenza della stazione FEM0;
- 2) centro della regione interessata (dominio interno), in corrispondenza della stazione di monitoraggio PON;
- 3) parte ovest del dominio interno, in corrispondenza della stazione di monitoraggio FOR;
- 4) parte ovest del dominio interno, nei pressi della stazione di monitoraggio ALB;
- 5) parte est del dominio interno, quartiere di Mizzana di Ferrara, Polo Chimico di Ferrara;
- 6) parte sud del dominio interno, nel centro abitato di Porotto, quartiere di Ferrara;
- 7) parte a sud, oltre il dominio interno, apparato industriale presso Chiesuol Del Fosso.

Si segnala che questo ultimo pixel viene analizzato a titolo di esempio poiché presenta una deformazione rilevante, anche se essa non è correlata con le attività geotermiche del sito di Casaglia, essendo molto localizzata (in corrispondenza di una struttura industriale) e significativamente distante da esso. Si nota inoltre che tale deformazione è quasi del tutto verticale, non presentando la componente Est-Ovest un significativo segnale di deformazione.

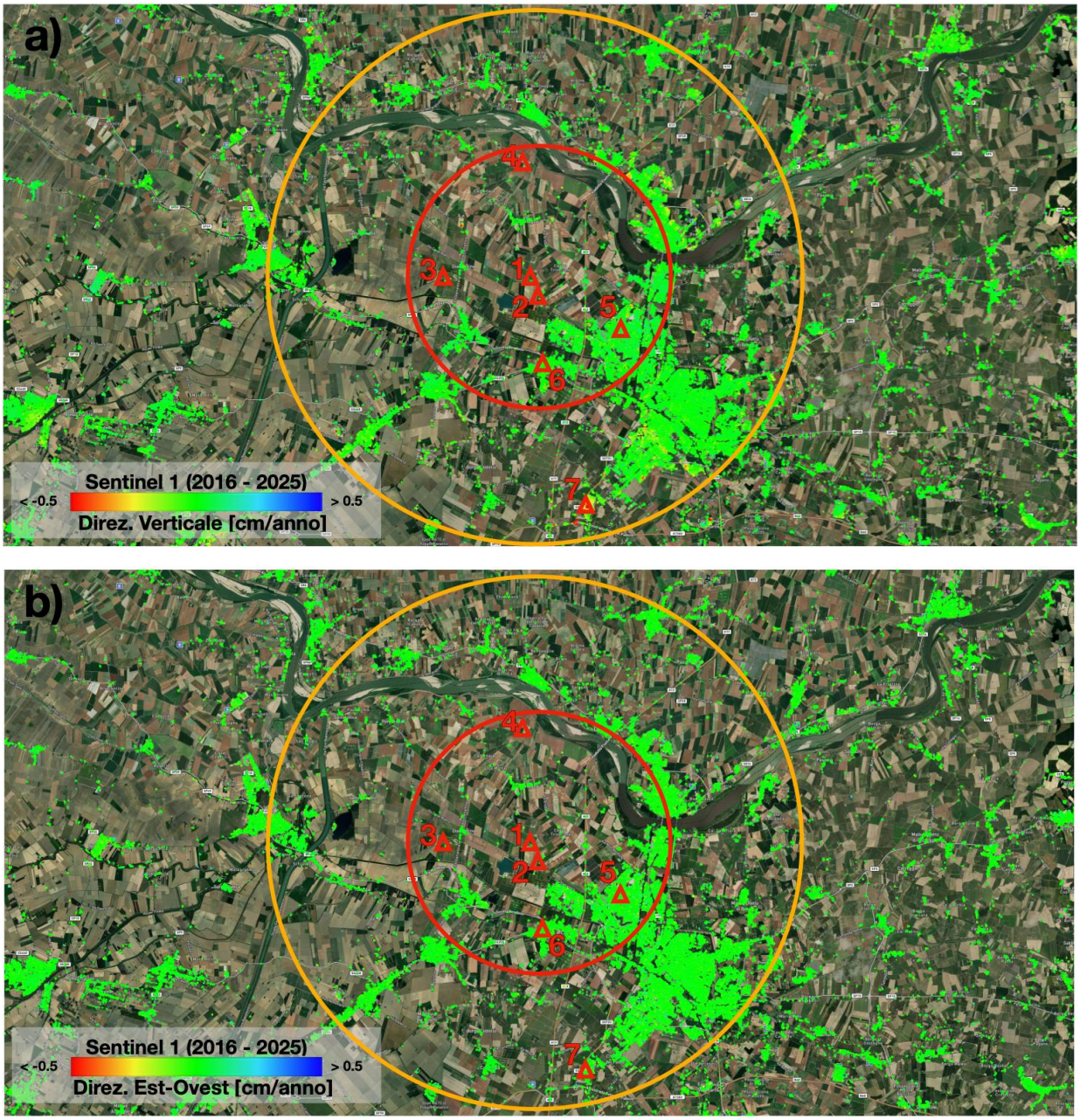


Figura 8: Mappe di velocità di deformazione lungo la componente verticale (a) e la componente Est-Ovest (b), ottenute a partire dai risultati presentati in Figura 7. I marker 1-7 e i corrispondenti triangoli rossi identificano i pixel le cui serie temporali di deformazione, per entrambe le componenti, sono riportate in Figura 9. Le circonferenze colorate rappresentano i domini interno ed esteso.

