

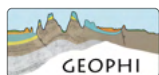
SUBSURFACE
GEOLOGY AND
GEOPHYSICS



**Analisi integrata delle misure di deformazione superficiale
allo scopo di analizzare i fenomeni di subsidenza dell'area
di San Potito - Cotignola
Aggiornamento al 30 settembre 2023**

Redatto da A. Ponza ed F. L. Guido
verificato da Vincenzo Picotti

Bologna 1 dicembre 2023



Indice

Executive Summary	3
1 Attività di stoccaggio dal 1 aprile al 30 settembre 2023	6
2 Analisi GPS, aggiornamento al 30 settembre 2023	9
2.1 Rete geodetica a doppia frequenza	9
2.1.1 Quality check	9
2.1.2 Analisi dei dati e stima delle posizioni	10
2.2 Rete geodetica a singola frequenza	18
2.2.1 Quality check	18
2.2.2 Analisi dei dati e stima degli spostamenti	20
3 Piezometri e assestimetri: relazioni con la piovosità	33
3.1 Piezometri	33
3.2 Assestimetri	36
4 Analisi Geophi sul dato SqueeSAR relativo ai Cluster della concessione San Potito - Coti- gnola	38
4.1 Analisi delle serie interferometriche sui Cluster B e C in relazione alla movimentazione di gas . .	38
4.2 Analisi delle serie interferometriche sul Cluster A in relazione alla movimentazione di gas	45
5 Relazione di tutto il sistema di monitoraggio con la movimentazione di gas	50
6 Conclusioni	58
Bibliografia	61

Executive Summary

Il presente report viene redatto ed inviato in ottemperanza alla prescrizione n.8 del documento di VIA n. 773 del 8 Ottobre 2007 di seguito riportata:

Prima dell'inizio dello stoccaggio, la Società proponente dovrà concordare con la Regione Emilia Romagna ed ARPA Ingegneria Ambientale il progetto di un sistema di monitoraggio della subsidenza costituito dall'integrazione di più tecniche:

- una stazione GPS permanente;
- una rete di livellazione - da misurarsi secondo le specifiche dell'alta precisione - che si configuri come rete di raffittimento rispetto alla Rete Regionale di Controllo della Subsidenza;
- monitoraggio satellitare tramite tecnica PSInSAR;
- realizzazione di due stazioni assestometriche a media profondità;
- monitoraggio dei livelli piezometrici tramite una rete di raffittimento della Rete Regionale di Controllo della Piezometria;

Pertanto, nel mese di giugno 2013 la società Edison Stoccaggio ha reso operativa presso l'impianto di stoccaggio di Cotignola una rete di monitoraggio atta a misurare le deformazioni superficiali del terreno tramite diversi strumenti, quali assestimetri, piezometri, stazioni GNSS (rete a doppia e a singola frequenza) e rete di livellazione geometrica di precisione, da utilizzare di concerto con dati di interferometria radar satellitare, relativi all'area di interesse, acquisiti dalla società TRE ALTAMIRA.

Il presente documento costituisce il ventiduesimo rapporto relativo all'analisi, all'interpretazione e all'integrazione tra le differenti tipologie di dati monitorati fino alla fine di settembre 2023, ai quali viene aggiunto a partire dal report 2019 - 2020, il dato GPS della rete geodetica a singola frequenza ottenuto da post-processing operato da Geophi. Il rapporto indaga le possibili relazioni tra la deformazione geodetica (osservazioni GPS, satellitari e rete di livellazione), le oscillazioni piezometriche, la compattazione/dilatazione registrata dagli assestimetri ed i volumi di gas movimentati, con lo scopo principale di provare a discriminare la componente di deformazione geodetica dovuta alla iniezione/estrazione di volumi definiti di gas nello stoccaggio.

A fine settembre 2023, la strumentazione installata presso l'impianto del Cluster-C continua ad essere funzionante. Da dicembre 22 le variazioni di pressione all'interno dell'acquifero profondo vengono registrate da un nuovo piezometro, finito di perforare a novembre 2022.

Complessivamente, nel semestre aprile - settembre 2023 sono stati iniettati ≈ 254.9 MSmc di gas.

Nel Cluster A sono stati iniettati ≈ 56.7 MSmc.

Nel Cluster B sono stati iniettati ≈ 29.4 MSmc.

Nel Cluster C sono stati iniettati ≈ 153.5 MSmc.

La strumentazione superficiale e intermedia (piezometro superficiale a - 11 m da p.c.; piezometro intermedio a - 67 m da p.c.; assestometro superficiale a - 11 m da p.c.) installata sul Cluster-C mostra variazioni legate alle dinamiche meteorologiche, senza evidenti effetti legati alla movimentazione di gas nel giacimento.

La strumentazione profonda (piezometro profondo installato a - 301 m da p.c. e assestometro profondo installato a - 351 m da p.c.) evidenzia trend legati alla compattazione della colonna stratigrafica. L'andamento dell'assestometro profondo continua a registrare una compattazione al ritmo di $\approx - 3.6$ mm/anno, con dinamiche di deformazione inversamente correlate in termini di tempo con le fasi di iniezione/erogazione, e non correlate in termini quantitativi: le deformazioni registrate hanno infatti ampiezze non proporzionali al quantitativo di gas in posto nel reservoir. Il nuovo piezometro profondo mostra, nell'ultimo semestre, oscillazioni della quota simili a quella del piezometro intermedio: ciò conferma la capacità dello strumento di rilevare le variazioni di pressione all'interno dell'acquifero.

Le misurazioni dello spostamento del suolo, condotte tramite il post-processing del segnale GPS sul Cluster-C (stazioni CLS2 e SP04) e tramite l'interferometria satellitare su tutta l'area della concessione, mostrano nel semestre di iniezione in esame un trend di sollevamento nell'area del Cluster-C e del Cluster-B. Presso il Cluster-A si registrano scarse deformazioni sul reservoir e non correlabili con l'attività di stoccaggio.

Gli spostamenti nella componente verticale di CLS2 e SP04 ($\approx + 13$ e $+ 36$ mm in media) mostrano andamento correlabile con l'iniezione cumulata tra aprile e settembre 2023, anche se, in generale, i valori delle oscillazioni non si discostano da quelli già osservati in conseguenza di fenomeni stagionali legati alle dinamiche del carico idrologico superficiale. Anche le componenti orizzontali di entrambe le serie si correlano con l'attività di stoccaggio, registrando uno spostamento orizzontale (≈ 6 mm e 11 mm verso Ovest) che "allontana" le stazioni CLS2 ed SP04 dal centro del Pool CC1.

Dal 21 novembre 2018 è attiva la stazione GNSS a doppia frequenza SP12 installata da Edison Stoccaggio in una zona considerata stabile, a nord del reservoir di San Potito, e sono attive le 10 stazioni rover a singola frequenza (SP-numero tra 1 e 15). SP12 è stata processata assieme a CLS2 nelle rete geodetica a doppia frequenza, inquadrata nel sistema di riferimento IGB14 ed utilizzata allo scopo di stazione base per la rete a singola frequenza del presente monitoraggio; ne vengono riportate la serie temporali delle posizioni e l'analisi di qualità del dato fino al 30 settembre 2023. La stazione può ormai dare risultati significativi dopo un periodo di registrazione di quasi 4.8 anni, lunghezza della serie temporale ritenuta sufficiente dalla comunità scientifica per ottenere una stima realistica delle velocità medie di spostamento attese localmente. Si riportano anche le

serie temporali di tutte le stazioni rover a singola frequenza, misurate relativamente a SP12 e successivamente corrette rispetto al moto di quest'ultima.

Sul Cluster-C, nell'ultimo semestre di iniezione, i dati di interferometria ben si correlano con i trend delle misurazioni GPS, sia per la sincronia con cui avvengono i cambi di tendenza, sia per l'entità degli spostamenti misurati. Le nuove serie temporali di interferometria, nella componente verticale disegnano una bolla di sollevamento all'interno del Cluster-C, con valori medi fino a +16 mm sopra il centro del giacimento. La componente est-ovest di spostamento dei bersagli radar evidenzia un "allontanamento" dei PS dal centro del Cluster-C (da ≈ 4 fino a 8 mm, a seconda della zona investigata).

I dati di deformazione del suolo sul Cluster-C evidenziano una correlazione tra i movimenti del terreno e la movimentazione di gas nel sottosuolo.

Sul Cluster-B, in concomitanza con l'attività di iniezione dell'ultimo semestre (aprile - settembre 2023), si osserva un'area in sollevamento con valori medi intorno a $\approx +4$ mm nella parte centrale del reservoir e con valori medi di $\approx +10$ mm, in una zona più a sud rispetto alla proiezione in superficie dei margini del reservoir. Al momento, non è ancora evidente una correlazione causa-effetto tra movimentazione del gas e deformazione. Negli ultimi semestri di monitoraggio, sia le componenti verticali che quelle orizzontali hanno evidenziato trend deformativi in fase con le attività di movimentazione di gas su questo cluster, a fronte di una attività di stoccaggio che rimane però invariata rispetto agli anni precedenti. Tuttavia le oscillazioni della superficie topografica, in alcune delle fasi di stoccaggio, "anticipano" le variazioni di volume di gas nel Cluster-B, con zone distali che si sollevano "prima" delle zone a ridosso dei pozzi.

Sul Cluster-A sono state evidenziate deformazioni geodetiche mediamente contenute entro i ≈ 4 mm (con massimi fino a +8 e - 6.5 mm), non correlabili con la fase di iniezione in esame, né in termini di tempo, né di distribuzione nello spazio, se non per un unico PS.

1 Attività di stoccaggio dal 1 aprile al 30 settembre 2023

Nella concessione di stoccaggio San Potito-Cotignola, nel semestre in esame (aprile - settembre 2023) sono stati iniettati complessivamente ≈ 239.6 Msmc, così suddivisi nei differenti cluster:

Cluster A

Iniezione di 56725544 Smc (≈ 56.72 MSmc) a partire dal 10 aprile 2023, con una media giornaliera di 324146 Smc/gg.

Cluster B

Iniezione di 29411363 Smc (≈ 29.41 MSmc) a partire dal 10 aprile 2023, con una media giornaliera di 168065 Smc/gg.

Cluster C

Iniezione di 153482215 Smc (≈ 153.48 MSmc) tra il 7 aprile ed il 29 giugno 2023, con una media di 1827169 Smc/gg (1.8 MSmc/gg).

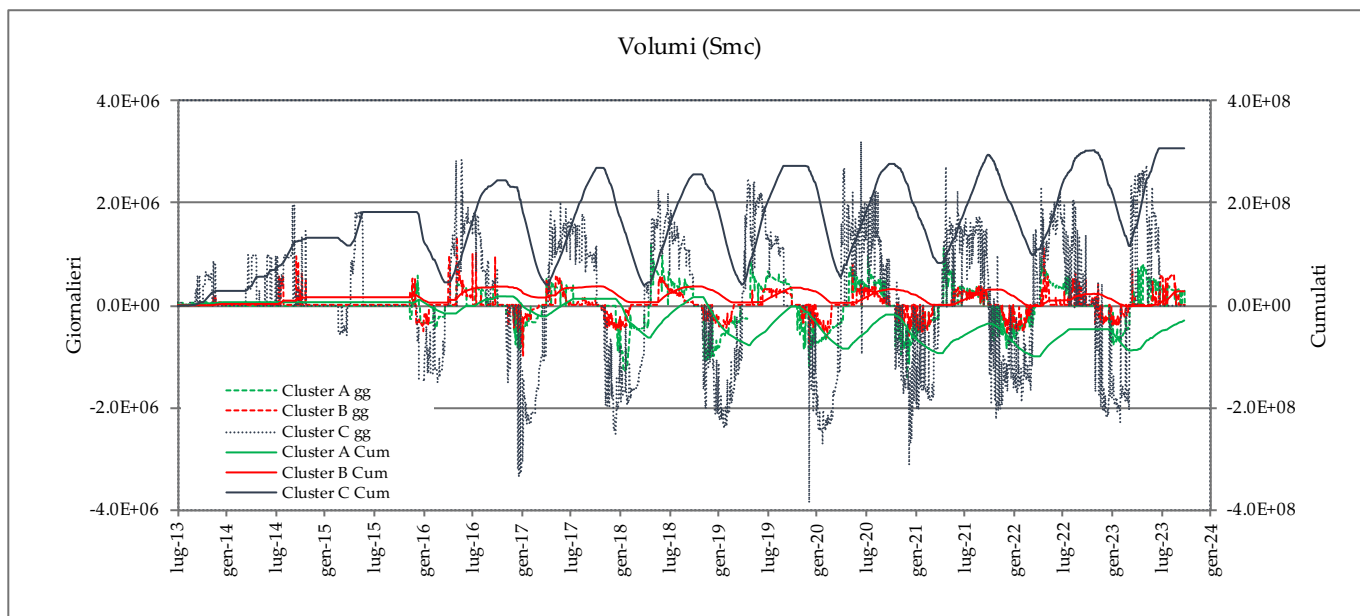


Figura 1.1: Movimentazione dei volumi di gas in metri cubi standard (Smc): valori giornalieri (linee tratteggiate) con ordinata a sinistra; valori cumulati (linee continue) con ordinata a destra.

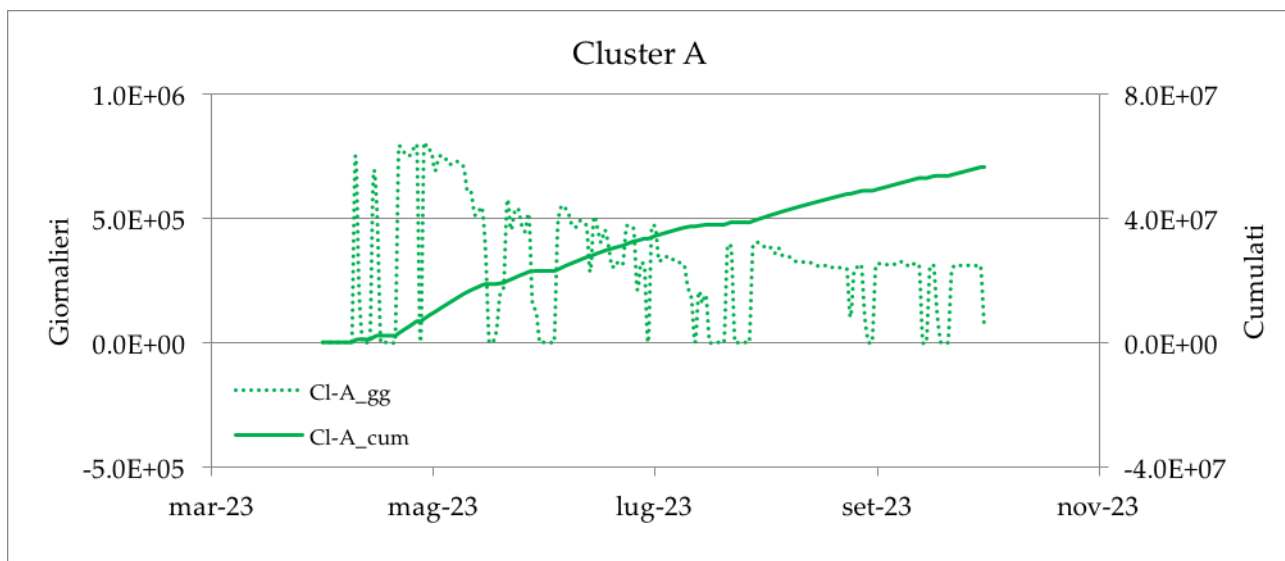


Figura 1.2: Cluster A. Movimentazione dei volumi di gas in metri cubi standard (Smc): valori giornalieri (linee tratteggiate) con ordinata a sinistra; valori cumulati (linee continue) con ordinata a destra.

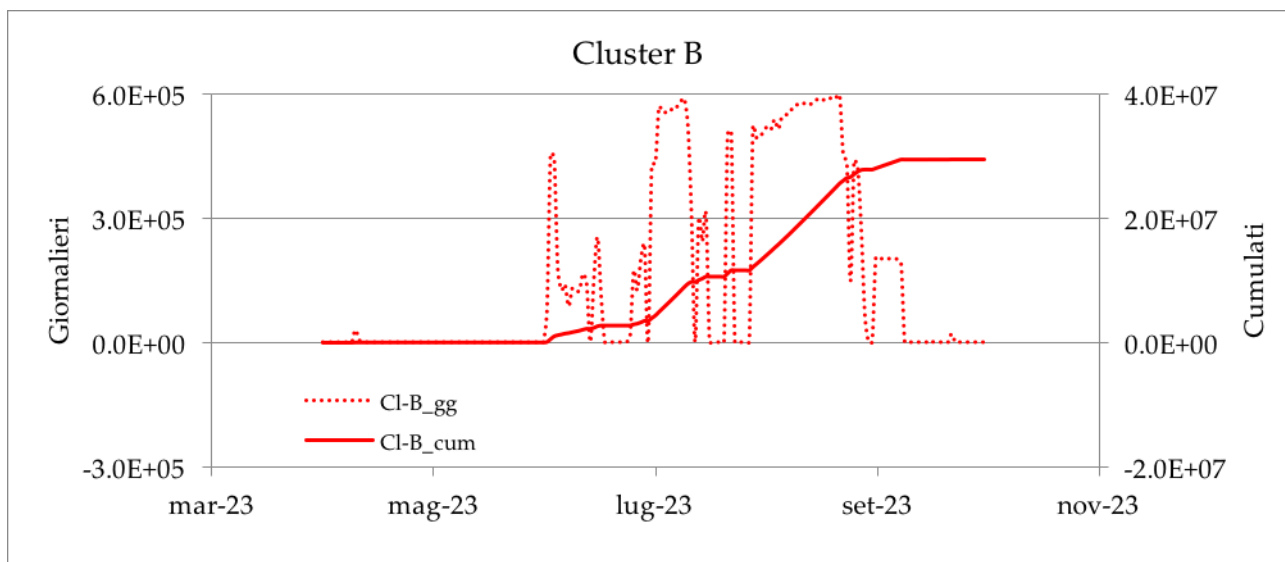


Figura 1.3: Cluster B. Movimentazione dei volumi di gas in metri cubi standard (Smc): valori giornalieri (linee tratteggiate) con ordinata a sinistra; valori cumulati (linee continue) con ordinata a destra.

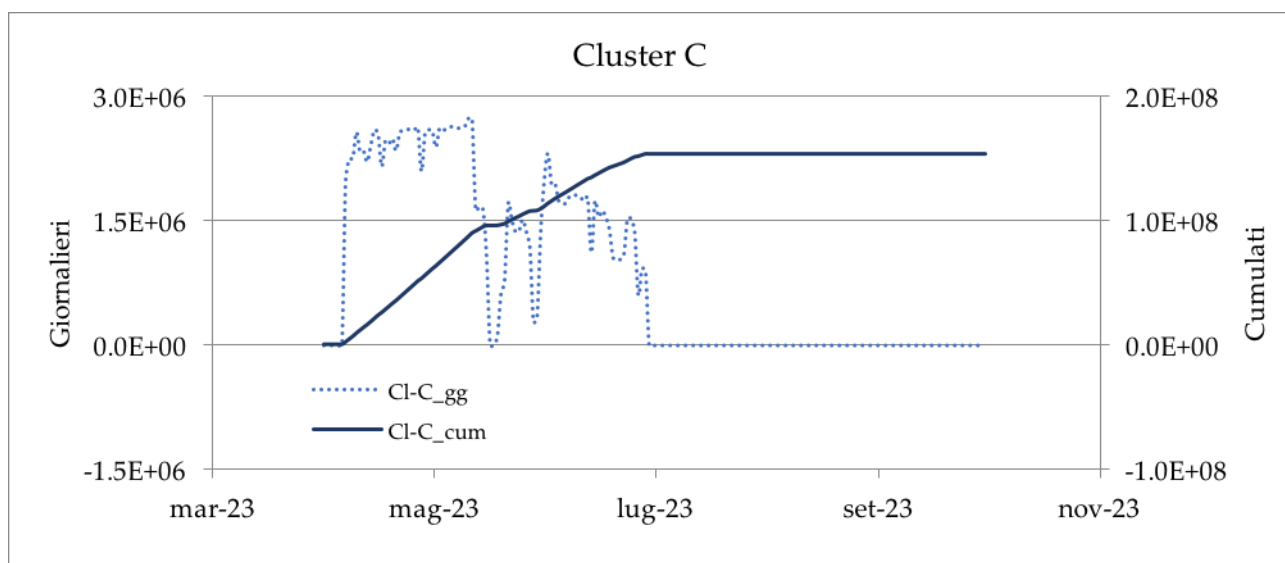


Figura 1.4: Cluster C. Movimentazione dei volumi di gas in metri cubi standard (Smc): valori giornalieri (linee tratteggiate) con ordinata a sinistra; valori cumulati (linee continue) con ordinata a destra.

2 Analisi GPS, aggiornamento al 30 settembre 2023

2.1 Rete geodetica a doppia frequenza

La serie temporale delle posizioni delle stazioni a doppia frequenza CLS2 ed SP12 è stata aggiornata attraverso l'analisi dei dati giornalieri fino alla data del 30 settembre 2023 (Day of Year 2023/273).

E' stata inoltre aggiornata la serie temporale degli indici di qualità (MP1, MP2) sia di CLS2, che di SP12, fino al doy 2023/273. Le serie temporali delle stazioni analizzate sono state determinate nel sistema di riferimento IGB14 (<http://igsb.jpl.nasa.gov/network/refframe.html>).

2.1.1 Quality check

I dati RINEX giornalieri delle 2 stazioni sono stati analizzati con il software TEQC (<http://facility.unavco.org/software/teqc>), che rappresenta uno standard internazionale per il trattamento in fase di pre-processamento di dati GPS e per la valutazione della loro qualità. A questo scopo, gli indici principalmente utilizzati sono i seguenti (in parentesi sono indicati i valori riscontrati su stazioni permanenti di buona qualità):

- MP1: root mean square (RMS) dato dai multipath sulla fase L1, ossia dovuto a riflessioni del segnale radio inviato dai satelliti che influiscono sul corretto calcolo della distanza satellite-ricevitore (0.1 - 0.5 m);
- MP2: RMS dato dai multipath sulla fase L2 (0.1 - 0.5 m);
- Cycle Slips (CS): salti di ciclo che occorrono quando il ricevitore perde il tracking dei satelliti in vista (0 - 5000 per intervalli di campionamento a 30 s).

Ricordiamo che prendendo come riferimento la rete IGS dell'International GNSS Service (<http://igsb.jpl.nasa.gov>), il 50% delle stazioni IGS ha valori di RMS per MP1 inferiori a 0.4 m e valori di MP2 inferiori a 0.6 m, mentre 2/3 delle stazioni ha valori di MP1 inferiori a 0.5 m e di MP2 inferiori a 0.75 m. Per quanto riguarda i Cycle Slips, più del 50% delle stazioni IGS ha valori inferiori a 5000 e inferiore a 1000 per almeno 2/3 delle stazioni IGS.

In Figura 2.1 è mostrato l'andamento nel tempo dei valori di MP1, MP2 e CS della stazione CLS2 fino al 30 settembre 2023. La serie temporale di oltre 10 anni mostra chiaramente come i parametri di MP1 e MP2 presentino un andamento stagionale, con valori più elevati nel periodo autunnale - invernale che si abbassano e stabilizzano in primavera - estate (seppur in presenza di qualche picco) in linea con i valori indicati dall'IGS per una stazione di buona qualità. Nel semestre in esame (aprile - settembre 2023), esclusi pochi picchi, i valori

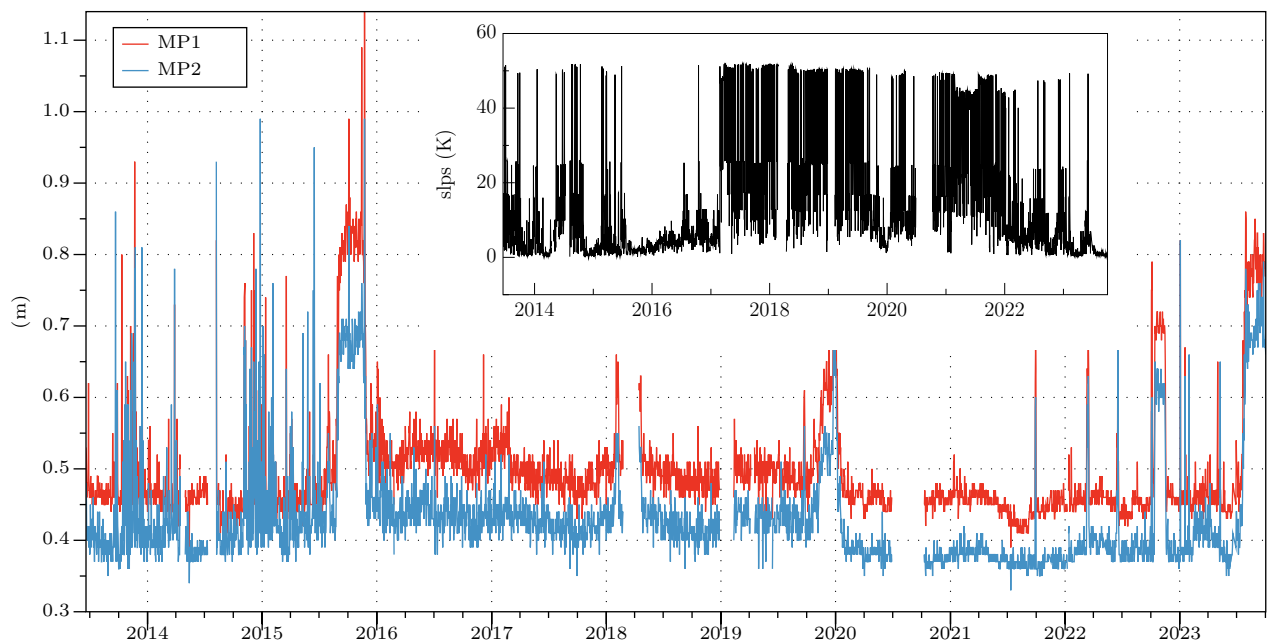


Figura 2.1: Andamento nel tempo dei valori di MP1, MP2 e numero di Cycle Slips della stazione CLS2 fino al 30 settembre 2023.

restano sempre al di sotto di 0.55 m e 0.45 m per MP1 e MP2 rispettivamente, fino a circa metà luglio, quando si ha un innalzamento dei valori di entrambi fino a 0.8 e 0.7, dovuto forse all'inizio di un cantiere nel piazzale del Cluster-C.

In Figura 2.2 è mostrato l'andamento dei valori di MP1, MP2 e CS della stazione SP12 durante il suoi primi 4.9 anni di acquisizione. I valori di multipath, in diminuzione fino ad aprile 2023 aumentano gradualmente fino a 0.7 m e 0.65 m (MP1 e MP2), mentre i valori di cycle slips sono mediamente al di sotto di 265, e in diminuzione a fine semestre.

2.1.2 Analisi dei dati e stima delle posizioni

A partire dal 22 novembre 2018 i dati RINEX giornalieri registrati dalle stazioni CLS2 e SP12 sono stati processati con il software scientifico GAMIT versione 10.71 (ultima release, Herring et al., 2010) assieme a quelli registrati da altre 30 stazioni (Fig. 2.3) afferenti a diverse reti GPS/GNSS permanenti in Emilia-Romagna, Italia settentrionale ed Europa, in questo caso al fine di ottenere informazioni relative a punti fuori dalla zona di subsidenza tettonica della Pianura Padana e dell'area pede-Appenninica, nota dalla letteratura scientifica più recente. Successivamente, le soluzioni giornaliere debolmente vincolate, ottenute con il software GAMIT, sono state inquadrate nel sistema di riferimento internazionale IGB14 attraverso il modulo GLOBK del software,

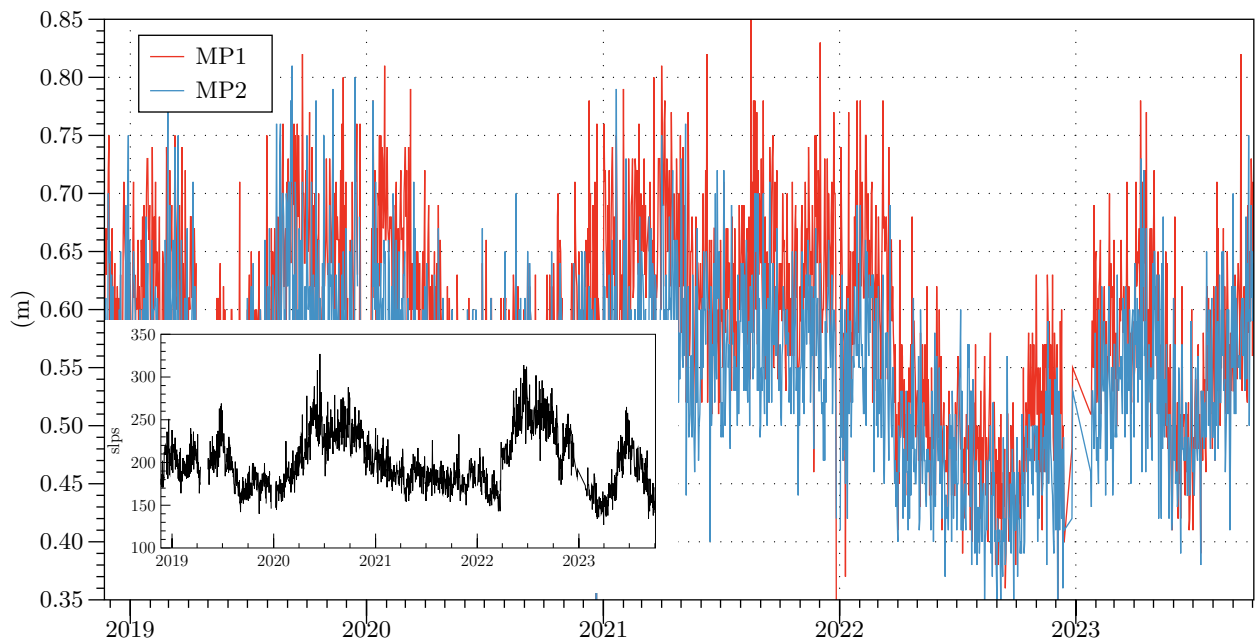


Figura 2.2: Andamento nel tempo dei valori di MP1, MP2 e numero di Cycle Slips della stazione SP12 fino al 30 settembre 2023.

utilizzando le stazioni di riferimento IGB14 incluse nella rete (ed es. NOT1, TRO1).

La rete risulta così strutturata con:

Stazioni GNSS disponibili entro una distanza di 15 - 60 km (Fig. 2.3 a)

- BRIS (Brisighella), BLGN (Bologna) e RSMN (Rep San Marino) della rete RING dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV);
- BOLG (Bologna), GARI (Porto Gabribaldi), MOPS (Modena), MEDI (Medicina) della rete internazionale EUREF (Regional Reference Frame sub-commission for Europe).
- PUN0 (Punta Marina Terme) stazione privata dello stabilimento termale, di cui Geophi analizza i dati per monitoraggio della subsidenza.

Stazioni della rete geodetica internazionale EUREF operative sul territorio italiano ed europeo (Fig 2.3 b)

- MATE (Matera, CS), NOT1 (Noto, CS), AJAC (Ajaccio, Corsica), GRAS (Caussols, Francia), EBRE (Roquetes, Spagna), ZIMM (Zimmerwald, Svizzera), GRAZ (Graz, Austria), WTZR (Baden, Germania), TRO1 (Tromsø, Norvegia, CS), MDVJ (Mendeleevo, Russia; CS), BUCU (Bucarest, Romania), SOFI (Sofia, Bulgaria).

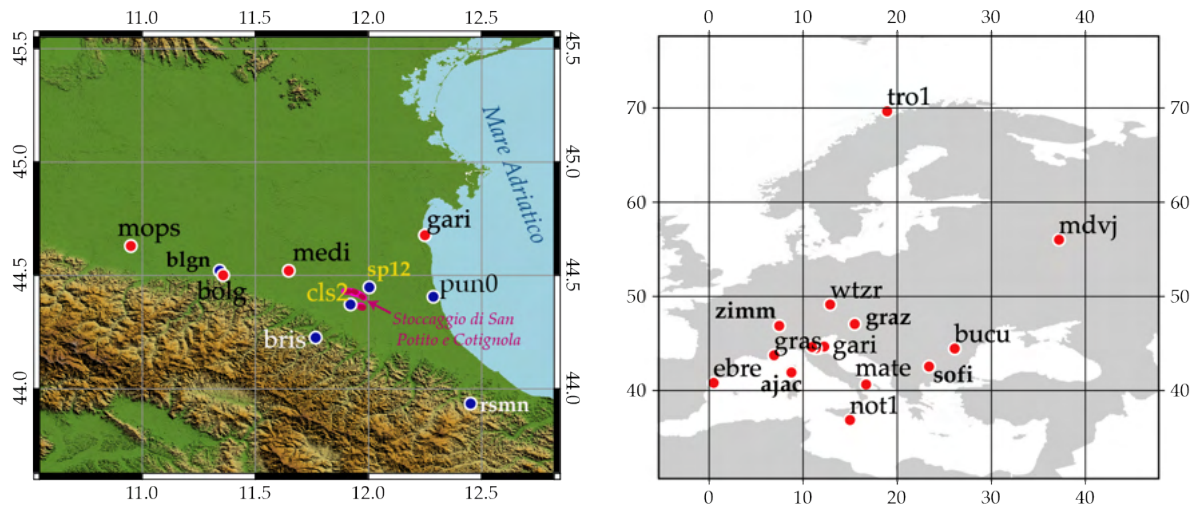


Figura 2.3: Mappa della rete geodetica utilizzata per il processing dei dati e per l'inquadramento nel sistema IGb14 di CLS2 e SP12. Fig. a): rete regionale di stazioni situate attorno al reservoir di San Potito e Cotignola: in rosso le stazioni di riferimento EUREF, in blu le stazioni delle reti RING in Emilia-Romagna. Fig b): stazioni di riferimento europee delle reti EUREF.

La nuova stima delle coordinate della stazione CLS2 nel sistema di riferimento IGb14, riportate al 30/09/2023 (decimal year 2023.745205), restituisce:

X: 4468302.83885 (m) Y: 943210.80849 (m) Z: 4437714.26876 (m)

Latitudine: N 44° 22' 16.463008" Longitudine: E 11° 55' 10.346951" Quota: 60.74966 (m)

Le figure 2.4 e 2.5 mostrano l'andamento delle posizioni nel tempo, per la componente est, nord e verticale della stazione CLS2, nel sistema di riferimento IGb14 (Fig. 2.4) e in un sistema di riferimento locale Adriatic-fixed (Fig. 2.5), in cui le posizioni orizzontali sono state ruotate utilizzando le coordinate e la velocità di rotazione di un polo di rotazione Euleriano per la microplacca Adriatica, determinato in un lavoro di Serpelloni et al. (2016) e definito da Lon. - 26.56° E., Lat. 61.95° N e velocità di rotazione 0.521°/Ma. Rispetto a questo sistema di riferimento locale si nota da gennaio 2016 l'inizio di una fase deformativa in cui le posizioni si discostano significativamente dal modello (lineare + stagionale). Di seguito sono riportate le ampiezze (e incertezze associate) delle componenti annuali e semi annuali (in mm) ottenute analizzando la serie temporale aggiornata al 30 settembre 2023:

- Ampiezza Annuale Est: 2.328 ± 0.041 mm; Nord: 1.697 ± 0.033 mm;
- Ampiezza Annuale Up: 3.982 ± 0.193 mm;
- Ampiezza Semi-Annuale Est: 0.349 ± 0.036 mm; Nord: 0.123 ± 0.048 mm;
- Ampiezza Semi-Annuale Up: 0.338 ± 0.186 mm.

CLS2 COTIGNOLA Edison Lon/Lat: 11.9195 44.3712

Time Span (yrs): 10.2876 N.Epochs: 3427 N.Obs: 3427

A - Sistema di riferimento IGb14

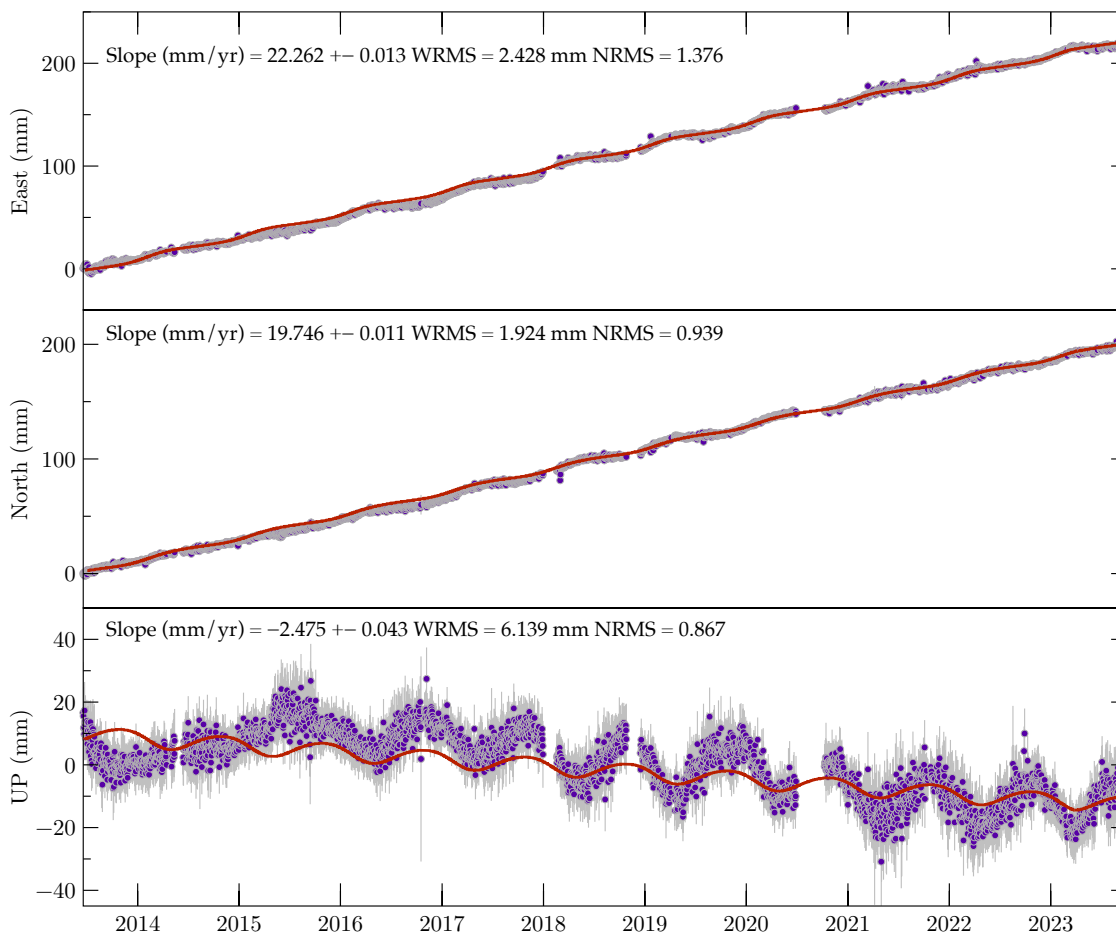


Figura 2.4: Serie temporale delle posizioni della stazione CLS2, aggiornata al 30 settembre 2023, nel sistema di riferimento IGb14. La linea arancio indica il modello ottenuto da una stima dell'andamento lineare e stagionale. Le linee grigie indicano le barre d'errore (2 sigma) delle posizioni giornaliere.

Le velocità stimate per le tre componenti, E, N e Up nel sistema di riferimento IGB14 analizzando la serie temporale aggiornata al 30 settembre 2023 sono (in mm/anno):

- Velocità Est: 22.262 ± 0.014 (mm/anno);
- Velocità Nord: 19.746 ± 0.011 (mm/anno);
- Velocità Verticale: -2.475 ± 0.043 (mm/anno).

Le incertezze (1 sigma) riportate nelle stime di velocità sono le incertezze formali, ottenute dall'analisi ai minimi quadrati assumendo che il rumore nella serie temporale sia solo di tipo gaussiano.

La stima delle coordinate della stazione SP12 nel sistema di riferimento IGB14, riportate al 30/09/2023 (decimal year 2023.745205), restituisce:

X: 4461144.55623 (m) Y: 948495.43712 (m) Z: 4443722.03986 (m)

Latitudine: N 44° 26' 49.432145" Longitudine: E 12° 0' 11.054269" Quota: 44.68167 (m) Di seguito sono riportate le ampiezze (e incertezze associate) delle componenti annuali e semi annuali (in mm) ottenute analizzando la serie temporale di SP12 aggiornata al 30 settembre 2023:

- Ampiezza Annuale Est: 3.669 ± 0.058 mm; Nord: 6.292 ± 0.070 mm;
- Ampiezza Annuale Up: 5.292 ± 0.271 mm;
- Ampiezza Semi-Annuale Est: 0.654 ± 0.074 mm; Nord: 1.023 ± 0.051 mm;
- Ampiezza Semi-Annuale Up: 1.346 ± 0.268 mm.

Le velocità stimate per le tre componenti, E, N e Up nel sistema di riferimento IGB14 analizzando la serie temporale aggiornata al 30 settembre 2023 sono (in mm/anno):

- Velocità Est: 24.564 ± 0.042 (mm/anno);
- Velocità Nord: 17.848 ± 0.049 (mm/anno);
- Velocità Verticale: -6.716 ± 0.152 (mm/anno).

Le incertezze (1 sigma) riportate nelle stime di velocità sono le incertezze formali, ottenute dall'analisi ai minimi quadrati assumendo che il rumore nella serie temporale sia solo di tipo gaussiano.

CLS2 COTIGNOLA Edison Lon/Lat: 11.9195 44.3712

Time Span (yrs): 10.2876 N.Epochs: 3427 N.Obs: 3427

B - Sistema di riferimento Adria-fixed

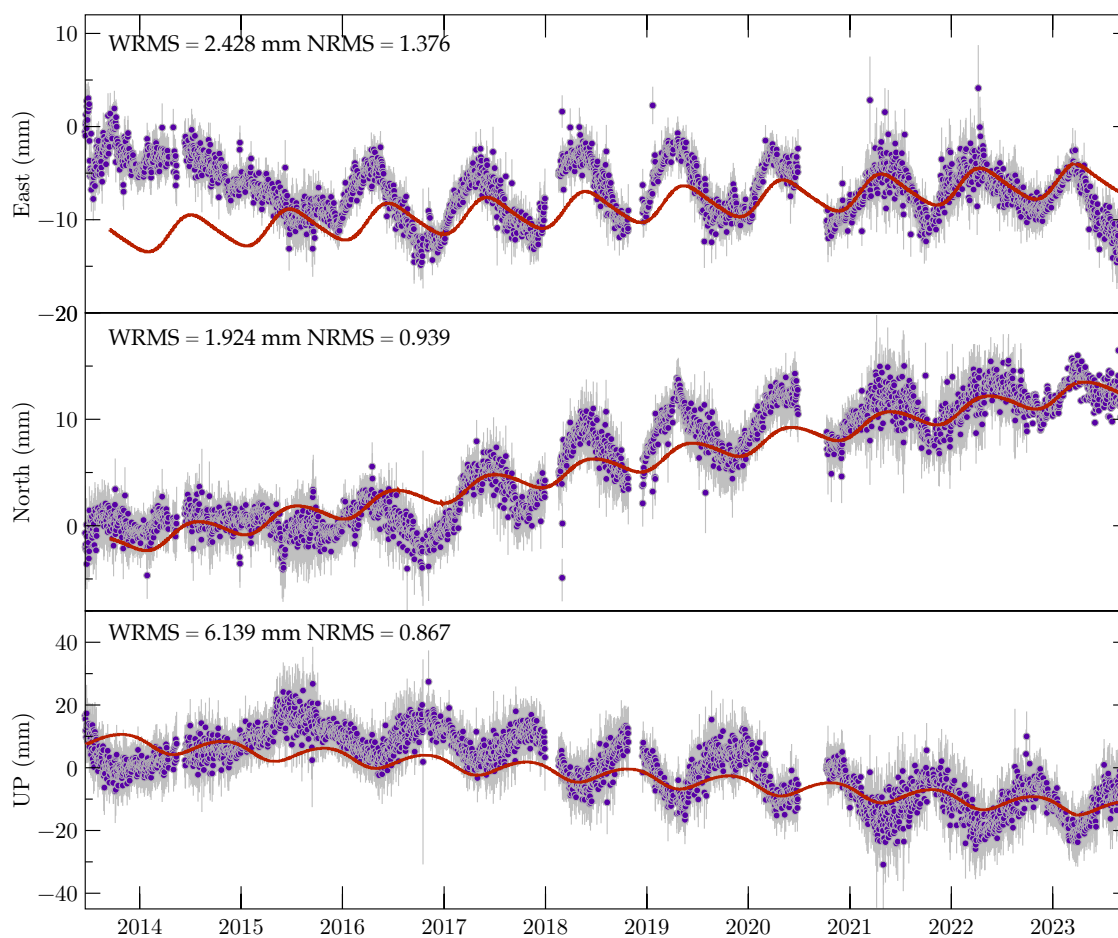


Figura 2.5: Serie temporale delle posizioni della stazione CLS2, aggiornata al 30 settembre 2023, in un sistema di riferimento locale Adria-fixed, ottenuto utilizzando il polo di rotazione della microplacca Adriatica determinato in Serpelloni et al. (2016).

SP12 SAN POTITO Edison Lon/Lat: 12.0031 44.4471

Time Span (yrs): 4.8575 N.Epochs: 1773 N.Obs: 1773

A - Sistema di riferimento IGb14

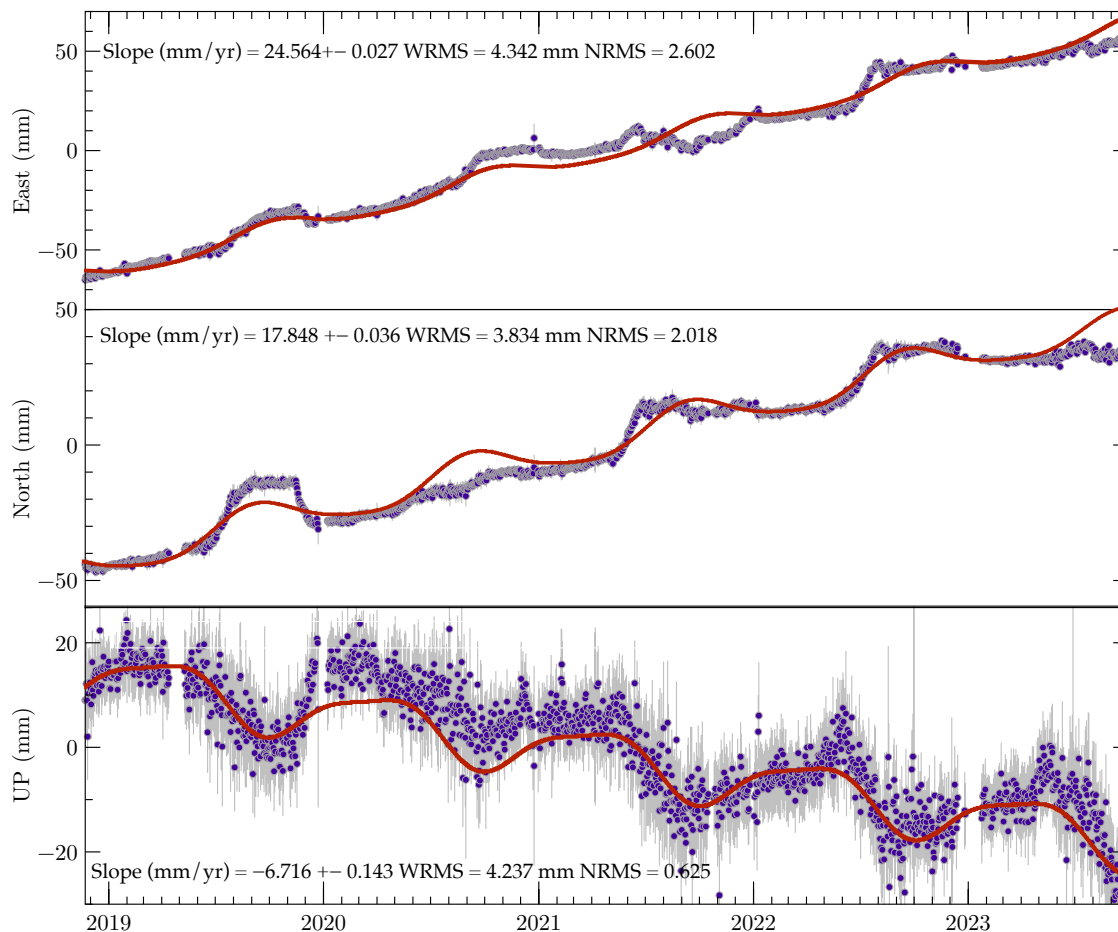


Figura 2.6: Serie temporale delle posizioni della stazione SP12, aggiornata al 30 settembre 2023, nel sistema di riferimento IGb14. La linea arancio indica il modello ottenuto da una stima dell'andamento lineare e stagionale. Le linee grigie indicano le barre d'errore (2 sigma) delle posizioni giornaliere.