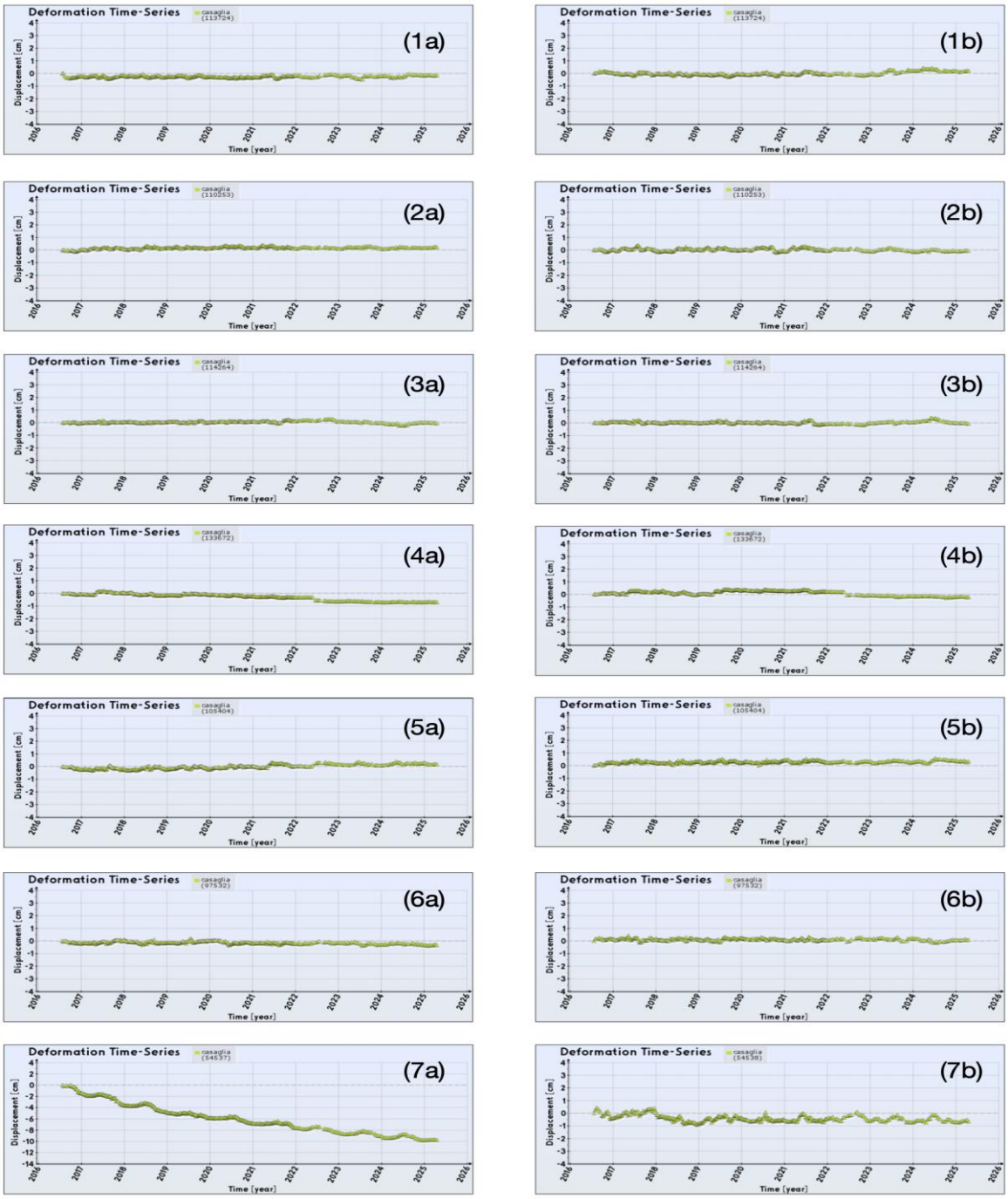


Figura 9: Serie temporali di deformazione relative alla componente verticale (grafici a sinistra) e alla componente Est-Ovest (grafici a destra), per i pixel indicati in Figura 8; in particolare: 1) tazione di monitoraggio FEM0; 2) stazione di monitoraggio PON; 3) stazione di monitoraggio FOR; 4) stazione di monitoraggio ALB; 5) Polo Chimico di Ferrara, quartiere Mizzana; 6) zona residenziale del Quartiere Porotto di Ferrara; 7) apparato industriale presso Chiesuol Del Fosso.

Stazione GNSS di Casaglia-FEM0 e di Pincara-FEM9

Tra dicembre 2024 e maggio 2025 sono stati affrontati, e solo alla fine del periodo risolti, alcuni problemi legati alla trasmissione giornaliera dei dati delle stazioni GNSS FEM0 di Casaglia (FE) e FEM9 di Pincara (RO) da parte di EGP.

Infatti, precedentemente i *files* GNSS giornalieri in formato RINEX venivano inviati con cadenza di circa una settimana da EGP direttamente al Dipartimento di Ingegneria tramite file compresso in un collegamento condiviso. Tale sistema provvisorio non permetteva un controllo continuo delle stazioni in quanto non consentiva l'avvio di una procedura automatica di elaborazione dati secondo uno schema a rete GNSS. Vista la necessità di implementare l'elaborazione automatica nell'ottica di un monitoraggio continuo, è stato necessario risolvere da parte del concessionario i problemi legati all'invio dei *files* RINEX dal *server* EGP al *server* del Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra, per poi procedere all'ulteriore trasferimento dati al *server* del Dipartimento di Ingegneria all'interno di UniFE. Nell'attesa di arrivare ad una procedura definitiva di invio dei *files* GNSS, la procedura di invio provvisoria, dopo la prima fase di test servita per valutare il processo di elaborazione, è stata interrotta, in quanto troppo onerosa e non prevista negli accordi.

Per quello che riguarda la stazione FEM0 di Casaglia (FE) l'invio regolare è iniziato in data 23/03/2025 (JDAY 082) con un *file* RINEX (1 epoca ogni 30") ogni 4 ore al *server* del Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra. A partire da quella data, nelle prime ore del giorno, il *server* del Dipartimento di Ingegneria preleva i *files* RINEX, li unisce in un unico *file* giornaliero e li elabora attraverso il *software* scientifico Bernese 5.2.

Per quello che riguarda la stazione FEM9 di Pincara (RO), dopo una prima fase di test con procedura di invio manuale da parte del concessionario dei *files* GNSS, ed elaborazioni test da parte del Dipartimento di Ingegneria, l'invio regolare, quindi con procedura automatica (sempre *files* ogni 4 h), è iniziata soltanto da pochi giorni (19 maggio); pertanto la procedura di unione ed elaborazione *files* della stazione GNSS FEM9 nella rete non è stata sostanzialmente ancora avviata.

Nel seguito quindi si illustrano le elaborazioni della sola stazione FEM0.

La procedura di calcolo delle coordinate di FEM0 utilizza il *software* scientifico Bernese nella versione 5.2 (prossimamente verrà implementata sulla versione 5.4); l'elaborazione avviene facendo uso dei prodotti forniti dal centro CODE (dell'*Astronomical Institute of the University of Bern*, AIUB): effemeridi (EPH_P), parametri di orientamento dell'asse di rotazione terrestre istantaneo (EOP, nel formato.ERP_P) e *file* della mappa ionosferica giornaliera (.ION).

Oltre alla stazione FEM0, nel calcolo vengono considerati anche i dati delle stazioni GNSS permanenti internazionali e nazionali inserite nel calcolo della Rete Dinamica Nazionale (RDN); le stazioni attualmente sono:

- GENO 12712M002
- GRAS 10002M006
- GRAZ 11001M002
- IENG 12724S001
- MATE 12734M008
- MEDI 12711M003
- NOT1 12717M004
- PADO 12750S001
- SOFI 11101M002
- WTZR 14201M010

L'elenco si completa con una serie di altre Stazioni Permanenti nei dintorni del sito di Casaglia tra cui la stazione GNSS UNFE appartenente alla rete TopNet Live della Topcon Italia con antenna installata sul tetto del Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Ferrara.