SP12 SAN POTITO Edison Lon/Lat: 12.0031 44.4471

Time Span (yrs): 4.8575

N.Epochs: 1773

N.Obs: 1773

B - Sistema di riferimento Adria-fixed

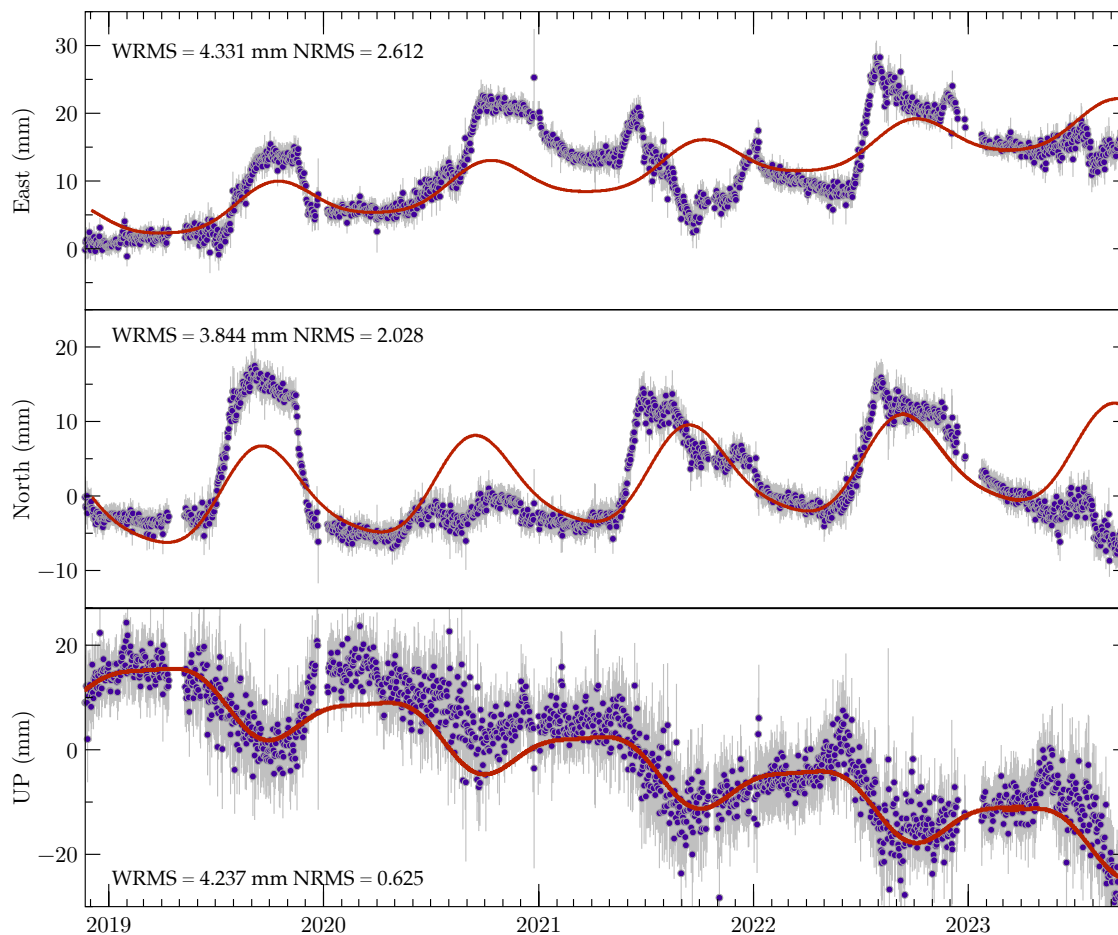


Figura 2.7: Serie temporale delle posizioni della stazione SP12, aggiornata al 30 settembre 2023, in un sistema di riferimento locale Adria-fixed, ottenuto utilizzando il polo di rotazione della microplacca Adriatica determinato in Serpelloni et al. (2016). Le linee grigie indicano le barre d'errore (2 sigma) delle posizioni giornaliere.

2.2 Rete geodetica a singola frequenza

La rete geodetica locale è costituita da 10 ricevitori GNSS a singola frequenza posizionati nell'intorno dei reservoir di San Potito e Cotignola, e dalle due 2 stazioni GNSS a doppia frequenza SP12 e CLS2, incluse anche nella rete a doppia frequenza descritta al paragrafo 2.1. Come mostrato nella mappa di figura 2.8, le lunghezze delle linee di base tra i ricevitori a singola frequenza e la stazione di riferimento SP12 variano dai 5.5 km di SP02 (la più vicina) ai ≈ 11 km di SP11. I ricevitori GNSS a singola frequenza sono assemblati a partire da schede U-BLOX NEO M8T e collegati ad antenne low cost MOBI GPS L1, per le quali non si effettua una calibrazione assoluta del centro di fase.

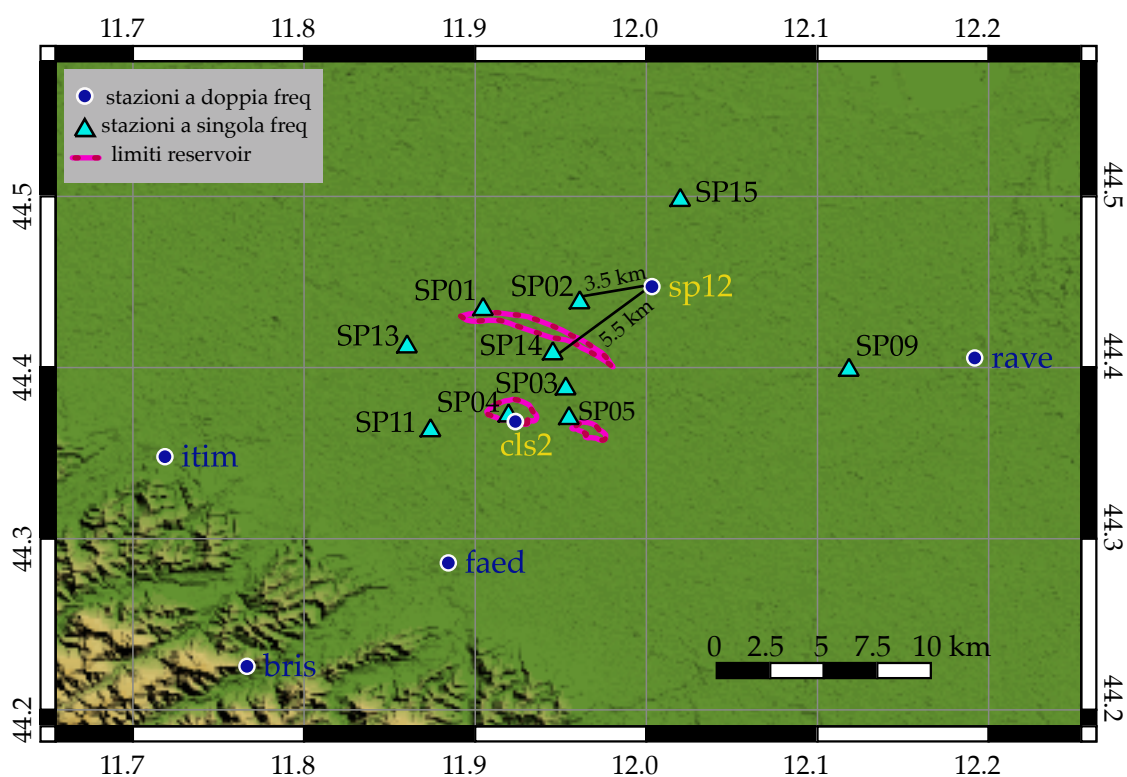


Figura 2.8: Mappa della rete a singola frequenza attorno ai reservoir di San Potito e Cotignola. In azzurro (triangoli) le stazioni Edison Stoccaggio a singola frequenza; in blu le stazioni Edison Stoccaggio a doppia frequenza CLS2 ed SP12 (etichetta gialla) e le stazioni regionali a doppia frequenza più vicine (etichetta blu).

2.2.1 Quality check

I dati RINEX giornalieri di ciascun ricevitore a singola frequenza sono stati analizzati con il software open source G-Nut/Anubis (<https://www.pecny.cz/Joomla25/index.php/gnss/sw/anubis>) sviluppato presso l'Osservatorio Geodetico Pecny (Dipartimento di Geodesia e Geodinamica del Research Institute of Geodesy, Car-

tography and Topography), in Repubblica Ceca (Václavovic and Douša, 2016.). G-Nut/Anubis è uno strumento da riga di comando in grado di analizzare dati da tutte le costellazioni GNSS disponibili e che fornisce un controllo quantitativo e qualitativo completo con il supporto dei messaggi di navigazione GNSS e/o dei prodotti dell'orbita SP3: per il dato RINEX giornaliero il software produce una serie di parametri utili quali indici di qualità (ad es. conteggio delle osservazioni, segnali, banda dei satelliti, salti di clock e cycle-slips, lacune nei dati e piccoli pezzi di dati). L'output di Anubis restituisce una riga di riepilogo generale per tutte le costellazioni osservate e righe di sommario per ciascun tipo di costellazione osservata. In tabella 2.1 viene riportato come esempio l'output relativo al ricevitore SP01 per un giorno di osservazione, con la riga di sommario generale e la riga di riepilogo relativa alla costellazione GPS utilizzata. All'indirizzo (<https://www.pecny.cz/Joomla25/index.php/gnss/sw/anubis/anubis-summary>) vengono riassunti e spiegati i significati dei parametri contenuti nella tabella. Dai risultati in tabella 2.1 si può comunque evincere come per i dati RINEX a singola frequenza si possano utilizzare come indice di qualità solo le percentuali tra dati attesi ed osservati. In tabella 2.2 vengono invece riassunti, per l'ultimo semestre di monitoraggio (dal 1 aprile

```
# G-Nut/Anubis [2.2.4] compiled: Feb 13 2020 12:11:47 ($Rev: 2554 $)

#==== Summary statistics (v.3)
#TOTSUM First_Epoch_____ Last_Epoch_____ Hours_Sample MinEle #_Expt #_Have %Ratio o/slps woElev Exp>10 Hav>10 %Rt>10
=TOTSUM 2020-01-04 00:00:00 2020-01-04 23:59:30 23.98 30.00 0.00 30804 28132 91.33 28132 168 24301 24167 99.45

#GNSSUM 2020-01-04 00:00:00 Epoch_Statistics_ Excl_Epochs&Satellites_ CycleSlips/Interruptions_And_Other_Discontinuities Code_Multipath_Me
an_Statistics_Over_All_Signals
#GNSSUM 2020-01-04 00:00:00 ExpEp HavEp UseEp xCoEp xPhEp xCoSv xPhSv csAll csEpo csSat csSig nSlp nJmp nGap nPcs mp1 mp2 mp3
mpx mp5 mp6 mp7 mp8
=GPSUM 2020-01-04 00:00:00 2880 2877 0 2877 2877 28132 28132 169 22 147 0 0 0 0 0 - - -

#GNSxxx 2020-01-04 00:00:00 nSat ExpObs HavObs %Ratio Exp>10 Hav>10 %Rt>10 wo/Ele Ele>0 Ele>5 Ele>10 Ele>15 Ele>20 Ele>30 Ele>50 Ele>70
=GPS01 2020-01-04 00:00:00 30 30804 28132 91.33 24301 24167 99.45 168 27964 26609 24018 21336 18873 14551 7606 2583
=GPSL1 2020-01-04 00:00:00 30 30804 28132 91.33 24301 24167 99.45 168 27964 26609 24018 21336 18873 14551 7606 2583
=GPSD1 2020-01-04 00:00:00 30 30804 28132 91.33 24301 24167 99.45 168 27964 26609 24018 21336 18873 14551 7606 2583
=GPSS1 2020-01-04 00:00:00 30 30804 28132 91.33 24301 24167 99.45 168 27964 26609 24018 21336 18873 14551 7606 2583
```

Tabella 2.1 - Output di esempio di un file di sommario prodotto dal software G.Nut/Anubis relativo ad un RINEX giornaliero della stazione SP01.

al 30 settembre 2023), il numero di sessioni giornaliere processate per ciascuna stazione, il rapporto tra sessioni processate e attese, il rapporto tra sessioni in cui il software è riuscito a risolvere l'ambiguità, rispetto alle sessioni processate; nell'ultima colonna viene fornito il numero di valori anomali (outliers) che ricadono al di fuori dell'intervallo $\pm 3\sigma$ (corrispondenti ad un livello di confidenza del 99%) rispetto alla regressione locale (o regressione mobile) LOESS (*locally estimated scatterplot smoothing*) con finestra di campionamento ad un mese utilizzata per fare il fit delle serie temporali di spostamento. Va segnalato che il numero di dati processati risulta diminuito rispetto alla norma a causa della mancanza del dato di SP12, la stazione di riferimento a doppia frequenza, nell'intervallo 28/12/22 - 24/01/23, dovuta ad un malfunzionamento nella sistema di accensione automatica dello strumento dopo lo spegnimento accidentale.

Stazione	Obs attese	Obs proc	% proc/att	ambfix	% fix/proc	outl rimossi
SP01	183	159	86.89%	157	98.74%	5
SP02	183	183	100.00%	179	97.81%	5
SP03	183	178	97.27%	174	97.75%	4
SP04	183	183	100.00%	178	97.27%	9
SP05	183	183	100.00%	180	98.36%	7
SP09	183	158	86.34%	151	95.57%	2
SP11	183	183	100.00%	180	98.36%	5
SP13	183	183	100.00%	180	98.36%	4
SP14	183	183	100.00%	179	97.81%	7
SP15	183	183	100.00%	166	90.71%	10

Tabella 2.1 - Confronto tra dati attesi e processati e tra dati processati e ad ambiguità risolta per le stazioni della rete a singola frequenza di San Potito e Cotignola nel semestre di monitoraggio aprile - settembre 2023.

2.2.2 Analisi dei dati e stima degli spostamenti

I dati RINEX giornalieri dei ricevitori a singola frequenza e dei 2 ricevitori a doppia frequenza SP12, il ricevitore utilizzato come base "stabile", e CLS2 sono stati processati in modalità L1 baseline con il software GAMIT/GLOBK (release 10.71, della precedente 10.70, Herring et al., 2010): le posizioni giornaliere di tutte le stazioni (inclusa CLS2) sono state vincolate a 1 cm relativamente alla posizione di SP12, le cui coordinate a-priori, precedentemente stimate attraverso le soluzioni della rete a doppia frequenza inquadrata nel sistema di riferimento IGB14, sono qui state considerate con velocità di spostamento pari a zero. Il moto di SP12, essendo già stato determinato, non è infatti di interesse e può essere assunto pari a zero al fine di non introdurre errori nelle linee di base all'interno della rete locale implementata attorno ai due giacimenti di gas. Inoltre, impostando a zero la velocità per tutte le stazioni nella soluzione, qualsiasi movimento "assoluto" dovuto al moto delle placche diviene comune all'intera rete e non influisce sulla soluzione.

L'operazione sopra descritta consente dunque di:

- operare in un sistema di riferimento locale, senza che gli errori "assoluti" di posizionamento si propaghino significativamente tra le posizioni relative utili per lo studio della rete a singola frequenza;
- inquadrare allo stesso tempo tutta la rete locale nel sistema di riferimento internazionale IGB14, poiché la posizione di SP12, e la sua variazione nel tempo, sono già state determinate in precedenza (analisi e soluzioni della rete a doppia frequenza);
- escludere dalla soluzione di ciascuna stazione la componente di moto assoluto (tettonico).

Le soluzioni giornaliere debolmente vincolate, ottenute con il modulo GAMIT del software, sono state ulteriormente ristrette rispetto alla posizione di SP12 utilizzando il modulo GLOBK del software, vincolando ad 1 mm (rispetto alle proprie coordinate a priori ottenute dalla soluzione a doppia frequenza) la posizione di SP12, rispetto alla quale le posizioni delle altre stazioni sono state calcolate nelle componenti locali Nord, Est e Up, attraverso procedure di sola traslazione in x, y, e z. Le serie temporali così ottenute descrivono dunque lo spostamento nel tempo delle stazioni a singola frequenza lungo le 3 componenti N, E ed UP rispetto a SP12. Gli errori associati alle misure della rete locale hanno valori minimi di $\approx \pm 1.5$ mm con massimi fino ± 5.5 mm, che aumentano in maniera proporzionale alla lunghezza della linea di base tra le varie stazioni e SP12.

Dalle serie temporali sono stati rimossi valori anomali (outliers) che ricadono al di fuori dell'intervallo $\pm 3\sigma$ (corrispondenti ad un livello di confidenza del 99%) rispetto alla regressione locale (o regressione mobile) LOESS (*locally estimated scatterplot smoothing*) con finestra di campionamento ad un mese. Tali valori coincidono in prevalenza con giorni in cui i dati delle stazioni risultano essere incompleti.

Il dato che viene presentato nelle figure che seguono corrisponde alle serie temporali delle stazioni a singola frequenza dalle quali sono poi stati rimossi gli spostamenti di SP12 calcolato in un sistema di riferimento Adria fixed (si veda par. 2.1.2, pp. 17), e dalle quali sono stati anche rimossi gli outliers secondo il criterio appena esposto. La somma degli spostamenti della serie temporale a doppia frequenza di SP12, con gli spostamenti dei rover GNSS a singola frequenza, restituisce gli effettivi spostamenti di ciascun ricevitore, ripuliti dagli spostamenti anomali di SP12; essi risultano più utili per controllare e poi descrivere nel testo il moto effettivo delle stazioni a singola frequenza, ubicate in zone ritenute suscettibili di possibili effetti indotti dalla movimentazione di gas (ad es. SP01, SP04, SP05, Figs 2.9 - 2.10, 2.13 - 2.16).

La stazione SP01 è installata all'interno dell'area di proiezione in superficie del giacimento di San Potito, nella parte nord-occidentale, un'area che dagli studi dei report precedenti (deformazioni analizzate tramite interferometria) non risulta influenzata dallo stoccaggio, ma dalle naturali dilatazioni e compattazioni stagionali del terreno. Nel semestre in esame (1 aprile - 30 settembre 2023), come si vede bene dalle figure 2.9 e 2.10, SP01 si solleva e si abbassa nella componente Up di $\approx \pm 2$ mm per poi abbassarsi definitivamente di -4 mm, nell'ultimo mese di monitoraggio del semestre.

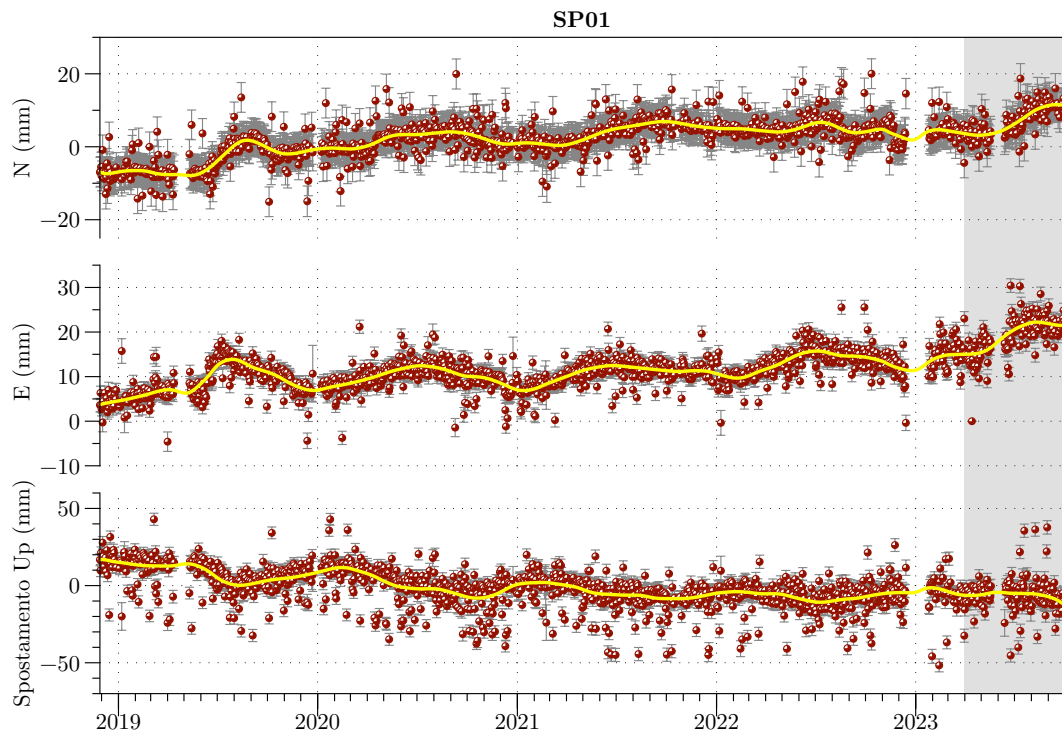


Figura 2.9: Spostamento relativo del ricevitore GNSS SP01 calcolato rispetto a SP12 e successivamente rimosso del moto di quest'ultimo, nelle componenti N, E e UP, aggiornato al 30 settembre 2023. In giallo la curva di regressione locale LOESS, scelta per fittare la distribuzione degli spostamenti ed usata per eliminare i valori anomali che ricadono fuori dai 3σ .

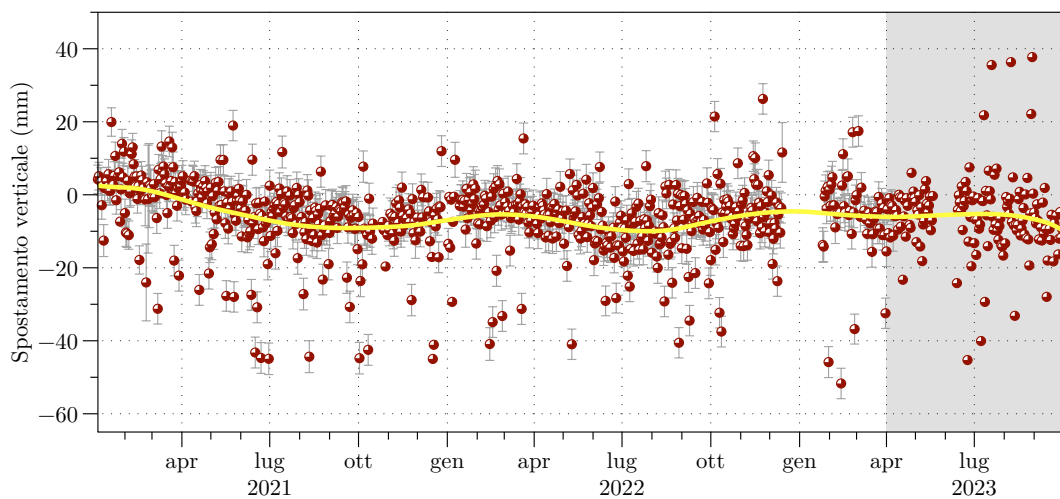


Figura 2.10: Serie temporale dello spostamento del ricevitore GNSS SP01 corretto dal moto di SP12, nelle componente UP, aggiornata al 30 settembre 2023. In giallo la curva di regressione locale LOESS, scelta per fittare la distribuzione degli spostamenti ed usata per eliminare i valori anomali che ricadono fuori dai 3σ .

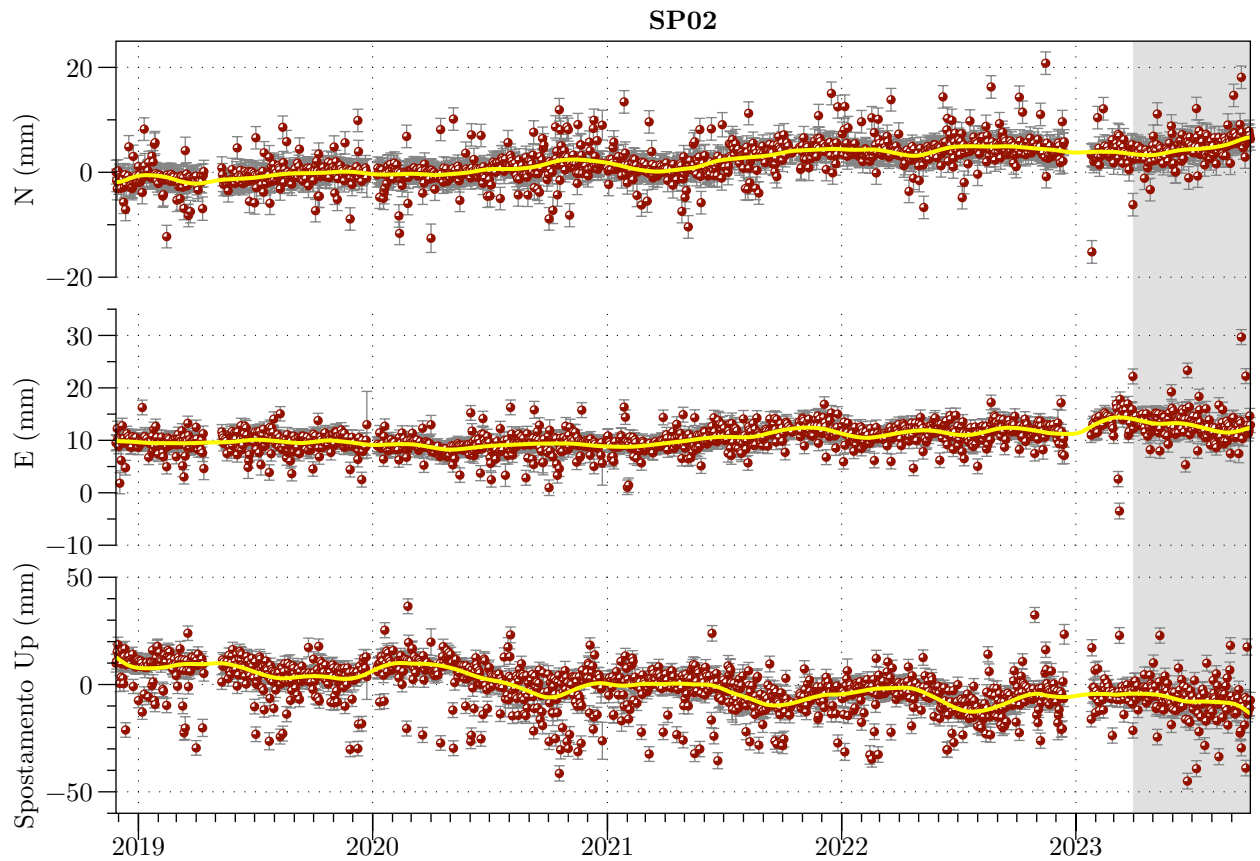


Figura 2.11: Spostamento relativo del ricevitore GNSS SP02 calcolato rispetto a SP12 e successivamente rimosso del moto di quest'ultimo, nelle componenti N, E e UP, aggiornato al 30 settembre 2023. In giallo la curva di regressione locale LOESS, scelta per fittare la distribuzione degli spostamenti ed usata per eliminare i valori anomali che ricadono fuori dai 3σ .