Il calcolo delle ambiguità viene svolto con la modalità *Quasi-Iono-Free* (QIF); le coordinate sono determinate in ITRS e successivamente, mediante roto-traslazione con variazione di scala, inquadrate nel sistema ETRF2000 (epoca 2008.0)-RDN (Rete Dinamica Nazionale) secondo quanto previsto dal D.M del 10/11/2011 "Adozione del Sistema di Riferimento Geodetico Nazionale".

Il calcolo viene eseguito processando i dati giornalieri disponibili, ottenendo così la relativa serie temporale in coordinate geocentriche X,Y,Z (trasformabili in coordinate geografiche, latitudine, longitudine e quota ellissoidica). Le serie temporali relative alle coordinate X, Y, Z per il periodo 19/09/24 – 21/05/25 (compreso il periodo in cui si è interrotta l'elaborazione provvisoria in attesa dell'invio automatico dei dati) sono illustrate sono illustrate in Figura 10.

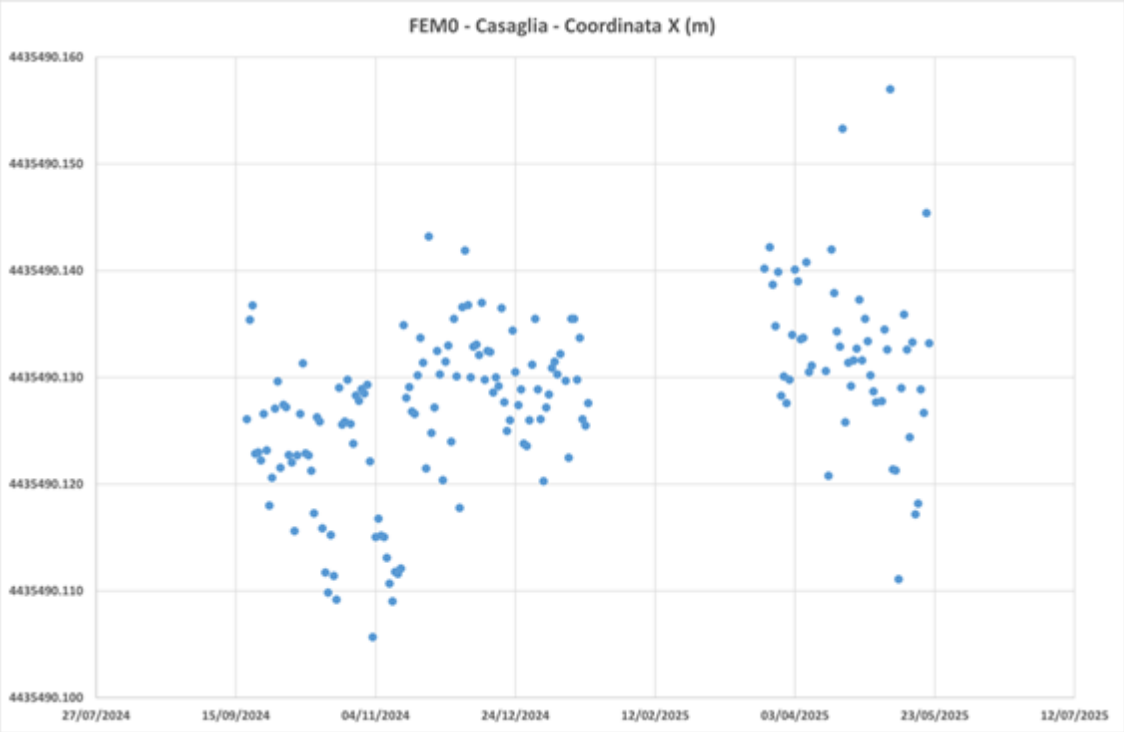
In Tabella 6 si riportano per le coordinate X,Y,Z valori medi, deviazioni standard, e *range*.