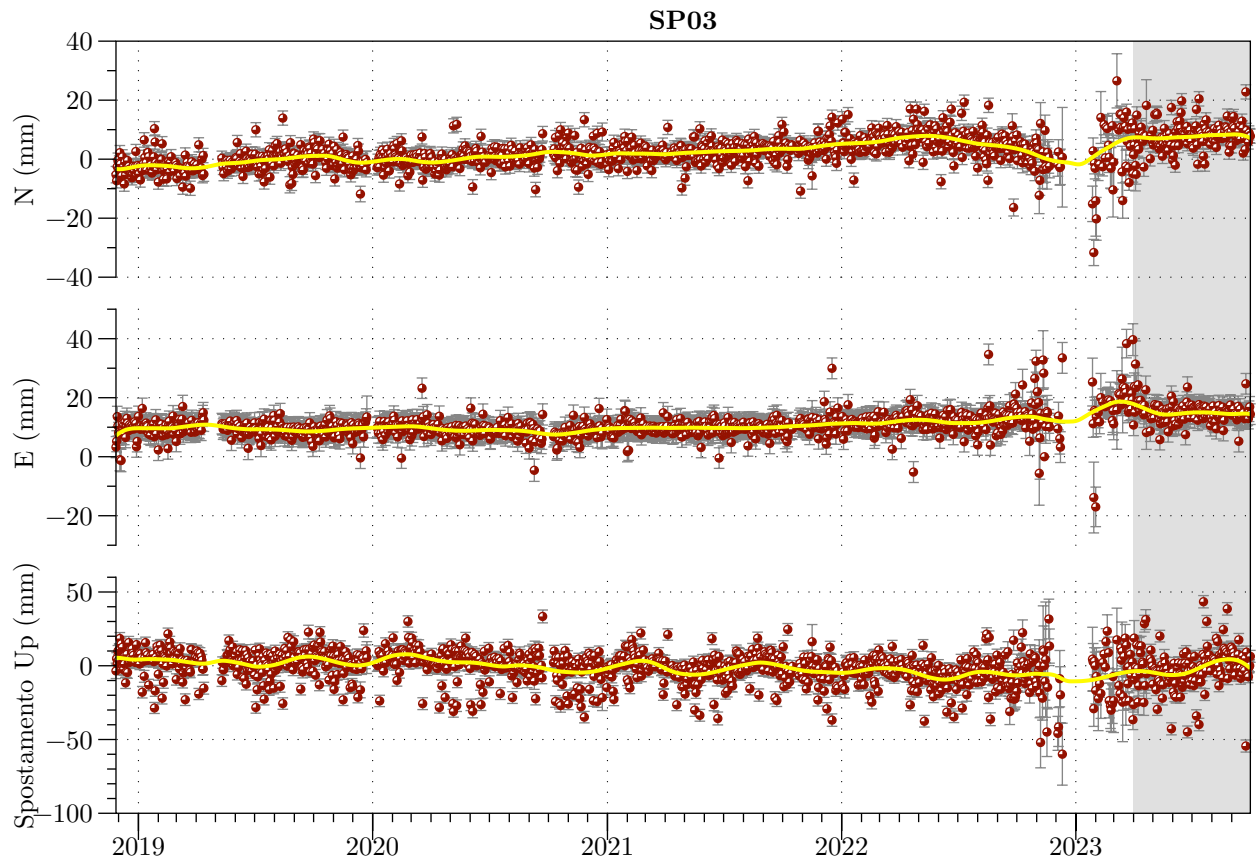


Figura 2.12: Spostamento relativo del ricevitore GNSS SP03 calcolato rispetto a SP12 e successivamente rimosso del moto di quest'ultimo, nelle componenti N, E e UP, aggiornato al 30 settembre 2023. In giallo la curva di regressione locale LOESS, scelta per fittare la distribuzione degli spostamenti ed usata per eliminare i valori anomali che ricadono fuori dai 3σ .

La stazione SP04 è posizionata sul Cluster-C, all'interno dell'impianto di stoccaggio, ed è l'unica stazione a singola frequenza i cui spostamenti possono essere direttamente confrontati con una stazione a doppia frequenza, CLS2, che le dista circa 40 m. Nel periodo di iniezione in esame, la serie temporale di SP04 (dalla quale sono stati rimossi gli spostamenti di SP12) descrive nella componente Up un sollevamento medio di $\approx +36$ mm (curva di fit gialla in Fig. 2.13, blu in Fig 2.14), che mima l'andamento di CLS2. In questo semestre, l'entità del sollevamento è quasi il triplo di quello registrato da CLS2.

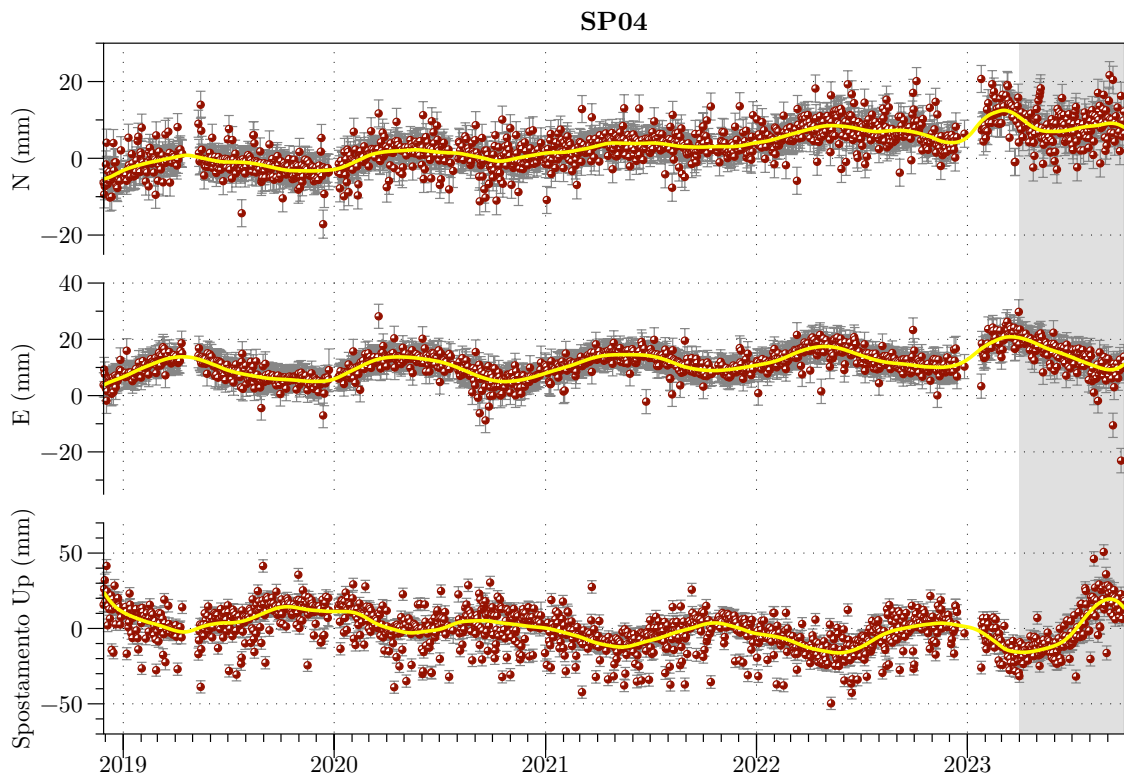


Figura 2.13: Spostamento relativo del ricevitore GNSS SP04 calcolato rispetto a SP12 e successivamente rimosso del moto di quest'ultimo, nelle componenti N, E e UP, aggiornato al 30 settembre 2023. In giallo la curva di regressione locale LOESS, scelta per fittare la distribuzione degli spostamenti ed usata per eliminare i valori anomali che ricadono fuori dai 3σ .

Come si vede bene in figura 2.14, la serie di SP04 ben si accorda con quella di CLS2 per ampiezza e cambi di fase delle oscillazioni in tutte le componenti del moto.

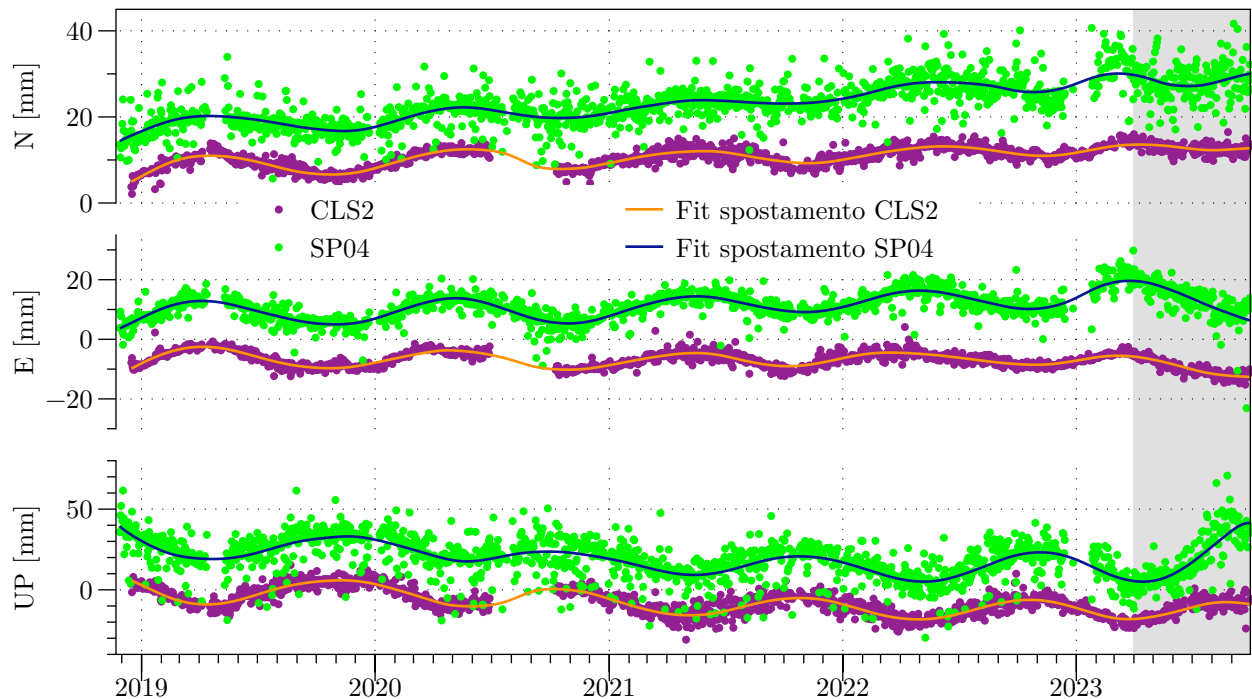


Figura 2.14: Confronto tra la serie temporale di CLS2 processata nelle rete a doppia frequenza e la serie a singola frequenza di SP04, aggiornate al 30 settembre 2023.

La stazione SP05 è posizionata nelle vicinanze del Cluster-B, ≈ 500 m a nord-ovest della proiezione in superficie dei limiti del reservoir ed allineata lungo il profilo CB (Fig. 4.2) che collega i 2 cluster. Nonostante sia al di fuori della proiezione in superficie del giacimento si può ipotizzare che l'area su cui è localizzata possa subire deformazioni indotte dalle attività di stoccaggio nei livelli dei reservoir (Fig. 4.1). In questo semestre di iniezione la stazione SP05 accumula una deformazione verticale di $\approx +2$ mm (Figs 2.15 e 2.16), in accordo con la fase dello stoccaggio (iniezione) e in disaccordo con la compattazione estiva dei sedimenti.

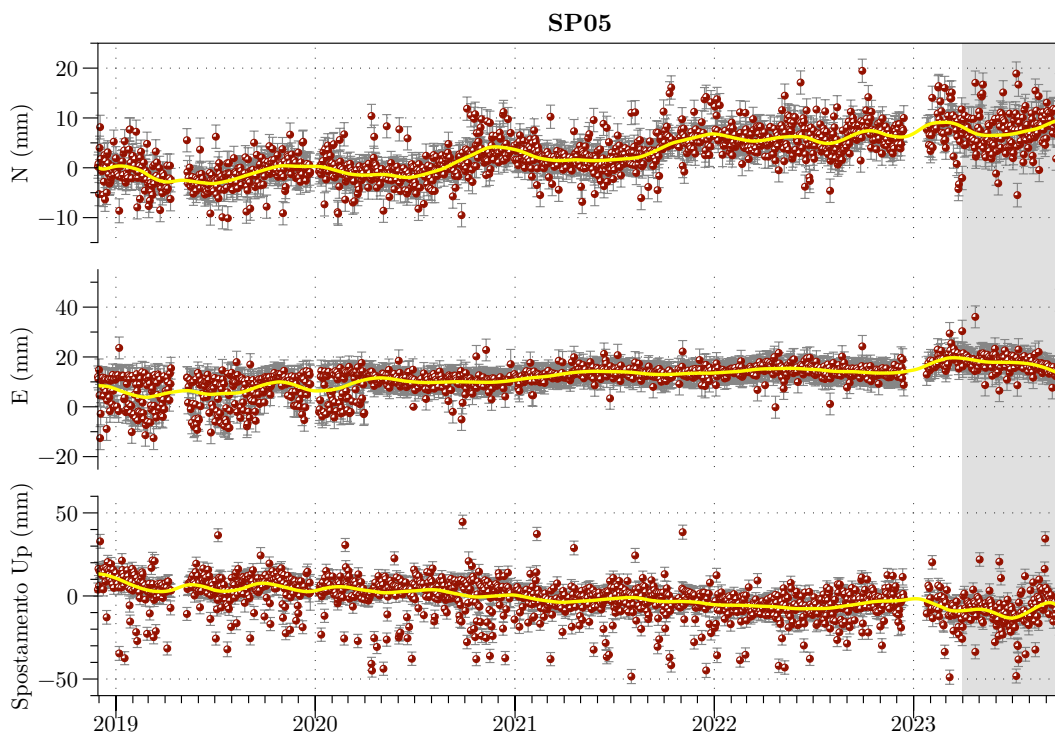


Figura 2.15: Spostamento relativo del ricevitore GNSS SP05 calcolato rispetto a SP12 e successivamente rimosso del moto di quest'ultimo, nelle componenti N, E e UP, aggiornato al 30 settembre 2023. In giallo la curva di regressione locale LOESS, scelta per fittare la distribuzione degli spostamenti ed usata per eliminare i valori anomali che ricadono fuori dai 3σ .

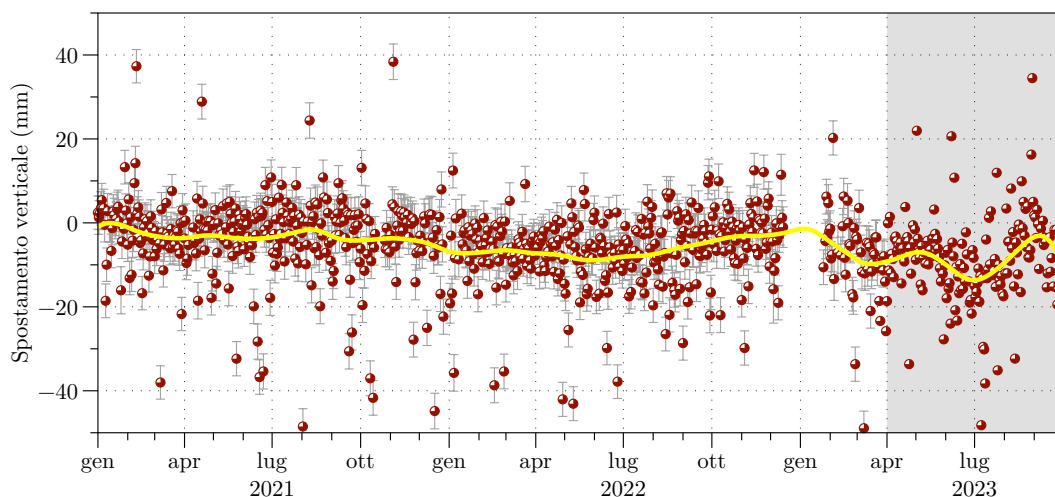


Figura 2.16: Serie temporale dello spostamento del ricevitore GNSS SP05 corretto dal moto di SP12, nelle componente UP, aggiornata al 30 settembre 2023. In giallo la curva di regressione locale LOESS, scelta per fittare la distribuzione degli spostamenti ed usata per eliminare i valori anomali che ricadono fuori dai 3σ .

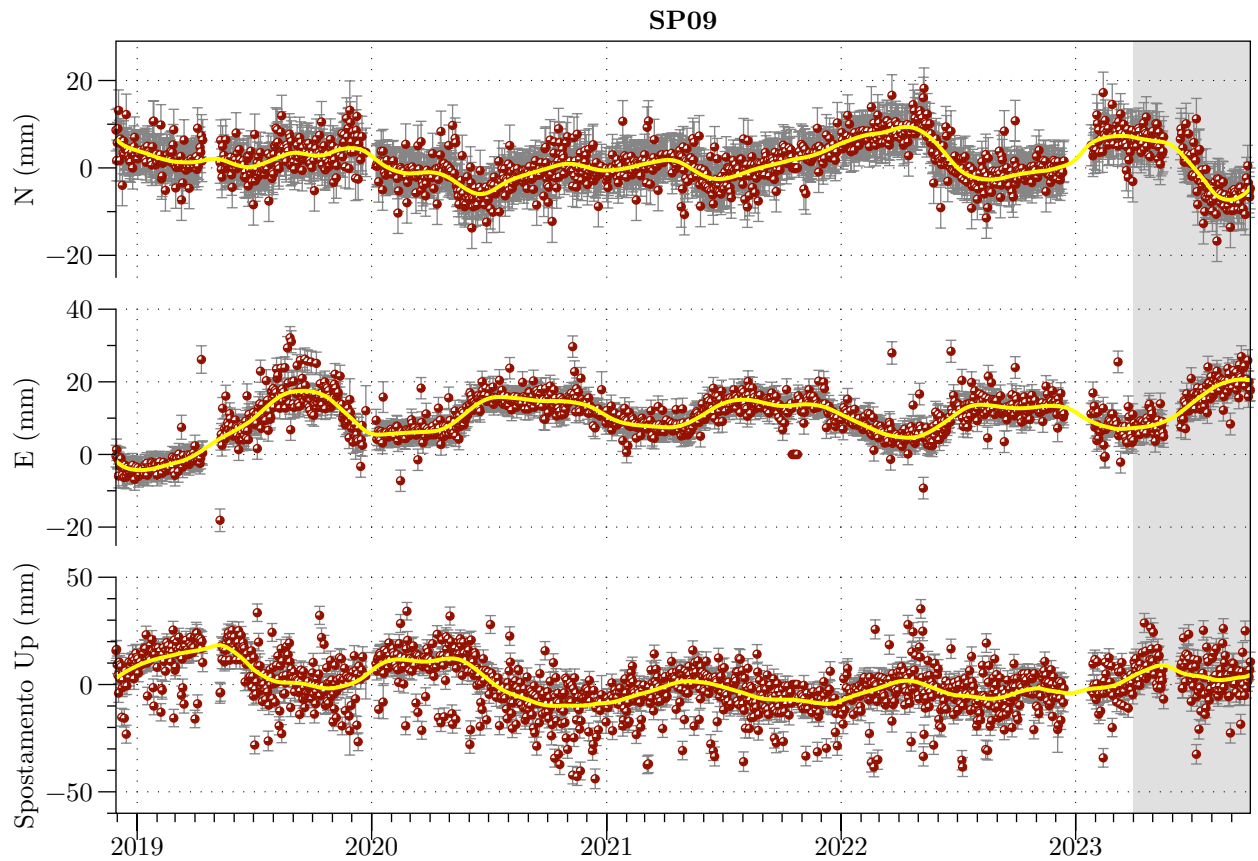


Figura 2.17: Spostamento relativo del ricevitore GNSS SP09 calcolato rispetto a SP12 e successivamente rimosso del moto di quest'ultimo, nelle componenti N, E e UP, aggiornato al 30 settembre 2023. In giallo la curva di regressione locale LOESS, scelta per fittare la distribuzione degli spostamenti ed usata per eliminare i valori anomali che ricadono fuori dai 3σ .

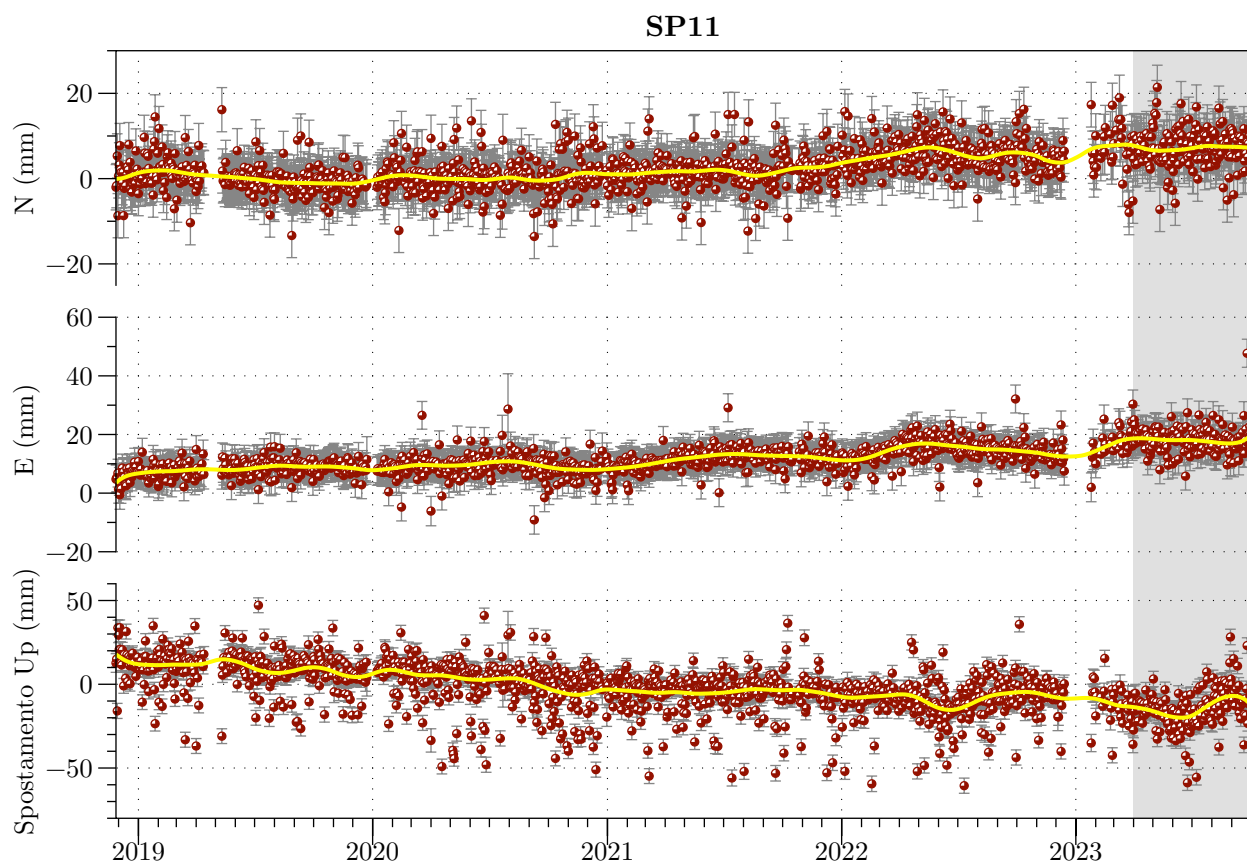


Figura 2.18: Spostamento relativo del ricevitore GNSS SP11 calcolato rispetto a SP12 e successivamente rimosso del moto di quest'ultimo, nelle componenti N, E e UP, aggiornato al 30 settembre 2023. In giallo la curva di regressione locale LOESS, scelta per fittare la distribuzione degli spostamenti ed usata per eliminare i valori anomali che ricadono fuori dai 3σ .