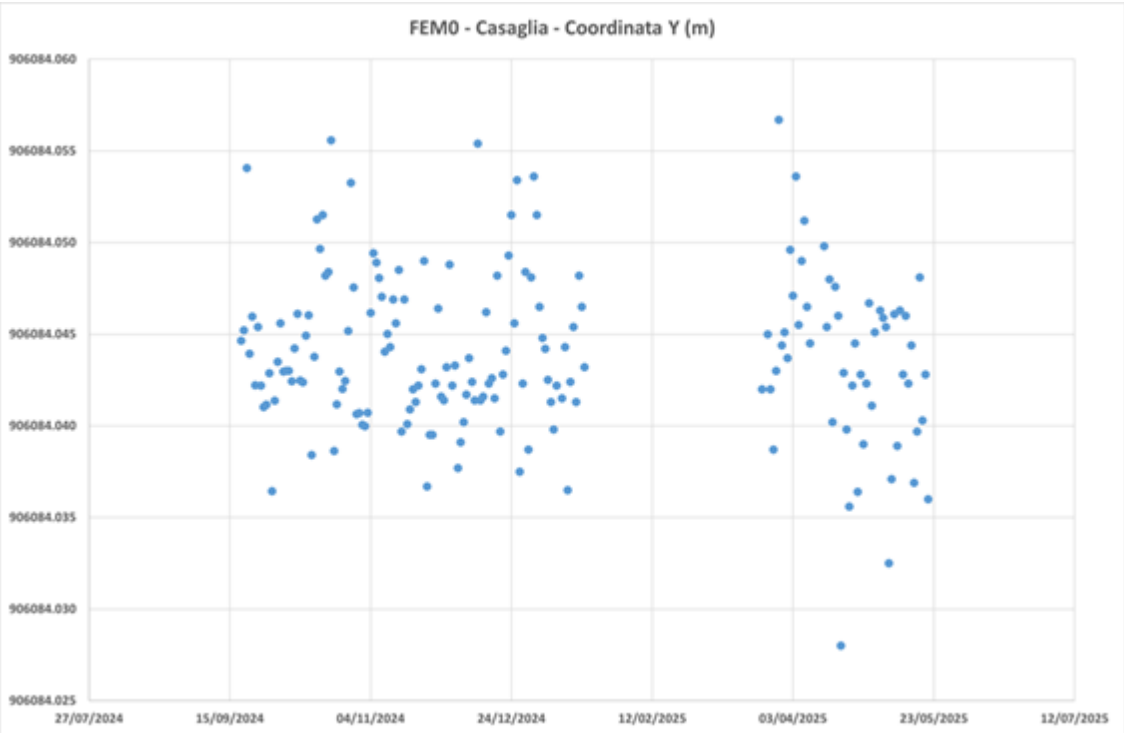
	X (m)	Y (m)	Z (m)
valore medio	4435490.128	906084.044	4477898.412
dev. standard	0.008 m	0.004 m	0.005 m
range (max-min)	0.051 m	0.029 m	0.026 m

Tabella 6: Coordinate X, Y, Z della stazione GNSS FEM0 ricavate nel periodo 19/09/24 – 21/05/25.

Si ritiene che questi risultati siano ancora da considerare come una prima fase del monitoraggio atta a determinare delle coordinate da utilizzare come riferimento iniziale per il monitoraggio definitivo e senza

soluzione di continuità. Per avere una elevata affidabilità delle coordinate iniziali si prevede che questa prima fase si completi con la fine del 2025.





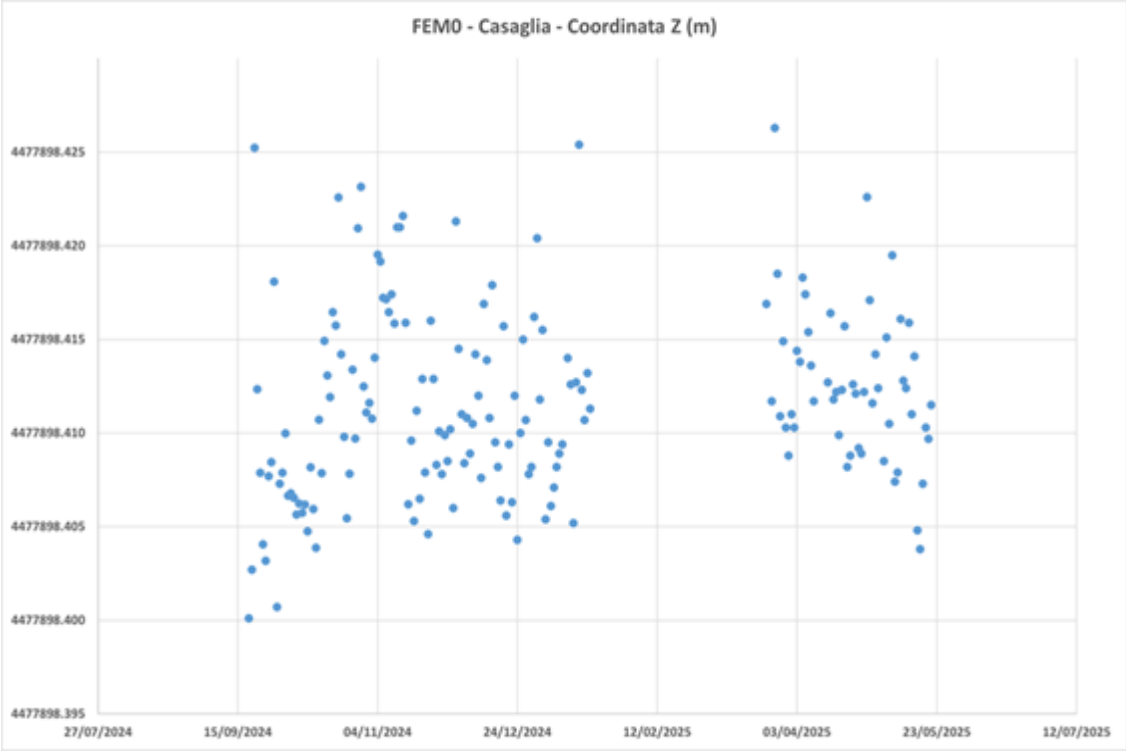


Figura 10: Andamento orario delle tre coordinate X, Y, Z della stazione GNSS FEM0 ricavate nel periodo 19/09/24 – 21/05/25.

3. Monitoraggio della pressione di poro

Le attività svolte dalla SPM per il monitoraggio della pressione di reiniezione nel pozzo geotermico Casaglia 1 (CAS01) sono state le seguenti:

a) Implementazione di un sistema di allerta per i dati di pressione, che verifica con cadenza oraria la corretta ricezione dei dati. In caso di mancato aggiornamento, il sistema invia automaticamente una notifica via e-mail al Concessionario e alla SPM. Successivamente, al ripristino della trasmissione, viene inviata una seconda notifica per segnalare l'avvenuta ripresa dell'invio dei dati. Il sistema è stato attivato a seguito dei test di trasmissione effettuati con il Concessionario.

b) Ricezione dei dati di pressione di reiniezione, forniti dal Concessionario in formato CSV, con cadenza oraria ed espressi in bar.

A seguito del precedente report, si fornisce un aggiornamento dei dati relativi alla pressione di reiniezione nel pozzo CAS01. I dati, registrati a testa pozzo e trasmessi con cadenza oraria, coprono il periodo dal 19 novembre 2024 al 23 maggio 2025.

È importante sottolineare che, nonostante le diverse interruzioni della trasmissione, la disponibilità dei dati è stata garantita grazie all'integrazione effettuata dal Concessionario su richiesta della SPM.

Il grafico in Figura 11 mostra le registrazioni della pressione di reiniezione nel pozzo geotermico CAS01, misurata a testa pozzo. I valori di pressione, espressi in bar, evidenziano l'evoluzione del sistema in relazione alle variazioni stagionali e operative dell'impianto.