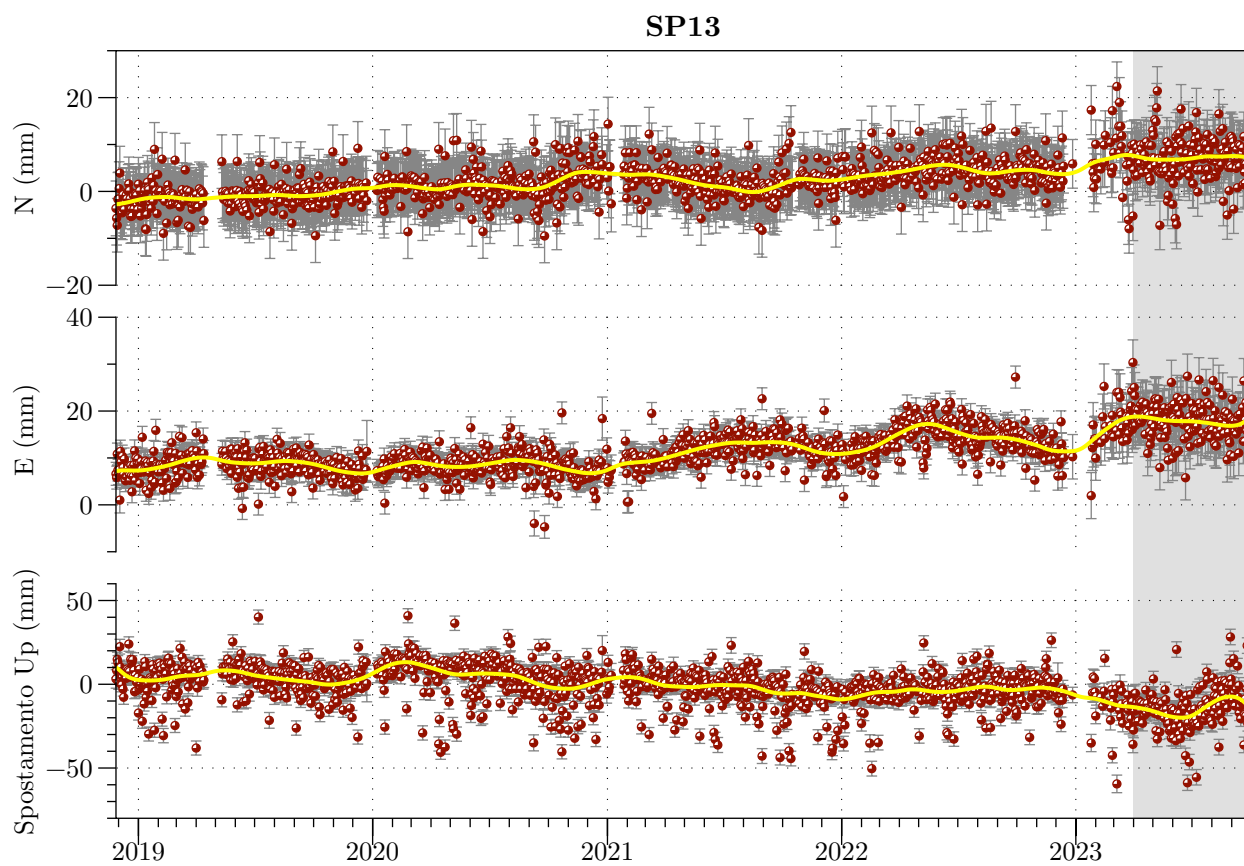


Figura 2.19: Spostamento relativo del ricevitore GNSS SP13 calcolato rispetto a SP12 e successivamente rimosso del moto di quest'ultimo, nelle componenti N, E e UP, aggiornato al 30 settembre 2023. In giallo la curva di regressione locale LOESS, scelta per fittare la distribuzione degli spostamenti ed usata per eliminare i valori anomali che ricadono fuori dai 3σ .

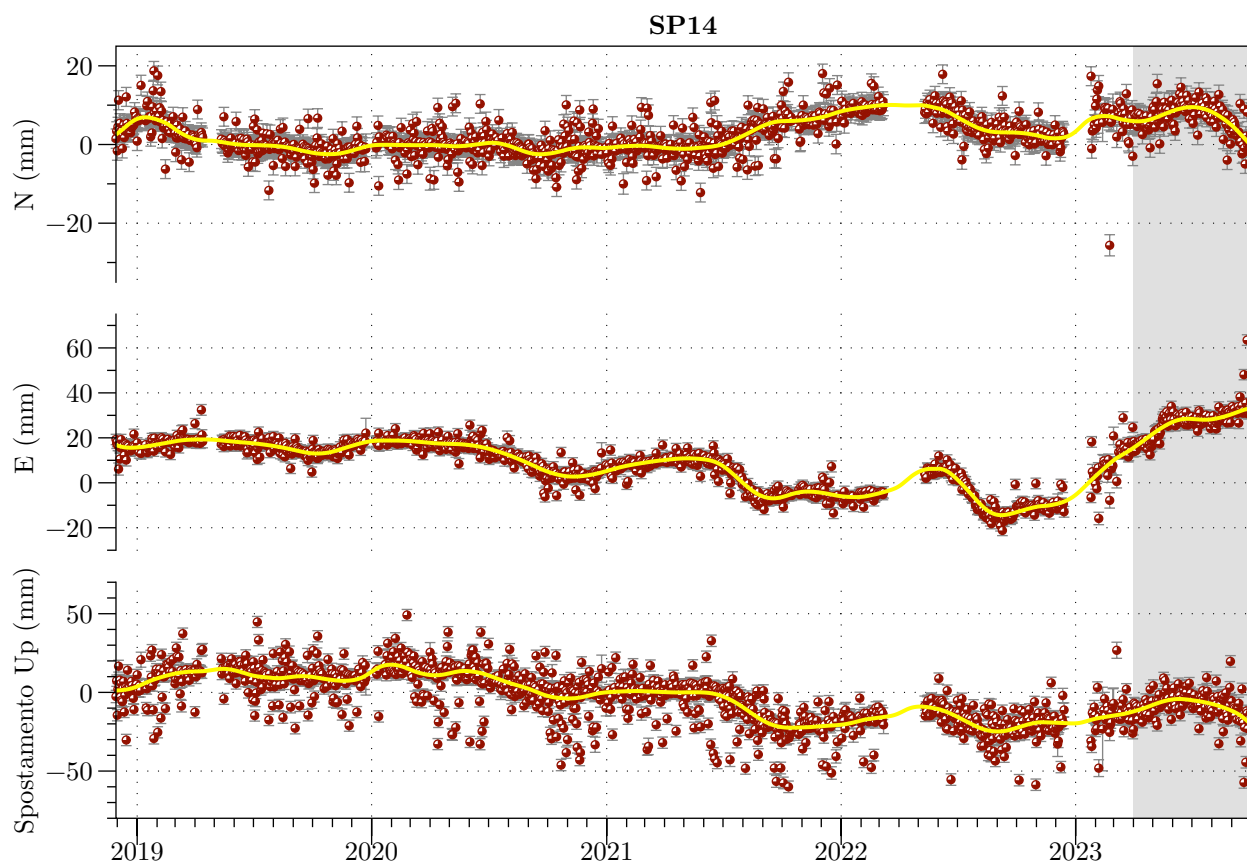


Figura 2.20: Spostamento relativo del ricevitore GNSS SP14 calcolato rispetto a SP12 e successivamente rimosso del moto di quest'ultimo, nelle componenti N, E e UP, aggiornato al 30 settembre 2023. In giallo la curva di regressione locale LOESS, scelta per fittare la distribuzione degli spostamenti ed usata per eliminare i valori anomali che ricadono fuori dai 3σ .

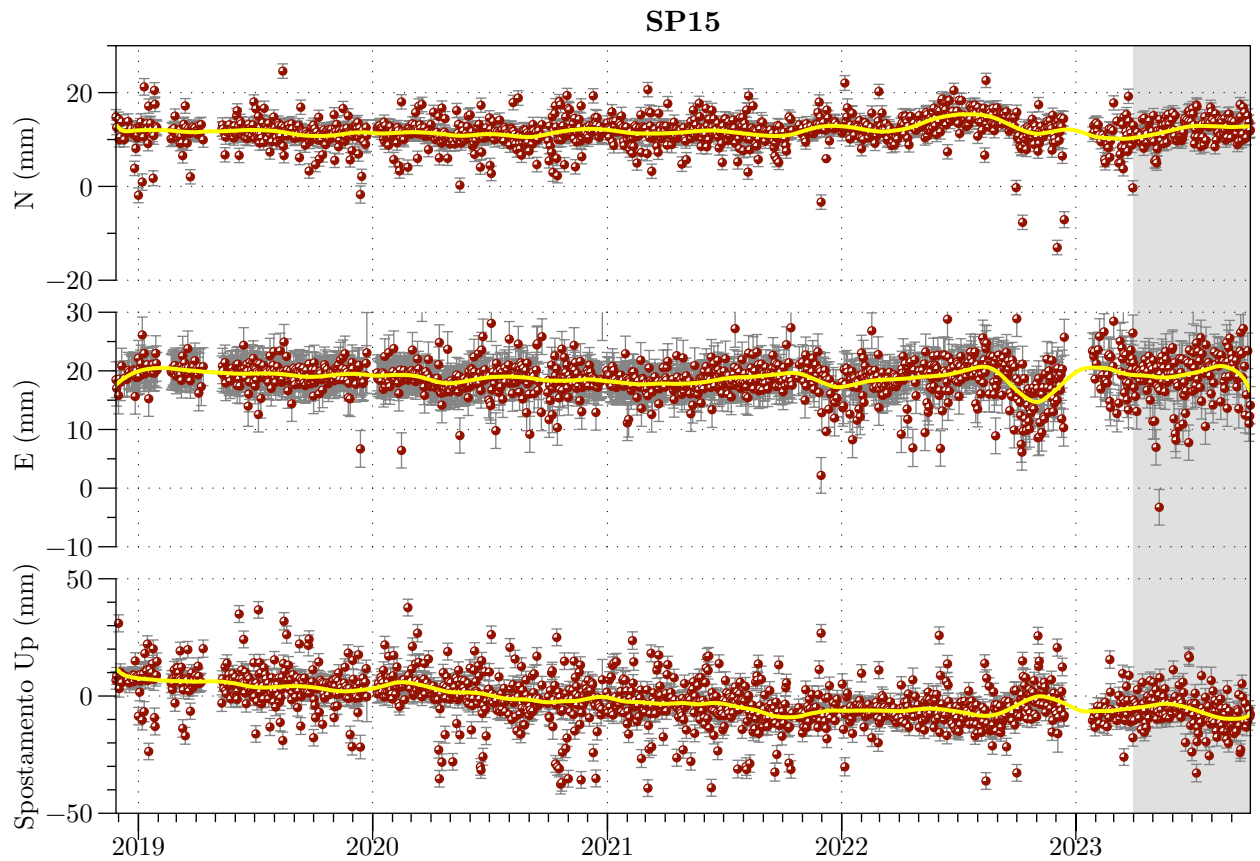


Figura 2.21: Spostamento relativo del ricevitore GNSS SP15 calcolato rispetto a SP12 e successivamente rimosso del moto di quest'ultimo, nelle componenti N, E e UP, aggiornato al 30 settembre 2023. In giallo la curva di regressione locale LOESS, scelta per fittare la distribuzione degli spostamenti ed usata per eliminare i valori anomali che ricadono fuori dai 3σ .

3 Piezometri e assestimetri: relazioni con la piovosità

3.1 Piezometri

Il comportamento dei piezometri superficiale ed intermedio, nel periodo aprile- settembre 2023 mostra un trend generale di leggero innalzamento delle quote piezometriche; a partire da metà giugno si assiste ad un abbassamento delle quote piezometriche a seguito dei massimi relativi raggiunti tra maggio e giugno 2023; in generale, tali variazioni risultano più consistenti nelle falde più superficiali, in seguito alle ingenti precipitazioni registrate tra maggio e giugno 2023.

Alla fine del semestre in esame la quota del piezometro PS1C si attesta intorno a ≈ -3.6 m da p.c., a seguito

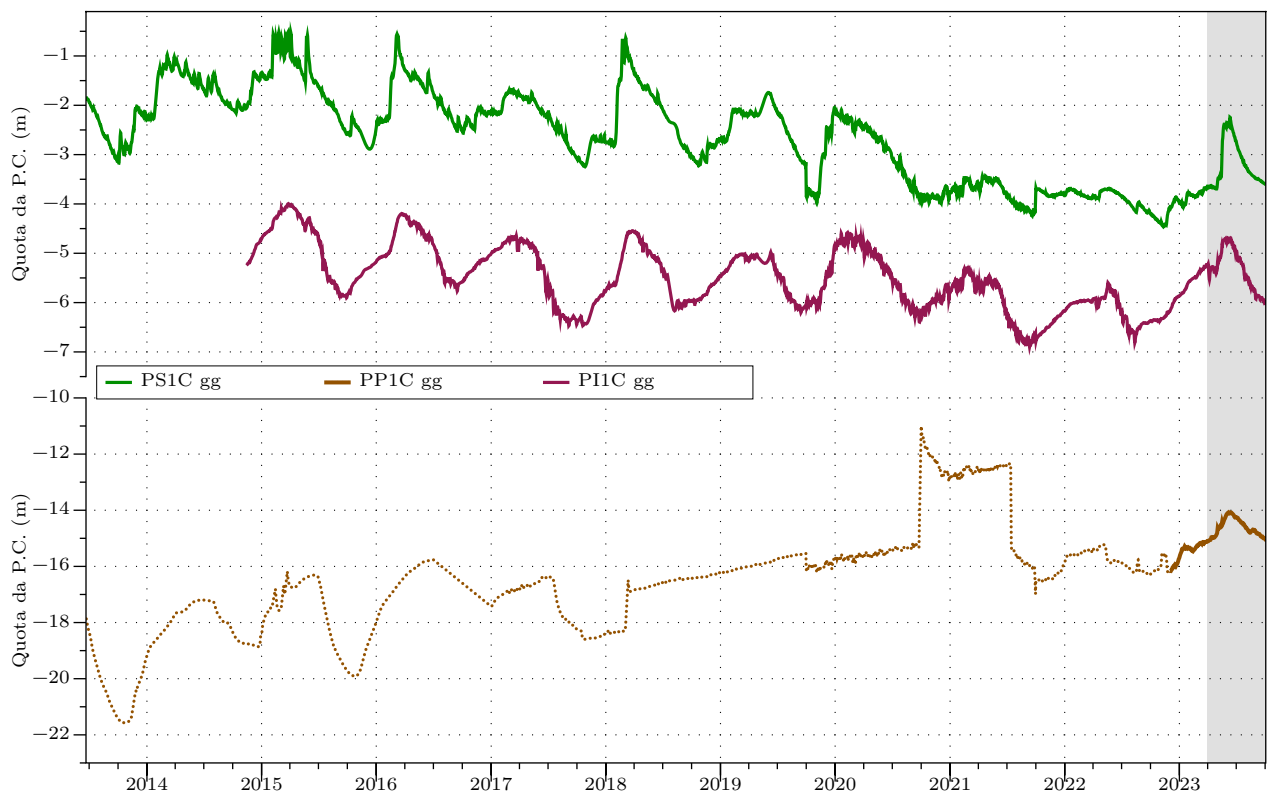


Figura 3.1: Variazioni giornaliere medie della quota dal piano campagna registrate rispettivamente nei piezometri superficiale, intermedio e profondo, compensate per la pressione atmosferica. Dal grafico sono escluse le medie con valori di deviazione standard ≥ 0.05 . La linea marrone continua contraddistingue il nuovo piezometro profondo.

di una costante discesa delle quote da -2.2 m a partire da metà giugno 2023 (con picchi registrati a -1.85 ad inizio maggio 2023).

La quota del piezometro intermedio si abbassa da -5.2 m a ≈ -5.95 m da p.c. (≈ 0.7 m di abbassamento) con

un trend più marcato tra giugno e settembre 2023 (- 1.3 m rispetto al massimo registrato di -4.7 a giugno 2023). La quota del piezometro profondo subisce un innalzamento di circa 1 m (da - 15 m a -14 m da p.c.) tra inizio aprile e metà giugno 2023, seguito da un più blando abbassamento della quota piezometrica che torna a -15 m da p.c. a fine settembre 2023. Tali oscillazioni risultano di moderata intensità se confrontate con quelle di altri periodi di monitoraggio ed hanno massimi relativi in corrispondenza del mese di maggio-giugno, come verificatosi in passato.

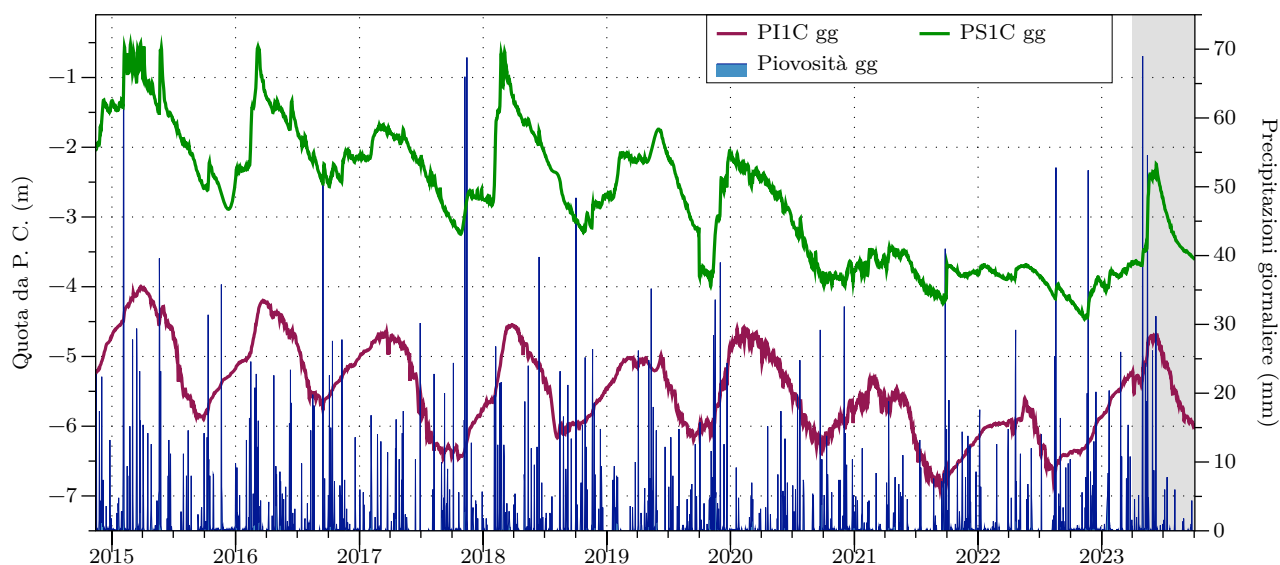


Figura 3.2: Variazioni giornaliere medie della quota da P. C. registrate nei piezometri superficiale e intermedio, in relazione alla piovosità giornaliera.

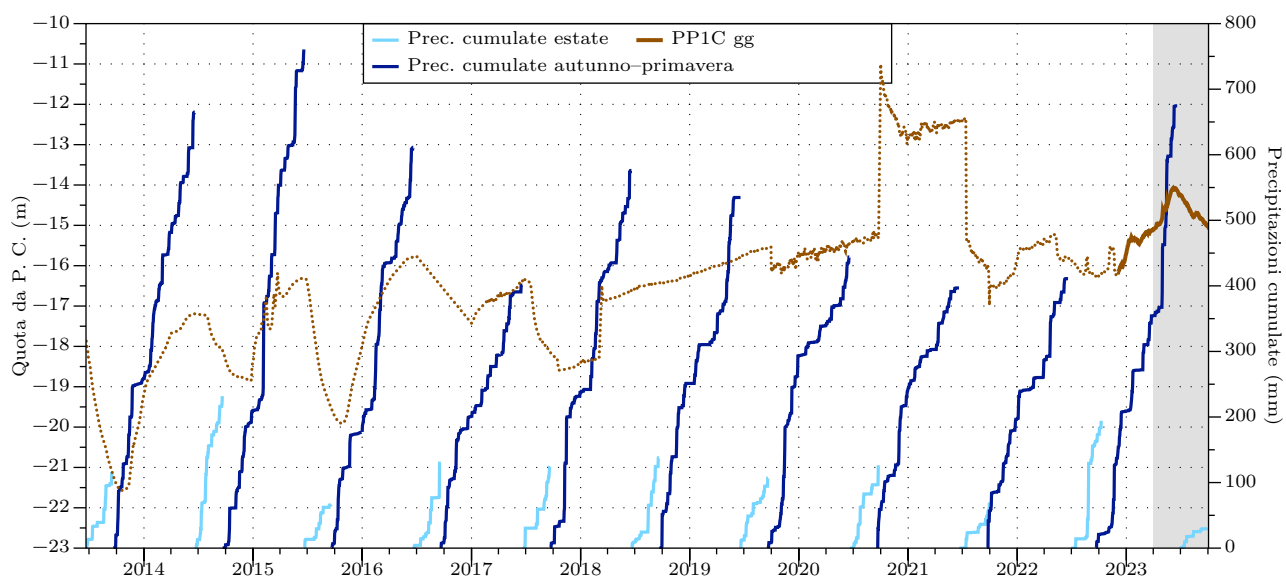


Figura 3.3: Variazioni giornaliere medie della quota da P. C. registrate nel piezometro profondo in relazione con le precipitazioni cumulate ogni anno. Per meglio evidenziare il comportamento stagionale dello strumento, le cumulate della piovosità vengono calcolate a partire dall'inizio dell'autunno di ciascun anno e riportate a zero all'inizio di ogni estate (stagione secca). La linea marrone continua contraddistingue il nuovo piezometro profondo.

3.2 Assestimetri

Nel semestre in esame, l'andamento degli assestimetri mostra un trend di lieve compattazione della colonna sedimentaria (curve rossa e viola in figura 3.4: risalita della curva = dilatazione, discesa della curva = compattazione). Le deformazioni registrate nel semestre non si discostano significativamente da quelle registrate in altri analoghi periodi di monitoraggio mostrando una leggera dilatazione della colonna sedimentaria al di sopra del reservoir nei mesi di maggio-giugno 2023, seguita poi da una compattazione fino a fine monitoraggio. Questi andamenti si inseriscono in un ulteriore quadro di compattazione generale osservabile con entrambi gli strumenti.

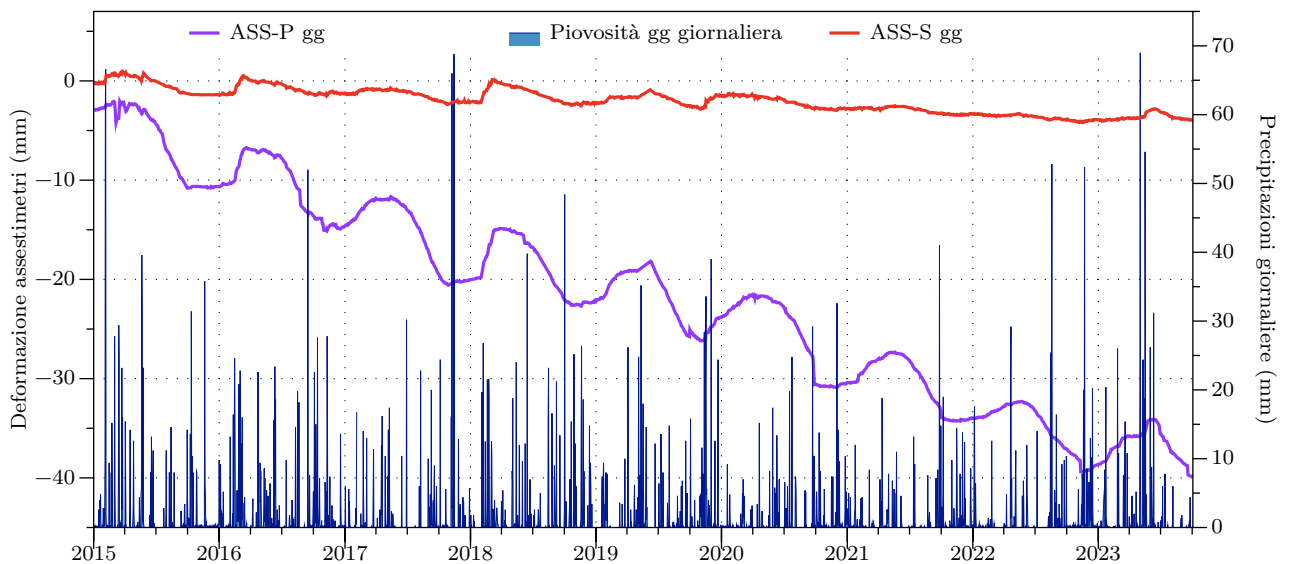
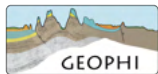


Figura 3.4: Deformazioni giornaliere medie registrate lungo le aste degli assestimetri superficiale (ASS-S) e profondo (ASS-P) in relazione alle precipitazioni giornaliere, a partire da gennaio 2015 fino al 30 settembre 2023.

- Nel semestre in esame, i primi 11 metri di sedimento (linea rossa in figura 3.4) si sono compattati di ≈ 0.15 mm tra aprile e settembre 2023. La massima compattazione si registra tra fine giugno e fine settembre 2023 (≈ 1 mm di compattazione); a fine settembre 2023 lo strumento indica 3.95 mm di compattazione accumulata.
- I 350 metri di colonna sedimentaria, monitorata tramite l'assestimetro profondo (linea viola in figura 3.4), si sono compattati di ≈ 4.1 mm nel semestre in esame. Tale compattazione si verifica a partire da fine giugno 2023, successivamente ad una lievissima dilatazione della colonna nei mesi primaverili. Questa



dinamica si inserisce nel complessivo trend di compattazione costante da inizio monitoraggio ($\approx - 3.9$ mm/anno); a fine settembre 2023 lo strumento indica una compattazione complessiva di ≈ 39.9 mm.

4 Analisi Geophi sul dato SqueeSAR relativo ai Cluster della concessione San Potito - Cotignola

4.1 Analisi delle serie interferometriche sui Cluster B e C in relazione alla movimentazione di gas

L'analisi interferometrica prodotta da TRE, aggiornata al 01/10/23, evidenzia nell'area del giacimento di Cotignola la permanenza di un trend ciclico nelle serie storiche osservato sia nel Pool B che nel Pool C.

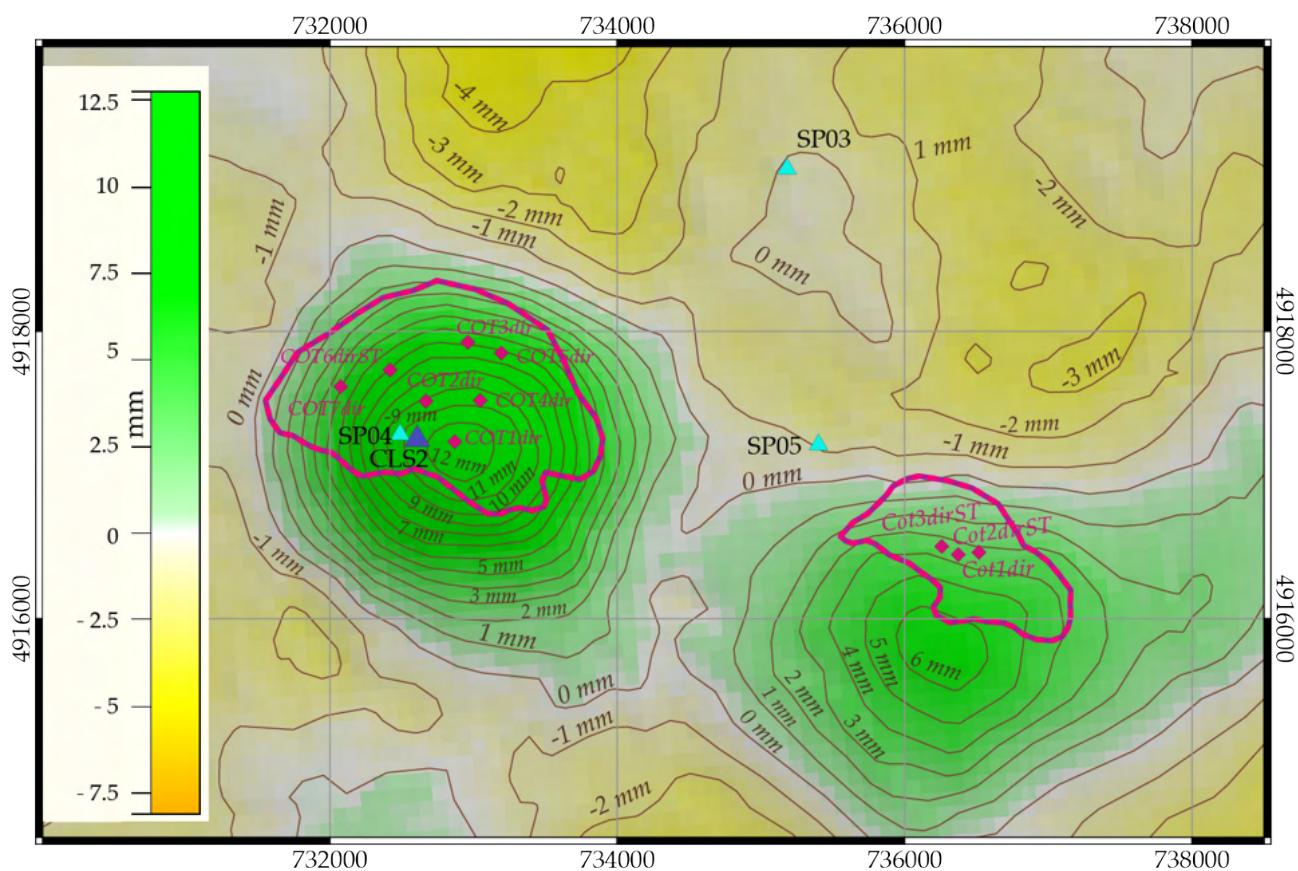


Figura 4.1: Superficie di spostamento verticale ottenuta tramite la serie temporale Sentinel-1: l'interpolazione utilizza lo spostamento cumulato da ogni bersaglio radar durante l'ultima fase di erogazione tra ottobre 2022 e marzo 2023.

I dati dell'aggiornamento a settembre 2023 mostrano un trend di sollevamento distribuito su entrambi i cluster B e C. La superficie che interpola gli spostamenti verticali subiti dai bersagli radar durante i 6 mesi della fase di iniezione 2023 (≈ 153.5 MSmc nel Cluster-C, ≈ 29.5 MSmc nel Cluster-B, fig. 4.1), mostra le due zone di sollevamento localizzate a ridosso della proiezione in superficie dei limiti di reservoir. La stima della variabile Z (spostamento verticale nel semestre di erogazione) è stata effettuata in corrispondenza dei nodi di una griglia

rettangolare di dimensioni pari a 73 righe x 109 colonne, con nodi distanti 100 m (ri-campionata a 50 m). Dal momento che la variabile non presenta trend, tale stima è stata effettuata ricorrendo alla tecnica del Kriging stazionario, ed utilizzando un modello di semivariogramma gaussiano. Il risultato dell'interpolazione elimina i massimi di deformazione raggiunti da singoli PS (si vedano figs 4.2 - 4.6), descrivendo una deformazione mediata del terreno, ma sicuramente più omogenea e realistica.

Al di sopra del Cluster-B si evidenzia un sollevamento areale mediamente compreso tra $i + 3$ e $i + 4$ mm concentrata tra i pozzi Cot1DirST, Cot2DirST e Cot3DirST. Si osservano inoltre dei massimi relativi di sollevamento (fino a $+ 6$ mm) in una zona al di fuori dell'area di stoccaggio, nella porzione più meridionale del campo, a ridosso di esso.

Al di sopra del Cluster-C si evidenzia un sollevamento areale compresa tra $+ 1$ e $+ 12$ mm all'interno del campo, con massimi tra i pozzi Cot1Dir, Cot2Dir e Cot4Dir. In generale si può notare come i valori di spostamento del suolo tendano a valori nulli in un intorno minore di ≈ 500 m dalle proiezioni in superficie dei "bordi" dei reservoir, ad esclusione della porzione a sud del Cluster-B.

Le serie temporali fornite da TRE ALTAMIRA sono state ulteriormente elaborate per meglio definire e visualizzare tali trend di deformazione nell'intorno dei reservoir adibiti a stoccaggio.

Per analizzare gli effetti della movimentazione di gas nel reservoir della concessione si parte dall'ipotesi che:

- i quantitativi di gas in erogazione/iniezione inducano subsidenza/sollevamento della superficie topografica;
- l'analisi interferometrica sia in grado di evidenziare i suddetti movimenti.

E' stata svolta una analisi lungo il profilo longitudinale CB (figure 4.2 e 4.3) che interseca la culminazione strutturale dei corpi di reservoir dei Pool C e B (Fig 4.2).

Le serie in figura 4.3 rappresentano i valori di spostamento di ogni bersaglio radar proiettato sul profilo CB, alla fine di ognuna delle fasi di iniezione ed erogazione degli ultimi 7 anni. Le serie sono calcolate riportando a zero il valore di spostamento di ogni punto all'inizio di ogni fase. La figura evidenzia l'evoluzione dei movimenti del suolo al di sopra dei reservoir di Cotignola; gli spostamenti massimi (sia positivi che negativi) sono distribuiti in prossimità del centro del Cluster-C (tra 3000 e 5000 m in ascissa) e ben descrivono i coni di sollevamento e subsidenza creati dalle attività di stoccaggio. Anche al di sopra del Cluster-B si notano (tra 7000 e 8000 m in ascissa) spostamenti positivi durante le fasi di iniezione e negativi durante quelle di erogazione, anche se di minore entità.

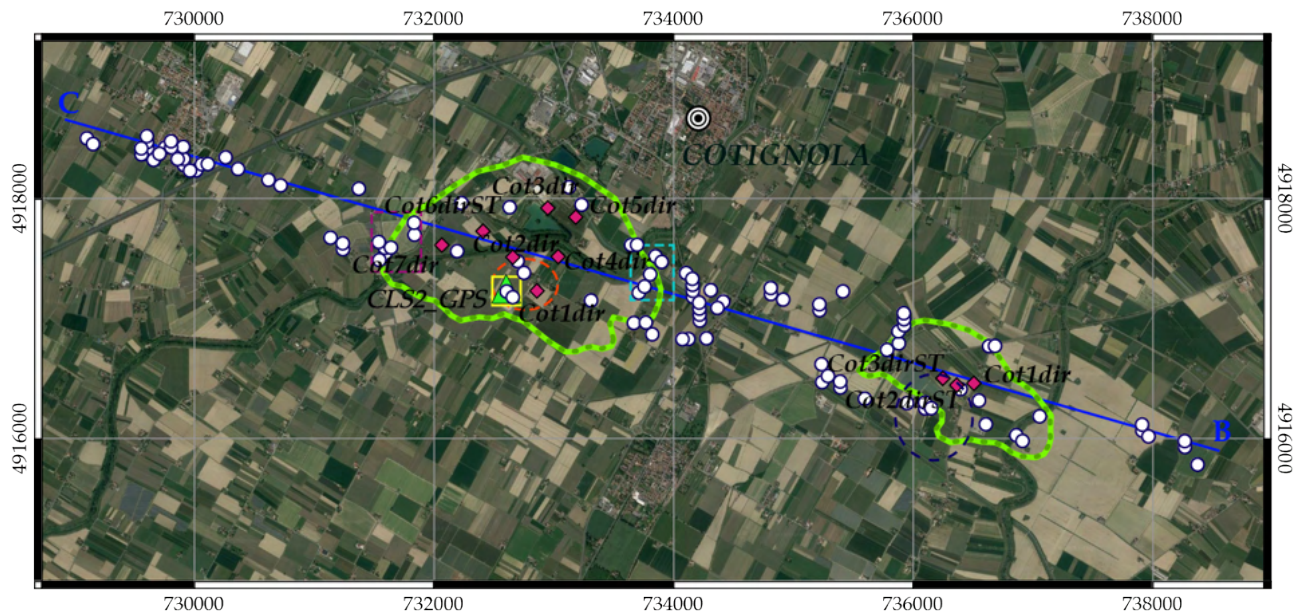


Figura 4.2: Mappa dei limiti di reservoir dei Cluster C e B; localizzazione del profilo CB (in blu) lungo il quale sono stati proiettati i bersagli radar (in bianco) che si distribuiscono attorno ad esso; il cerchio arancio al centro del Cluster-C evidenzia i bersagli radar di cui sono state analizzate le serie temporali mostrate in figura 4.6; i quadrati giallo, azzurro e viola evidenziano i bersagli radar le cui serie temporali orizzontali sono analizzate in figura 4.7.

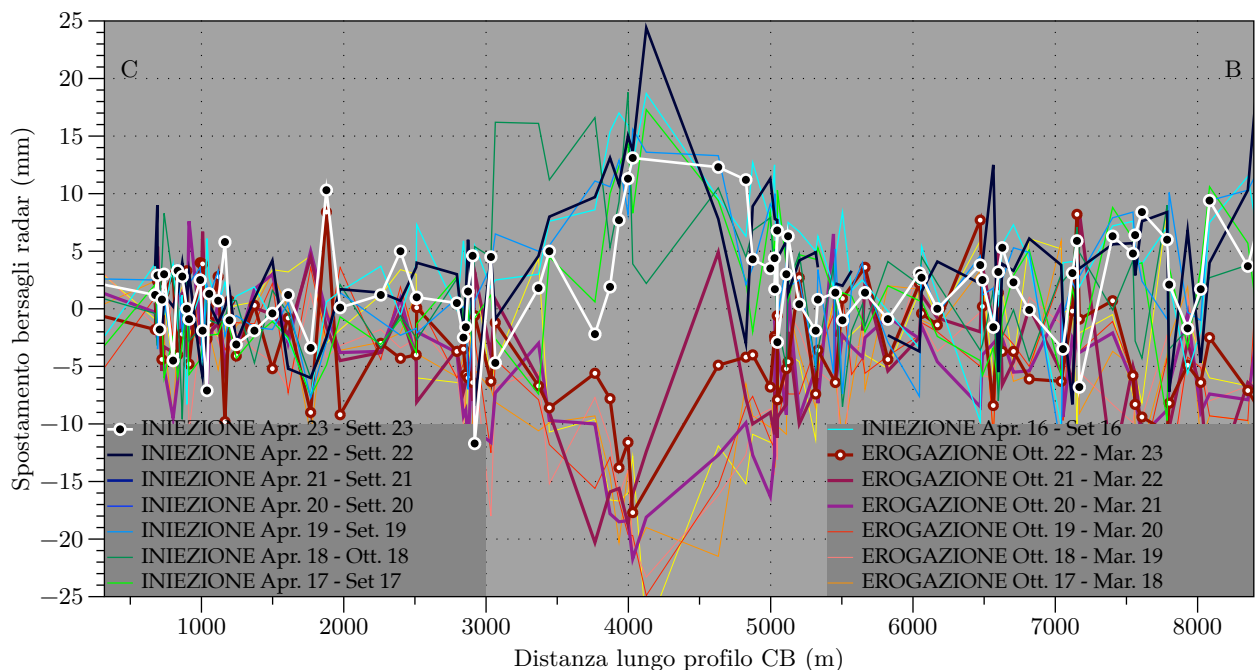


Figura 4.3: Profilo longitudinale di spostamento verticale ottenuto dai dati delle serie temporali Sentinel-1. Le curve del grafico sono costruite proiettando lungo il profilo CB, in blu nella mappa di figura 4.3, i valori di spostamento verticale dei bersagli radar (punti bianchi in mappa), che si distribuiscono nell'intorno del profilo stesso, rispetto al valore di spostamento di ogni punto all'inizio di ogni fase di movimentazione del gas; i valori in ascissa esprimono la distanza progressiva misurata lungo il profilo con origine a nord-ovest.

Relativamente all'ultima fase di iniezione tra aprile e settembre 2023 (curva bianca con punti neri in Fig. 4.3) si possono notare:

- un sollevamento medio di 4/5 mm, fino ad un massimo di 8 mm (a fronte di 29.4 MSmc iniettati) localizzato intorno al centro del Cluster-B (7000 - 8000 m in ascissa);
- un sollevamento medio di ≈ 7 mm, con massimi di 13 mm (a fronte di ≈ 153.5 MSmc iniettati) nella porzione centrale del Cluster-C intorno a 4000 m in ascissa; tali valori di sollevamento sono confrontabili a quelli dei precedenti periodi di iniezione con valori mediamente più contenuti.

Le deformazioni risultano meglio distribuite sul Cluster-C, in termini di forma e ampiezza; lungo il Cluster-B infatti si nota uno scatter dei valori che passano da negativi a positivi in maniera molto rapida. Per comprendere meglio questi aspetti, e per capire se gli spostamenti registrati siano correlati effettivamente all'andamento dei volumi nel Cluster-B, sono stati isolati i PS che mostrano maggiori deformazioni.

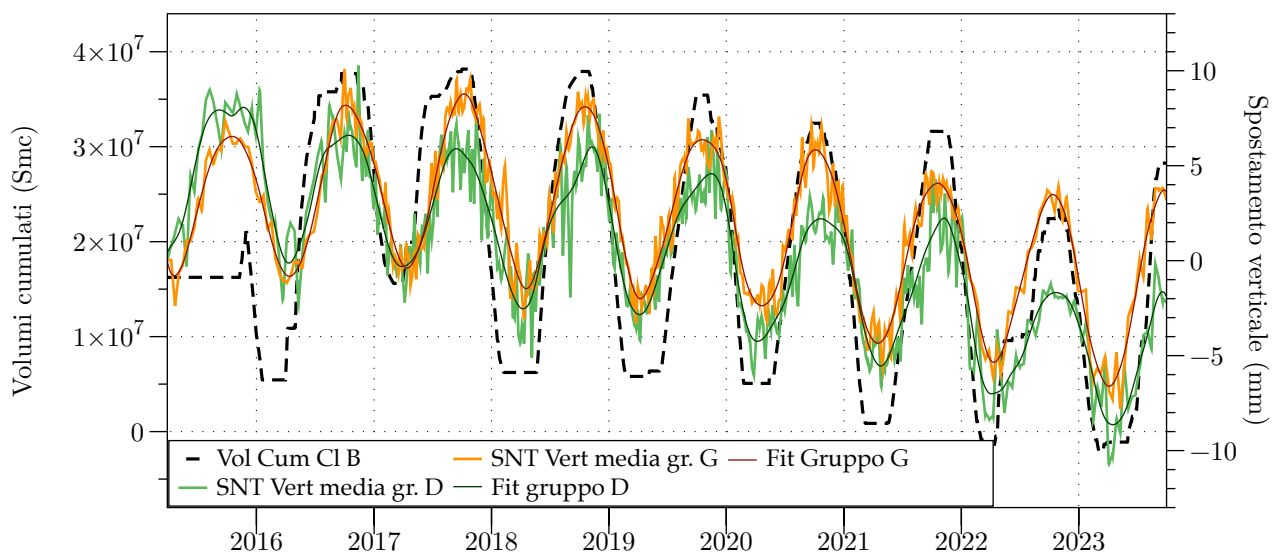


Figura 4.4: Serie temporali di spostamento verticale dei bersagli radar Sentinel-1 che hanno mostrato massimo sollevamento nel semestre aprile-settembre 2023, sia nella zona centrale che in quella centro-meridionale del Cluster-B (cerchio blu in fig. 4.2); in verde la media degli spostamenti dei PS (gruppo G) A3VBFQG, A3VWVC8, A3XP65K, A3YALRC, A3YW1D4, A3WIAY1, A3X3QJT, A3YW1D5; in arancione la media degli spostamenti dei PS A448XT5, A4322LO, A4322LP (gruppo D).

Sul Cluster-B sono stati messi a confronto (fig. 4.4) gli andamenti delle serie Sentinel-1 di alcuni gruppi di PS posti sia al centro del cluster che nella porzione meridionale (cerchio blu in fig. 4.2), in un'area esterna alla proiezione in superficie del reservoir, i quali hanno mostrato maggior sollevamento sulla base delle interpolazioni dello spostamento ad inizio e fine monitoraggio (fig. 4.1). Osservando gli andamenti temporali dello spostamento

si notano sollevamenti di intensità simile, nell'ordine dei 9 - 10 mm. Le discrepanze rilevate in precedenza possono tuttavia essere spiegate osservando che:

- il sollevamento al centro del cluster B anticipa quello ai bordi del reservoir ma risulti della stessa intensità;
- il sollevamento al centro del cluster anticipa l'attività di iniezione di oltre un mese, a movimentazione di gas nulla.

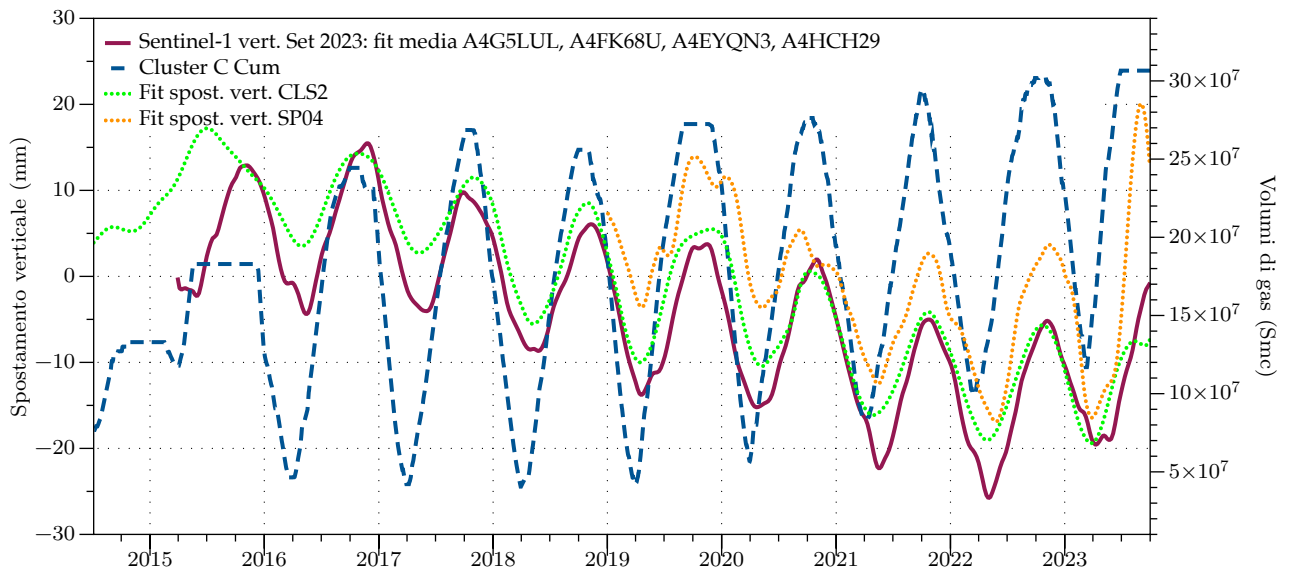


Figura 4.5: Confronto tra medie degli spostamenti verticali dei bersagli radar (mm) individuati al centro del Cluster-C (cerchio arancio in Fig. 4.2), fit delle serie GPS verticali di CLS2 e SP04 e volumi movimentati nel pool CC1.

Analizzando in figura 4.5 la serie temporale media dei bersagli radar localizzati al centro del Cluster-C (cerchio arancio in Fig. 4.2) si può notare la correlazione tra i loro spostamenti ed i volumi di gas movimentati nel pool C; anche nell'ultimo semestre (come verificatosi già per fasi analoghe di altri anni) l'inversione del trend di subsidenza in favore del sollevamento avviene a maggio, dopo circa un mese di iniezione. Mediamente, il sollevamento dei 4 PS situati al centro del Cluster-C ammonta a $\approx +19$ mm, nel periodo maggio-settembre 2023 ($\approx +16$ mm nell'arco dell'intero semestre). Tale andamento rispecchia quello già osservato in altri periodi di iniezione.

Una ulteriore analisi sulle componenti orizzontali di spostamento evidenzia un allontanamento dal centro dell'area sia per il Cluster-B che per il Cluster-C. Sul Cluster-B (figura 4.6) i gruppi di PS posti ad ovest di questo centro, si allontanano da esso in concomitanza con l'iniezione (in figura 4.6, trend verso valori più positivi in ordinata indicano movimento verso est), così come i PS ad est con andamento opposto, leggermente positivo, si muovono verso est. Va inoltre osservato che:

- le serie di spostamenti orizzontali dei punti posti al centro del Cluster-B (linea verde in figura 4.6) mostrano un continuo e costante spostamento verso est a partire dal 2021 (+ 3mm/anno verso est);
- i massimi e minimi relativi nelle serie di spostamenti orizzontali dei punti ad est ed ovest del centro del Cluster-B non appaiono sempre in fase tra di loro (nell'ultimo semestre l'inversione degli spostamenti orizzontali dei PS ad ovest anticipa quella dei PS a est, contrariamente a quanto generalmente verificatosi finora), e non sono in fase con gli andamenti dei volumi (le inversioni di trend talvolta anticipano e talvolta seguono le inversioni dei cicli di iniezione/erogazione).

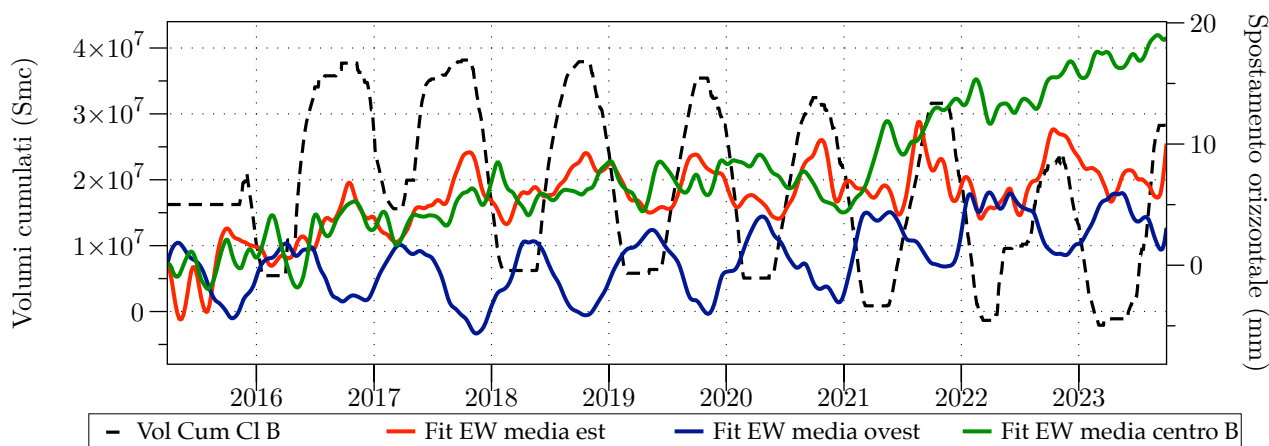


Figura 4.6: Serie temporali di spostamento orizzontale dei bersagli radar Sentinel-1 che hanno mostrato massimi movimenti nel semestre aprile-settembre 2023, nella zona centrale e meridionale del Cluster-B (cerchio blu in fig. 4.2); in rosso la media degli spostamenti dei PS ad est A3ZHGZ6, A3YW1DF, A419RSM rispetto alla cono di sollevamento; in verde la media degli spostamenti dei PS più centrali all'interno del cluster A448XT5, A4322LO, A4322LP; in blu la media degli spostamenti dei PS ad ovest al cono di sollevamento A419RRP, A40OC5Y, A41V7DI.