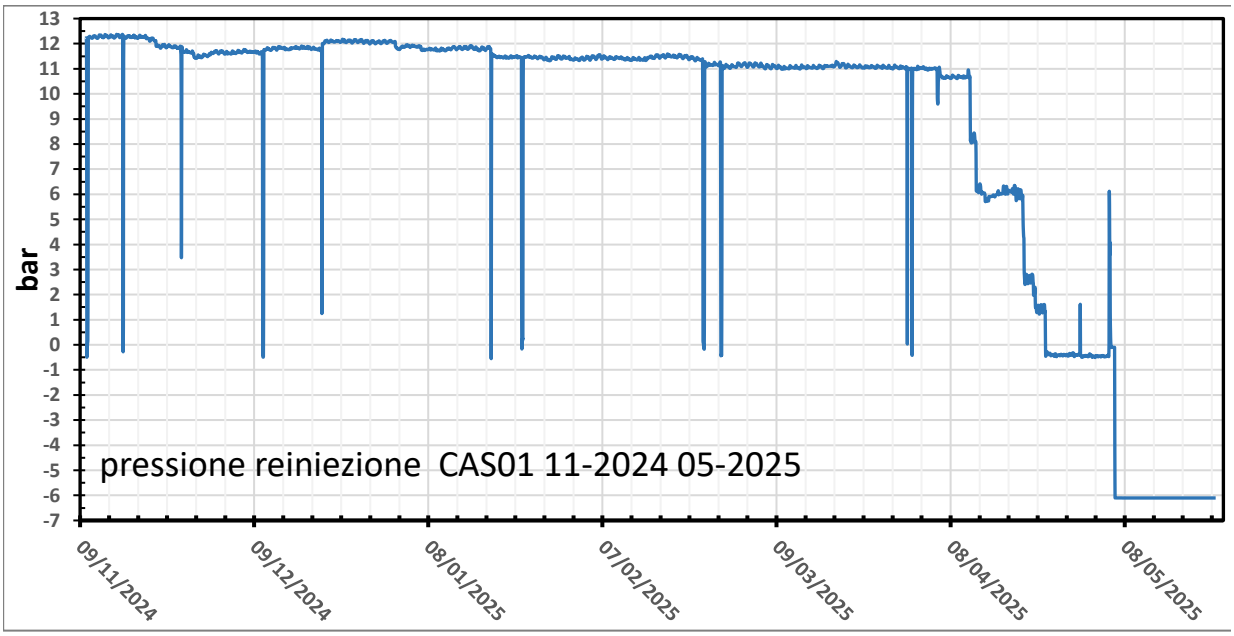


Figura 11: Il grafico mostra l'andamento della pressione di reiniezione nel pozzo geotermico CAS01, misurata a testa pozzo, dall'8 novembre 2024 fino al 23 maggio 2025. I dati sono presentati con una cadenza oraria, e la pressione è espressa in bar. I valori fortemente negativi dal 5 maggio non sono da considerarsi un dato reale di lettura della pressione di bocca pozzo poiché l'impianto è fuori esercizio.

Si possono osservare tre fasi distinte:

- Periodo di alta pressione operativa (novembre 2024 - inizio aprile 2025):

Dall'inizio del grafico (8 novembre 2024) fino ai primi giorni di aprile 2025, la pressione di reiniezione si mantiene costantemente elevata, oscillando prevalentemente tra circa 11 bar e 12.5 bar. Questo livello di pressione è coerente con quanto menzionato nel report precedente riguardo all'aumento della pressione a seguito dell'avvio del sistema di teleriscaldamento a servizio della città di Ferrara (che si diceva aver raggiunto un valore medio di poco maggiore di 12 bar a partire da ottobre). Durante questo periodo, si notano numerose e regolari cadute di pressione molto brevi e nette. Queste potrebbero essere indicative di a) brevi interruzioni o test programmati dell'impianto; b) eventuali perdite momentanee di segnale o artefatti nella trasmissione/registrazione dei dati; c) cicli operativi specifici dell'impianto.

- Periodo di riduzione della pressione (inizio aprile 2025 - fine aprile 2025):

A partire dal 6 aprile 2025, si osservano diverse fasi di marcata diminuzione della pressione di reiniezione che inizialmente passa da circa 11.5 bar a circa 7 bar e, successivamente, con gradini progressivi calo a circa 6 bar fino a circa 2.5 bar per arrivare a 0.5 bar verso il 20 aprile 2025. Questa significativa riduzione potrebbe essere correlata alla diminuzione del fabbisogno termico nell'impianto di teleriscaldamento e quindi alla progressiva riduzione di estrazione del fluido geotermico.

- Periodo di bassa/negativa pressione (fine aprile 2025 - maggio 2025):

Dalla fine di aprile 2025 e per tutto il periodo residuo mostrato nel grafico, la pressione si stabilizza su valori apparentemente negativi (intorno a -6 bar) non considerabili dati reali di lettura della pressione di bocca pozzo, in quanto l'impianto è fuori esercizio.

.

Riferimenti bibliografici

Berardino P., Fornaro G., Lanari R. and Sansosti E. (2002): A new algorithm for surface deformation monitoring based on Small Baseline Differential SAR Interferograms. *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, **40**, 2375-2383.

Bonano M., Manunta M., Marsella M. and Lanari R. (2012): Long term ERS/ENVISAT deformation time-series generation at full spatial resolution via the extended SBAS technique. *Int. J. Rem. Sens*., **33**(15), 4756-4783.

Bonano M., Manunta M., Pepe A., Paglia L. and Lanari R. (2013): From previous C-Band to new X-Band SAR systems: Assessment of the DInSAR mapping improvement for deformation time-series retrieval in urban areas, *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens*., **51**(4), 1973-1984.

Burgmann R., Rosen P.A. and Fielding E.J. (2000): Synthetic aperture radar interferometry to measure Earth's surface topography and its deformation. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, **28**, 169-209.

Casu F., Manzo M. and Lanari R. (2006): A quantitative assessment of the SBAS algorithm performance for surface deformation retrieval from DInSAR data. *Rem. Sens. Environ.*, **102**(3-4), 195-210.