Per quanto riguarda il Cluster-C, in figura 4.7 gli spostamenti positivi indicano movimento verso est, quelli negativi verso ovest. Le serie temporali di spostamento orizzontale dei bersagli radar localizzati nel centro ed ai margini orientale ed occidentale del reservoir mostrano come:

- la media degli spostamenti di bersagli situati nella zona orientale (quadrato azzurro in Fig. 4.2) abbia valore positivo fino a $\approx + 8$ mm, e descriva dunque un allontanamento (verso est) dal centro del reservoir;
- la media degli spostamenti di bersagli situati nella zona occidentale (quadrato viola in Fig. 4.2) abbia valore negativo fino a $\approx - 5$ mm, e descriva dunque un allontanamento (verso ovest) dal centro del reservoir;
- la media degli spostamenti di bersagli situati nella zona centrale a ridosso delle stazioni GPS CLS2 e SP04 (quadrato giallo in Fig. 4.2), poste leggermente a sud-ovest del centro del Cluster-C, abbia valori negativi fino a $\approx - 8$ mm, e descriva dunque un allontanamento (verso ovest) dal centro del reservoir.

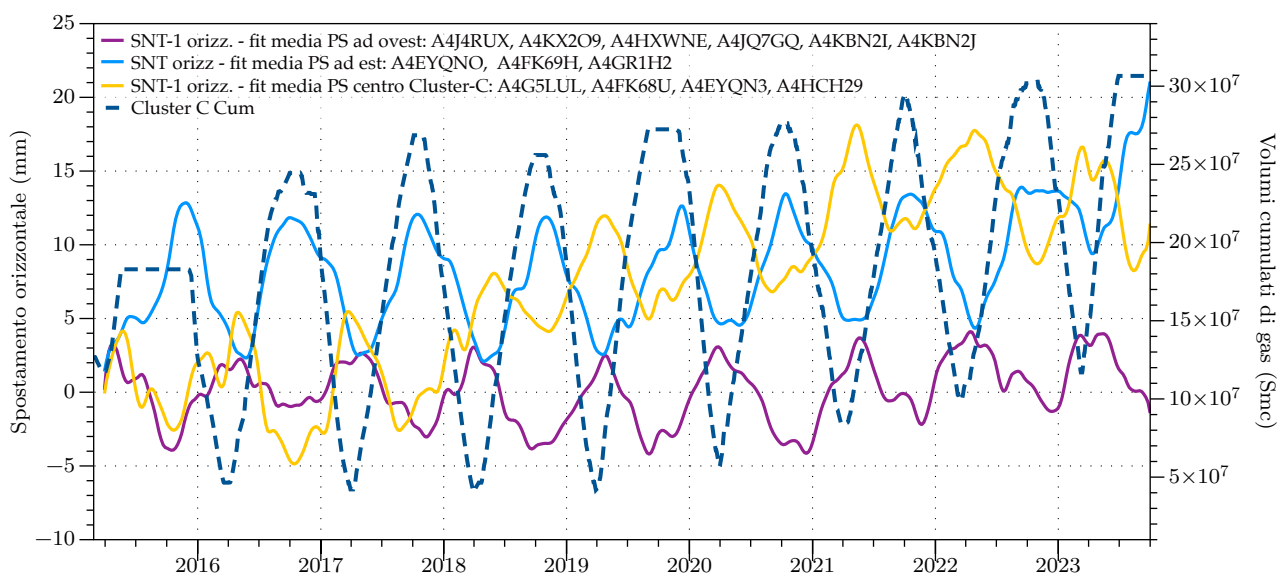


Figura 4.7: Confronto degli spostamenti orizzontali medi di gruppi di PS localizzati al centro del reservoir e in zone ad est e ad ovest di esso (box azzurro, giallo e viola in Fig. 4.2); in azzurro media degli spostamenti di PS situati ad est del centro; in giallo dei PS al centro; in viola di PS situati ad ovest del centro.

La deformazione sia verticale che orizzontale appare meglio distribuita e confinata al di sopra del Cluster-C. Sul Cluster-B la deformazione risulta arealmente meno confinata e più estesa a porzioni di territorio poste a sud dell'area di influenza del campo.

4.2 Analisi delle serie interferometriche sul Cluster A in relazione alla movimentazione di gas

Le serie temporali analizzate da TRE ALTAMIRA ed aggiornate al 01/10/23 evidenziano nell'area del giacimento di San Potito la presenza di movimenti differenziali di entità molto limitata, con velocità medie contenute entro pochi mm/anno. Esse sono state ulteriormente elaborate per meglio definire e visualizzare i trend di deformazione nell'intorno dell'impianto di stoccaggio di San Potito, Cluster-A.

La superficie, che interpola gli spostamenti verticali subiti dai bersagli radar durante i 6 mesi della fase di iniezione aprile-settembre 2023 nel Cluster-A (≈ 56.7 MSmc, Fig. 4.8), mostra le deformazioni del terreno nell'area del reservoir. La stima della variabile Z (spostamento verticale nel semestre di iniezione) è stata effettuata con la stessa tecnica descritta per la figura 4.1 (si veda par. 4.1). Anche in questo caso, il risultato dell'interpolazione elimina i massimi di deformazione raggiunti dai singoli PS (si vedano figs 4.10 - 4.11), descrivendo una deformazione mediata del terreno, ma sicuramente più omogenea e realistica.

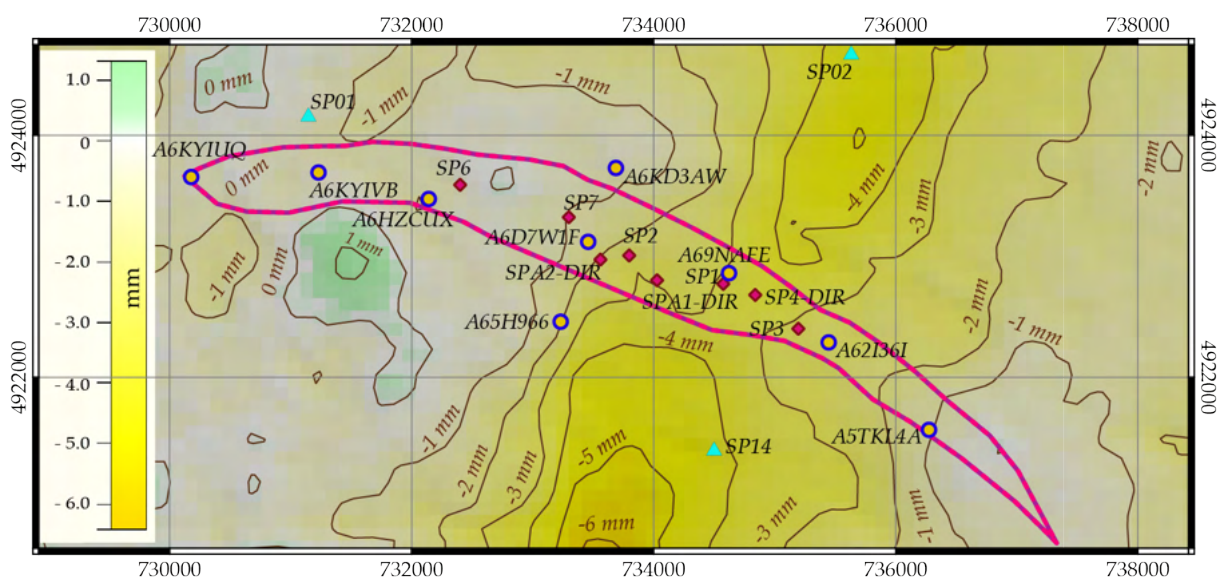


Figura 4.8: Superficie di spostamento verticale ottenuta tramite la serie temporale Sentinel-1: l'interpolazione utilizza lo spostamento cumulato da ogni bersaglio radar durante l'ultima fase di iniezione tra aprile e settembre 2023.

Così come operato per i Cluster B e C a Cotignola, vengono qui di seguito proposte due tipologie di analisi del dato interferometrico:

- 1) la proiezione dei valori di spostamento (avvenuti tra l'inizio e la fine di ciascuna delle fasi di iniezione ed erogazione dello stoccaggio) dei 9 bersagli radar scelti come punti di controllo per la modellazione geomeccanica, proiettati lungo 2 sezioni (CC' e DD' in figura 4.9), che permettono di visualizzare e controllare l'entità delle deformazioni in tutte le aree del reservoir.

- 2) l'analisi della serie temporali dei PS A6D7W1F, A6DTBN4, A68GF75, A6EER91, A68GF7C distribuiti nell'intorno del pozzo direzionato San Potito A2-DIR (cerchio arancio nella mappa di Fig. 4.9 e Fig. 4.12), perforato sulla culminazione strutturale del reservoir di San Potito.

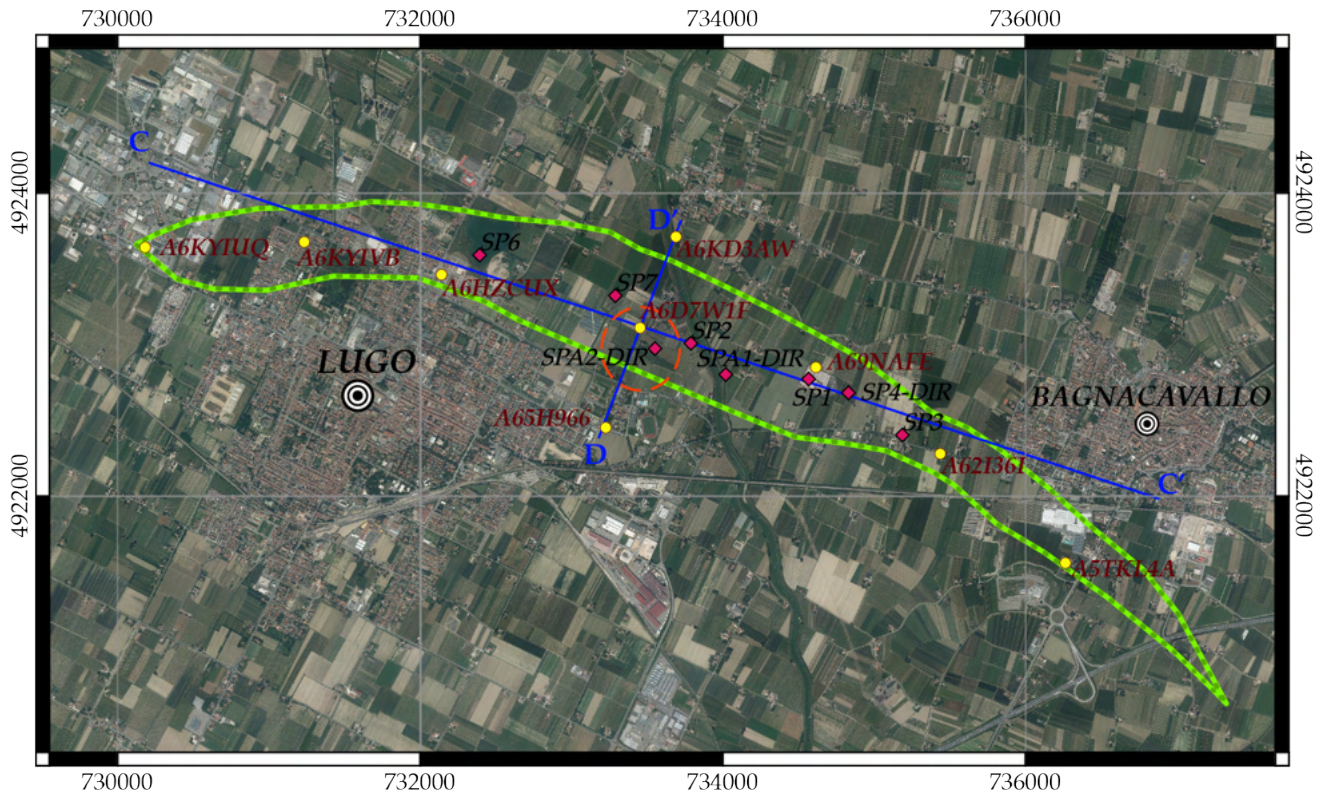


Figura 4.9: Mappa della proiezione in superficie del top del giacimento di San Potito, con la posizione dei fondo pozzo in fucsia; in giallo i bersagli radar della serie Sentinel-1 aggiornata al 01/10/23, i cui spostamenti sono stati proiettati lungo i profili CC' e DD' per creare le figure 4.10 e 4.11: essi sono 9 dei 12 bersagli utilizzati come punti di controllo nella modellizzazione geomeccanica dell'area di San Potito; il cerchio arancio delimita l'area in cui ricadono i bersagli radar analizzati in figura 4.12.

Le figure 4.10 e 4.11 analizzano il comportamento dei 9 bersagli radar scelti come riferimento per la modellazione geomeccanica. Dalle figure 4.10 e 4.11 si può osservare come, durante le fasi di iniezione ed erogazione analizzate, gli spostamenti dei 9 bersagli radar della serie Sentinel-1 proiettati lungo i profili CC' e DD', abbiano mediamente valori contenuti entro ± 4 mm tra una fase e l'altra, con massimi fino a $+ 7.5$ e $- 6.5$ mm. Ad eccezione del PS A69NAFE, che in questo semestre di iniezione registra un sollevamento fino a $+ 8$ mm (nuovo massimo registrato), discostandosi significativamente dal comportamento finora registrato, non si evidenziano altre variazioni significative negli andamenti degli spostamenti verticali lungo il profilo longitudinale. Il PS A6HZCUX, posizionato a ≈ 2070 m lungo il profilo CC', continua ad essere (vedi precedente documento "Report14004COT01-GEOPH-EDIS0-DV22-REV00") quello più stabile con variazioni di quota topografica

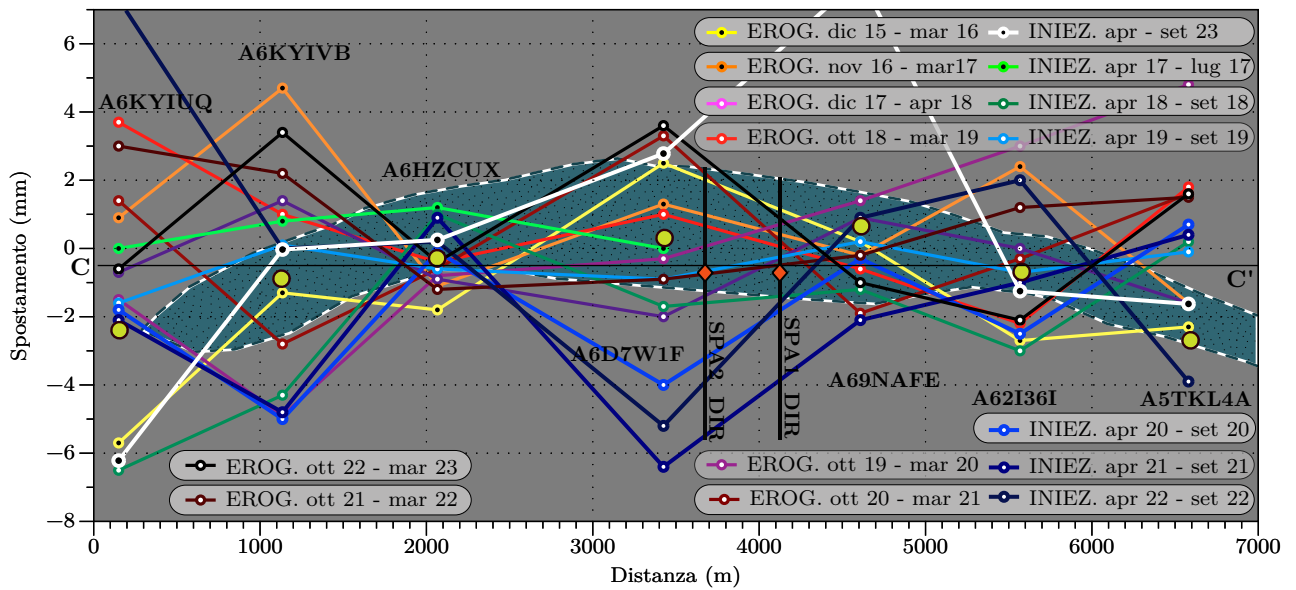


Figura 4.10: Spostamenti di 7 dei 9 bersagli radar di controllo per la modellazione geomeccanica, proiettati lungo la sezione CC' (mappa di Fig. 4.9); in azzurro verde e blu gli spostamenti avvenuti durante le fasi di iniezione; in giallo - bordeaux quelli durante le fasi di erogazione: le serie sono riportate a zero all'inizio di ogni fase. Le linee nere localizzano i pozzi San Potito A1-DIR e A2-DIR. In color ottanio l'area del reservoir messa in pianta per visualizzare la posizione dei 9 bersagli rispetto ad essa: la mappa e la posizione dei bersagli di riferimento (punti giallo/bordeaux) sono ruotate di pochi gradi verso NW per sovrapporre la sezione CC' all'asse delle ascisse della figura.

contenute tra + 1 e - 2 mm avvenute durante ciascuna fase di stoccaggio (Fig. 4.10).

Il PS A6D7W1F, posto nella porzione più centrale del campo (Figs. 4.10 e 4.11), mostra spostamenti contenuti tra + 3 e - 4 mm durante le fasi di iniezione e di erogazione (con minimi fino a - 5 mm e fino a - 6 mm durante l'ultima e la penultima fase di iniezione, rispettivamente). Tali spostamenti non appaiono però influenzati dall'attività di stoccaggio in maniera univoca, non coincidendo sempre la risposta attesa rispetto al tipo di fase di movimentazione di gas: per esempio A6D7W1F va in sollevamento di 3.6 mm, in disaccordo con la fase di erogazione ottobre 2022 - marzo 2023 (così come nell'anno precedente ottobre 2021 - marzo 2022); nel semestre precedente si era invece abbassato di -5 mm, in disaccordo con la fase di iniezione.

Anche tutti gli altri PS non mostrano una evidente corrispondenza tra la tipologia di fase di stoccaggio ed il tipo di spostamento avvenuto, con sollevamento e subsidenza che avvengono entrambi sia durante l'erogazione che durante l'iniezione, con entità comprese tra $\approx + 8$ e - 6 mm.

Osservando l'andamento della serie temporale media dei bersagli radar A6D7W1F, A6DTBN4, A68GF75, A6EER91, A68GF7C, i cinque PS più adiacenti al pozzo San Potito A2 DIR, sulla culminazione strutturale del Cluster-A (Fig. 4.12) si nota, nel periodo che coincide con l'iniezione di gas nel Cluster-A (aprile-settembre 2023) un comportamento non lineare degli spostamenti, che registrano un iniziale abbassamento, di entità media

attorno ai $\approx 4-5$ mm, seguiti da un sollevamento di entità simile, a partire da inizio giugno 2023. Nell'ultima parte del semestre, a iniezione ancora in corso, si nota nuovamente un abbassamento dei PS ($\approx 4-5$ mm) che portano la quota media di questi PS a registrare un abbassamento cumulato da marzo 2015 (inizio monitoraggio Sentinel-1) di -12 mm, con media di ≈ -1.4 mm/anno.

Nel semestre in esame, gli spostamenti verticali registrati nell'area di San Potito risultano dunque non correlabili con la movimentazione di gas operata nel giacimento, né in termini spaziali, né temporali.

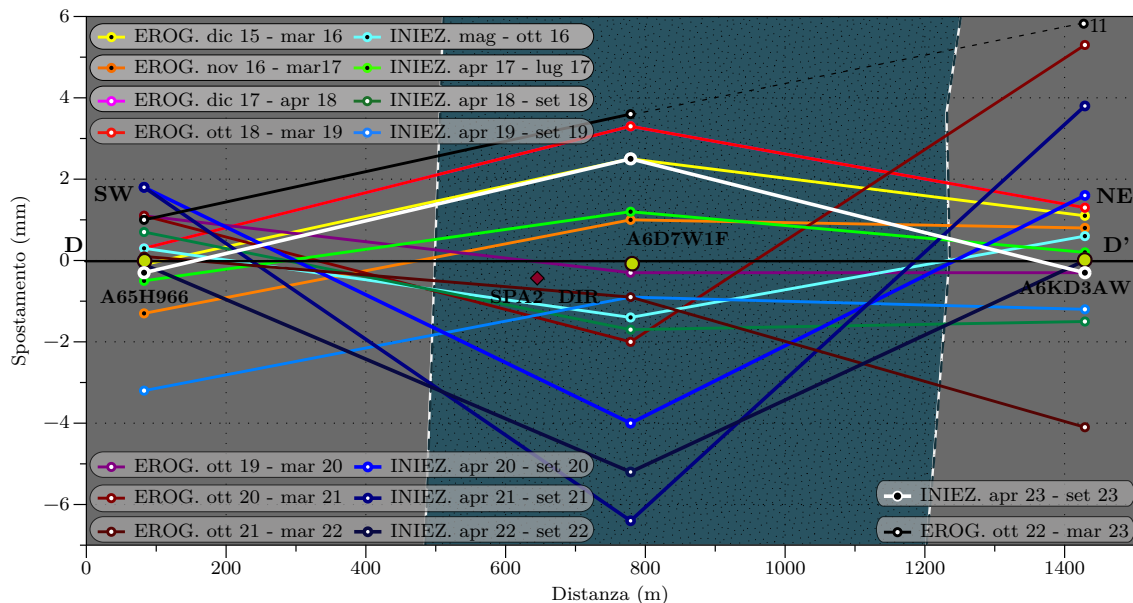


Figura 4.11: Spostamenti di 3 dei 9 bersagli radar di controllo per la modellazione geomeccanica, proiettati lungo la sezione DD' (mappa di Fig. 4.9); in azzurro, verde e blu gli spostamenti avvenuti durante le fasi di iniezione; in giallo - bordeaux quelli durante le fasi di erogazione: le serie sono riportate a zero all'inizio di ogni fase. In color ottanio l'area del reservoir messa in pianta per visualizzare la posizione dei 9 bersagli rispetto ad essa: la mappa e la posizione dei bersagli di riferimento (in giallo/bordeaux) sono ruotate di ≈ 70 gradi verso E, per sovrapporre la sezione DD' all'asse delle ascisse della figura.

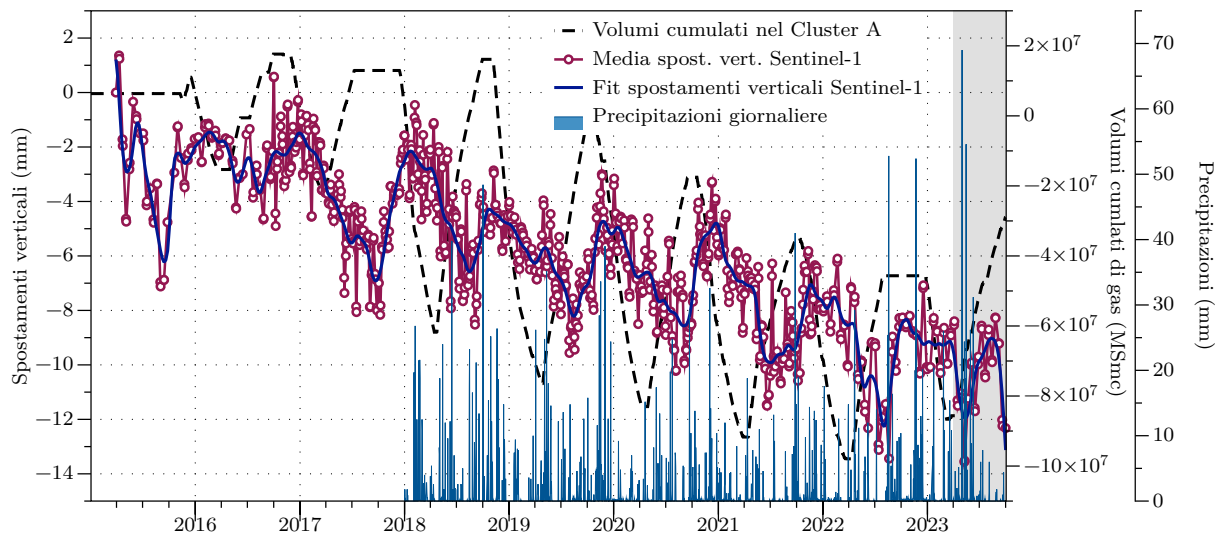


Figura 4.12: Serie temporale di spostamento medio dei cinque bersagli radar A6D7W1F, A6DTBN4, A68GF75, A6EER91, A68GF7C che circondano il pozzo San Potito A2 DIR (cerchio arancio in figura 4.9), al di sopra della culminazione strutturale del giacimento, in relazione alla movimentazione di gas ed alle precipitazioni.