Casu F., Elefante S., Imperatore P., Zinno I., Manunta M., De Luca C. and Lanari R. (2014): SBAS-DInSAR parallel processing for deformation time-series computation, *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Rem. Sens*., **7**(8), 3285-3296.

De Luca C., Zinno I., Manunta M., Lanari R. and Casu F. (2017): Large areas surface deformation analysis through a cloud computing P-SBAS approach for massive processing of DInSAR time series. *Rem. Sens. Environ.* **202**, 3-17.

Ferretti A., Fumagalli A., Novali F., Prati C., Rocca F. and Rucci A. (2011): A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens*., **49**, 3460-3470.

Ferretti A., Prati C. and Rocca F. (2000): Non-linear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens*., **38**, 2202-2212.

Gabriel A.K., Goldstein R.M. and Zebker H.A. (1989): Mapping small elevation changes over large areas: differential interferometry. *J. Geophys. Res*., **94**(B7), 9183-9191.

Hooper A. (2008): A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L16302.

Hooper A., Zebker H., Segall P. and Kampes B. (2004): A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophys. Res. Lett*., **31**(23).

Kampes B.M. (2006): *Radar Interferometry: Persistent Scatterer Technique*. Springer, Dordrecht, The Netherlands.

ILG14 (2014): Indirizzi e Linee Guida per il monitoraggio ella sismicità, delle deformazioni del suolo e delle pressioni di poro nell'ambito delle attività antropiche. 38 pp.

ILG16 (2016): Linee Guida per l'utilizzazione della risorsa geotermica a media e alta entalpia. 43 pp.

Lanari R., Mora O., Manunta M., Mallorquí J.J., Berardino P. and Sansosti E. (2004): A small baseline approach for investigating deformations on full resolution differential SAR interferograms. *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens*., **42**, 1377-1386.

Lanari R., Casu F., Manzo M. and Lundgren P. (2007): Application of the SBAS-DInSAR technique to fault creep: A case study of the Hayward fault, California. *Rem. Sens. Environ.*, **109**(1), 20-28.

Lanari R., Bonano M., Casu F., De Luca C., Manunta M., Manzo M., Onorato G. and Zinno I. (2020): Automatic generation of Sentinel-1 continental scale DInSAR deformation time series through an extended P-SBAS processing pipeline in a cloud computing environment. *Rem. Sens*., **12**, 2961.

Manunta M., De Luca C., Zinno I., Casu F., Manzo M., Bonano M., Fusco A., Pepe A.; Onorato G., Berardino P., De Martino P. and Lanari R. (2019): The parallel SBAS spproach for Sentinel-1 interferometric wide assoswath deformation time-series generation: algorithm description and products quality assessment, *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens*., **57**, .

Massonnet D. and Feigl K.L. (1998): Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Rev. Geophys*., **36**, 441-500.

Massonnet D., Rossi M., Carmona C., Adragna F., Peltzer G., Feigl K. and Rabaute T. (1993): The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, **364**(6433), 138-142.

Massonnet D., Briole P. and Arnaud A. (1995): Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry. *Nature*, **375**, 567–570.

Mora O., Mallorquí J.J. and Broquetas A. (2003): Linear and nonlinear terrain deformation maps from a reduced set of interferometric SAR images. *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens*., **41**, 2243-2253.

Peltzer G., and Rosen P.A. (1995): Surface displacement of the 17 May 1993 Eureka Valley earthquake observed by SAR interferometry. *Science*, **268**, 1333-1336.

Pepe A., Sansosti E., Berardino P. and Lanari R. (2005): On the generation of ERS/ENVISAT DInSAR time-series via the SBAS technique, *IEEE Geosci. Rem. Sens. Lett*., **2**(3), 265-269.

Pepe A., Yang Y., Manzo M. and Lanari R., (2015): Improved EMCF-SBAS processing chain based on advanced techniques for the noise-filtering and selection of small baseline multi-look DInSAR interferograms. *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens*., **53**(8), 4394-4417.

Rignot E. (1998): Fast recession of a west Antarctic glacier. *Science*, **281**, 549-551.

Tesauro M., Berardino P., Lanari R., Sansosti E., Fornaro G. and Franceschetti G. (2000): Urban subsidence inside the city of Napoli (Italy) observed by satellite radar interferometry. *Geophys. Res. Lett*., **27**(13), 1961-1964.

Zebker H.A. and Villasenor J. (1992): Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens*., **30**, 950-959.