5 Relazione di tutto il sistema di monitoraggio con la movimentazione di gas

Il comportamento degli strumenti profondi, in relazione alla movimentazione di gas nello stoccaggio durante l'ultimo semestre monitorato, viene descritto nelle figure 5.1 e 5.2.

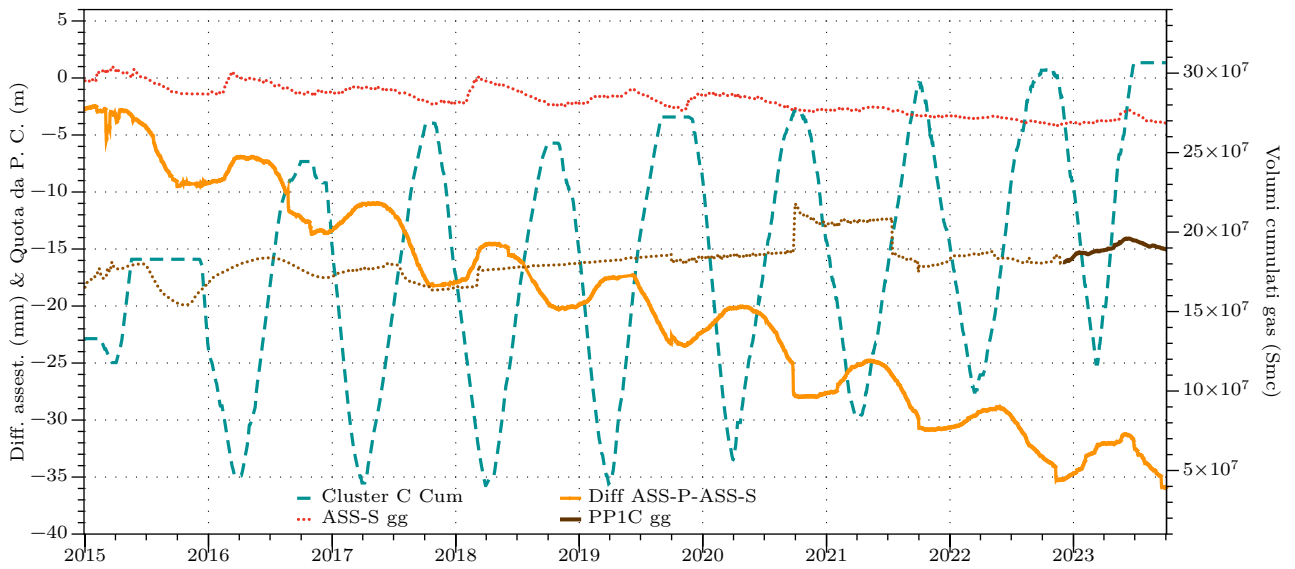


Figura 5.1: Andamento degli strumenti profondi in relazione alla movimentazione di gas nel reservoir del Cluster-C per tutto il periodo di monitoraggio. In arancio la curva che descrive la componente profonda della deformazione, ottenuta dalla differenza degli spostamenti di ASS-P meno quelli di ASS-S.

Da dicembre 2022, i dati mostrati nel presente report (linea marrone continua nelle figure 5.1 e 5.2) provengono dal nuovo piezometro profondo completato tra ottobre e novembre 2022 che, perforato a pochi metri dal precedente e nello stesso intervallo stratigrafico, investiga la stessa falda. In questo semestre, non si evidenziano sostanziali variazioni riguardo la compattazione complessiva dei sedimenti profondi fino a 350 m (≈ -3.6 mm/anno, curva arancio in Fig. 5.1: risalita della curva = dilatazione, discesa della curva = compattazione). Si osserva nel semestre un trend di contenuta compattazione, inversamente correlato all'andamento dei volumi nel cluster, che mostra oscillazioni di ampiezza confrontabili, anche se leggermente inferiori rispetto ad altri intervalli già misurati per i precedenti semestri di monitoraggio. Le oscillazioni non mostrano una chiara proporzionalità tra la loro ampiezza ed il quantitativo di gas movimentato nello stoccaggio, ma meglio si correlano alle dinamiche idrogeologiche, stagionali della colonna di sedimenti investigata, come dimostrato dal fatto che nell'ultimo semestre, si osservano dilatazioni consistenti (in controtendenza con gli altri semestri monitorati) in corrispondenza delle eccezionali precipitazioni che hanno colpito la zona a maggio - giugno 2023.

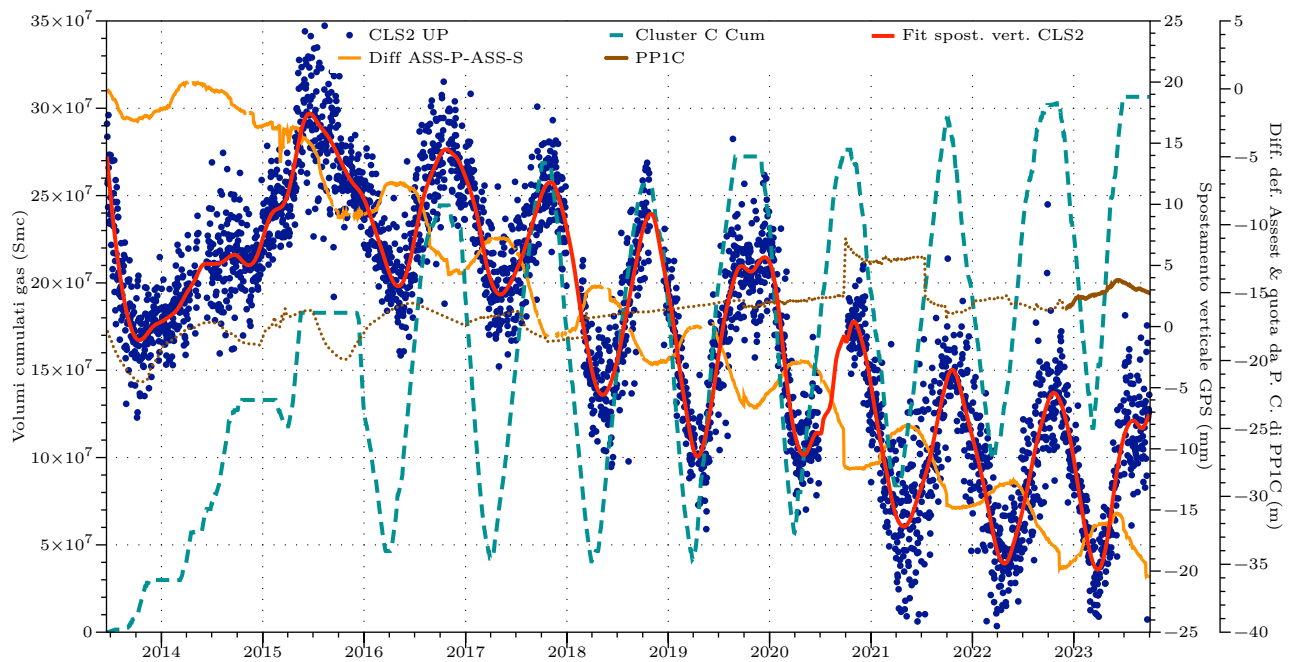


Figura 5.2: Confronto tra la serie temporale delle posizioni della stazione GPS CLS2 (componente verticale) con la movimentazione di gas nel Cluster-C, con l'andamento del piezometro profondo e con quello della differenza tra le misure degli assestimetri.

Anche nel semestre in esame, gli andamenti verticali delle serie GPS delle stazioni CLS2 (punti blu in figura 5.2 e linea rossa in figura 5.2 e 5.3) e SP04 (tratteggio arancio in figura 5.3), seguono i cambi di attività dello stoccaggio (iniezione/erogazione). Da aprile a settembre 2023, la stazione CLS2 registra un sollevamento medio di $\approx +13$ mm a fronte dell'iniezione di ≈ 153.48 Msmc nel Cluster-C; per la stazione a singola frequenza SP04 si registra invece un sollevamento più che doppio, pari a $\approx +36$ mm. Tale differenza nei soli valori assoluti della deformazione registrata (le inversioni dei trend sono infatti sincrone) può essere dovuta sia alle eccezionali precipitazioni avvenute durante l'alluvione maggio - giugno 2023, che a qualche perturbazione dovuta ad un cantiere in atto nelle zona dove il rover SP04, installato su un treppiede, è ubicato. In generale, permane comunque un'assenza di proporzionalità diretta tra quantitativi di gas movimentati ed ampiezza dei sollevamenti/abbassamenti registrati dalla componente verticale dei GPS sul Cluster-C.

Va inoltre evidenziato come, sebbene le oscillazioni di CLS2 rimangano di entità costante nel tempo, a partire dal 2016 si evidenzia un generale trend di subsidenza della stazione con velocità che arrivano a ≈ -3.7 mm/anno, valore confrontabile con quelli di subsidenza misurati in quest'area dell'Emilia Romagna e di entità pari alla compattazione registrata dall'assestometro profondo ≈ -3.6 mm/anno.

Come già esplicitato all'autorità regionale attraverso comunicazioni scritte relative ai report precedenti, è importante evidenziare che durante un tipico ciclo di stoccaggio iniezione/erogazione la stazione GPS e l'assestometro

hanno comportamenti inversi, che significa segno opposto dei trend misurati dai due diversi strumenti. Ad esempio, nella fase estiva di iniezione 2020 il GPS si solleva mediamente di 15 mm, mentre l'assestometro si compatta di ≈ 7 mm (grafico A, fig. 5.8): questo significa che se non vi fosse compattazione nei primi 350 m, il GPS salirebbe di 22 mm. Non è quindi un caso che entrambi gli strumenti, nonostante le metodologie diverse, restituiscano valori di subsidenza non solo confrontabili, ma pressoché identici. Tali valori, non sono valori in linea con quelli della naturale subsidenza tettonica della Pianura Padana (che come noto varia a seconda che ci si trovi al di sopra di anticlinali o sinclinali sepolte sotto la pianura stessa, rimanendo comunque sempre al di sotto di 1 mm/anno), e di conseguenza sottolineano l'esistenza di processi di natura antropica. Presso il Cluster-C, i nostri strumenti stanno probabilmente dicendo che tutta la componente di compattazione si esaurisce nei primi 350 m, altrimenti la serie GPS rimossa della serie assestimetrica avrebbe ancora pendenza negativa e non piatta come da grafico B (fig. 5.8). È difficile ipotizzare che la subsidenza tettonica (< 1 mm/anno) si esaurisca nei primi 350 m, ma va rimarcato che essendo il valore della subsidenza che qui registriamo quasi il quadruplo, essa è almeno per 3/4 frutto di una compattazione di tipo antropico, indotta verosimilmente dall'emungimento d'acqua, che è probabile si esaurisca nei primi 350 m, se non prima. A supporto di tale ipotesi, la compattazione residua dell'assestometro superficiale (3.9 mm) dice che i primi 10 m della colonna investigata sono responsabili già del 10% della compattazione misurata nei 350 m (39.9 mm), ovvero che il 3% dello spessore della colonna è responsabile di circa il 10% della deformazione. È da notare come la serie GPS rimossa della deformazione della differenza degli assestimetri (grafico B, fig. 5.8) e che dunque riguarda solo lo spessore al di sotto dei 350 m, oltre ad avere trend piatto, mostra oscillazioni più ampie e soprattutto mostra ancora meglio di avere andamento identico, perfettamente sincrono, alla movimentazione di gas (grafico C, fig. 5.8). Alla luce di quanto discusso, l'assestometro profondo installato presso il Cluster-C risulta essere uno strumento fondamentale per discriminare la componente antropica della subsidenza, rispetto alla quale lo stoccaggio di gas risulta comunque essere completamente estraneo.

Il confronto tra l'andamento del dato GPS e le serie InSAR evidenzia ancora una volta un buon accordo tra gli spostamenti registrati tramite le due tecniche di monitoraggio, sempre in linea con la movimentazione di gas a partire dal 2016. L'analisi dei PS intorno alla stazione GPS CLS2 mostra valori di sostanziale accordo tra le 2 tecniche:

- l'antenna GPS a doppia frequenza CLS2 registra un sollevamento medio di + 13 mm nel semestre, mentre quella a singola frequenza SP04 + 36 mm;
- i valori di spostamento verticale mediati per i PS posti al centro del cluster-C descrivono un sollevamento di $\approx + 19$ mm.

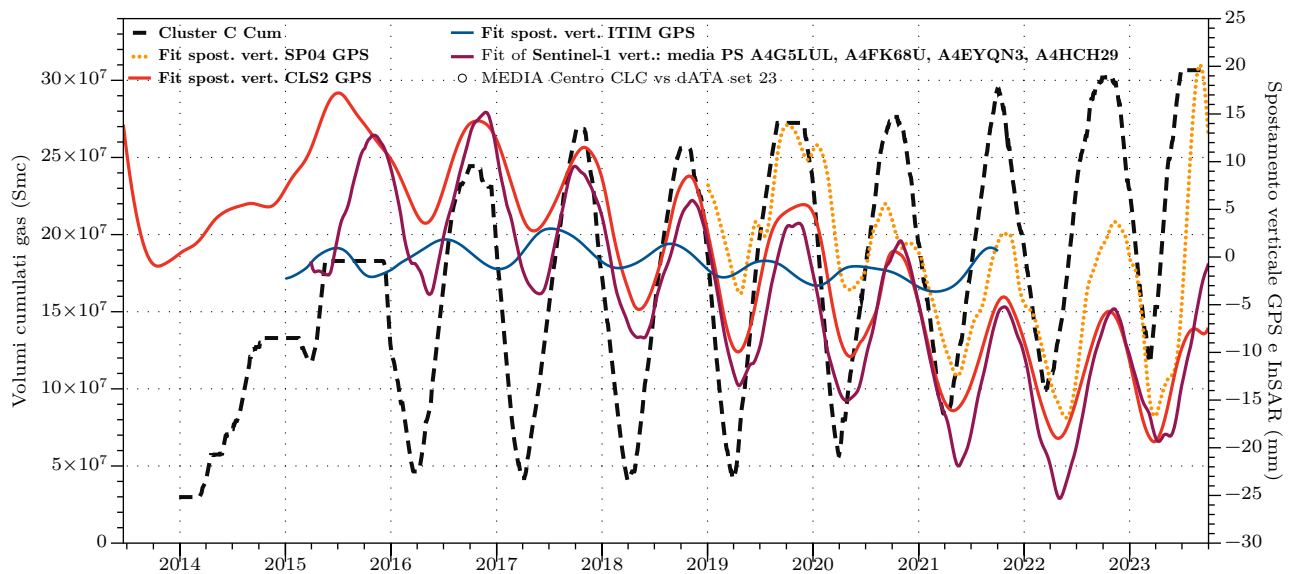


Figura 5.3: Confronto tra la serie temporale degli spostamenti della stazione GPS (componente verticale) con la movimentazione di gas nel Cluster-C, con la serie Sentinel-1 al 30 settembre 2023 e con la serie temporale GPS della stazione ITIM.

- dal 2016 (stoccaggio a regime) la serie Sentinel-1 evidenzia un complessivo andamento di subsidenza (- 3.5 mm/anno) che si discosta di poco dalla serie GPS ($\approx - 3.7$ mm/anno, negli ultimi 7.5 anni)

La serie temporale di SP04 ha fino a questo semestre mostrato un buon accordo con l'entità degli spostamenti della serie media dei 4 PS individuati al centro del Cluster-C, e con i tempi dei cicli di stoccaggio (Figs 5.3 e 5.4). Durante l'ultima fase di iniezione, si registra un sollevamento di entità maggiore (+ 36 mm) probabilmente dovuto alla dilatazione superficiale dei sedimenti (alluvione maggio - giugno 2023) sui quali il treppiede del rover è vincolato.

In questo semestre la serie temporale GPS di SP05 risulta in disaccordo con lo spostamento complessivo misurato dalle serie temporali dei PS A4EDB2U e A4DRVH1 (localizzati rispettivamente a ≈ 25 metri NE e ≈ 45 m SO da essa): SP05 accumula infatti a fine semestre un sollevamento di + 2 mm, mentre la deformazione media della componente verticale InSAR dei 2 PS descrive un abbassamento di $\approx - 4$ mm (Fig. 5.5).

La serie temporale di SP01, mostra disaccordo sia con la fase di iniezione di gas dallo stoccaggio, che con l'andamento della serie temporale dei PS B7EUW5G e A6QWUX6 (posizionati ≈ 49 metri a nord di essa e ≈ 200 metri ad est di essa, rispettivamente); nel semestre di iniezione in esame infatti SP01 si abbassa di $\approx - 4$ mm, mentre B7EUW5G e A6QWUX6 accumulano una deformazione verticale di $\approx + 3$ mm e $\approx + 2$ mm (Fig. 5.6).

Nel caso delle serie interferometriche l'ampiezza degli spostamenti non si discosta in maniera significativa da quelle già osservate per altri periodi di iniezione; per i dati GPS, l'entità degli sollevamento di SP04 risulta

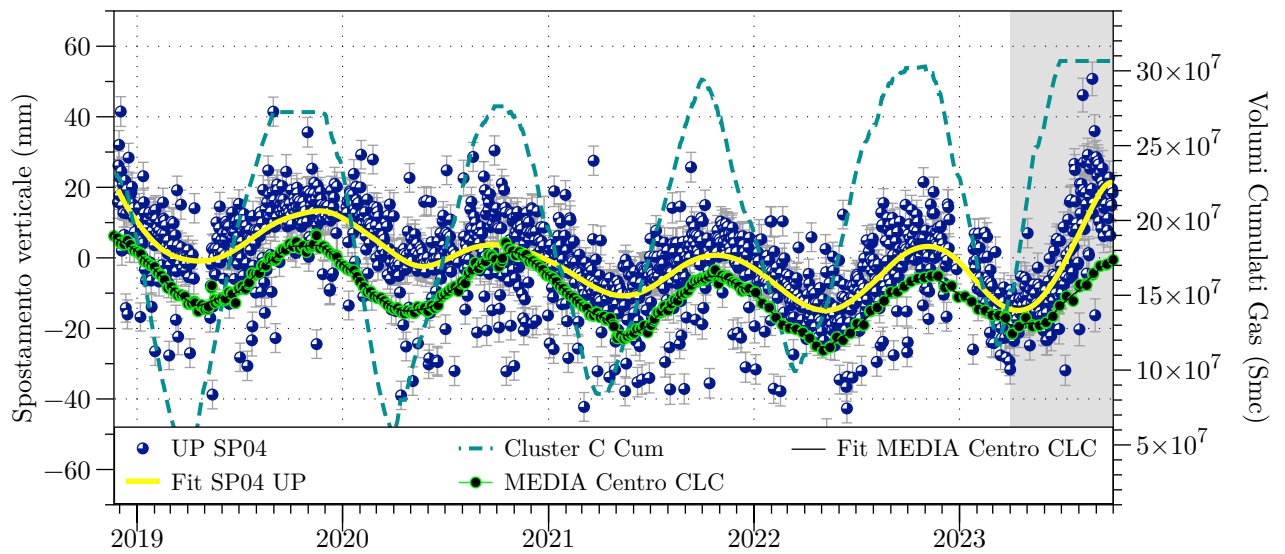


Figura 5.4: Confronto tra la serie temporale delle posizioni della stazione GNSS SP04 (componente verticale, da cui è stato rimosso il moto di SP12) con la movimentazione di gas nel Cluster-C e con le serie Sentinel-1 (media dei 4 punti al centro del Cluster-C), al 30 settembre 2023.

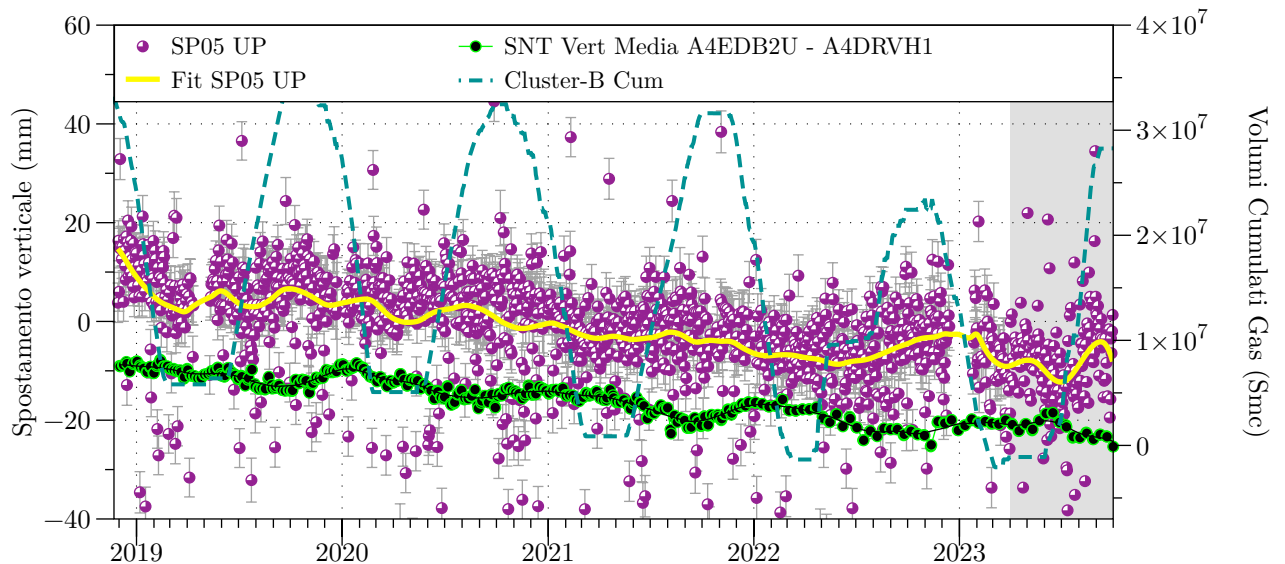


Figura 5.5: Confronto tra la serie temporale delle posizioni della stazione GNSS SP05 (componente verticale, corretta rispetto agli spostamenti di SP12) con la movimentazione di gas nel Cluster-B e con la media delle serie verticali Sentinel-1 dei PS A4EDB2U, A4DRVH1 posizionati rispettivamente a ≈ 25 m NE e 45 m SO da essa, al 30 settembre 2023.

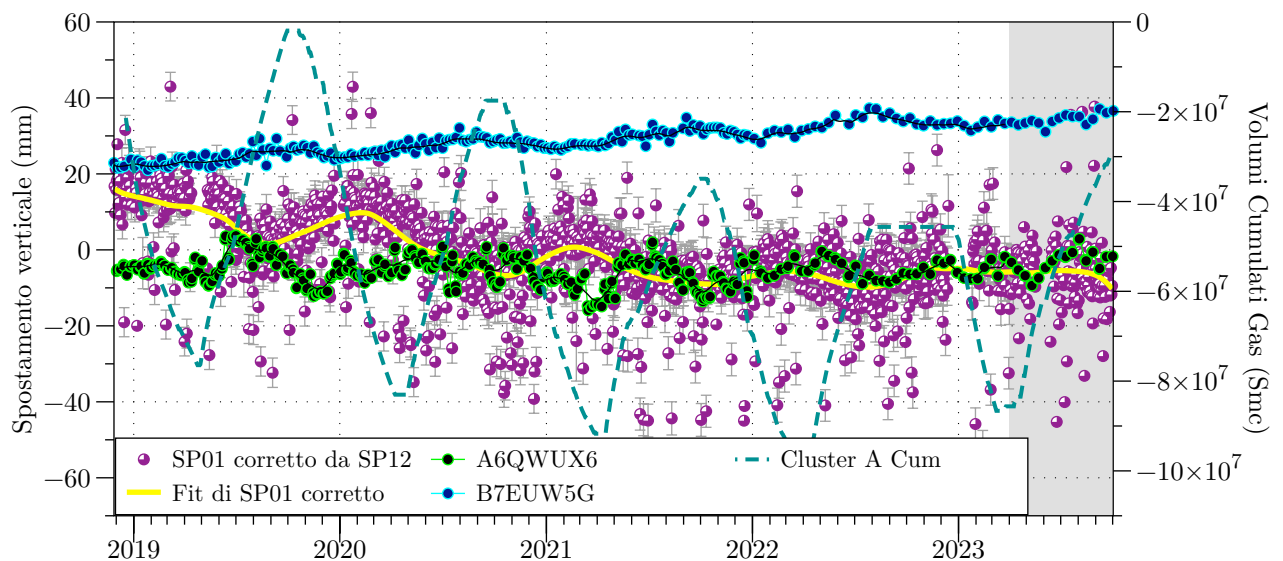


Figura 5.6: Confronto tra la serie temporale delle posizioni della stazione GNSS SP01 (componente verticale, corretta rispetto agli spostamenti di SP12) con la movimentazione di gas nel Cluster-A e con le serie Sentinel-1 ascendente (PS B7EUW5G posizionato a ≈ 49 m da SP01) e verticale (PS A6QWUX6 posizionato a ≈ 220 m E di SP01) al 30 settembre 2023.

leggermente maggiore rispetto al passato, per motivi da comprendere e risolvere nel prossimo report.

Allo stato attuale del monitoraggio, non è dunque verificata una proporzionalità tra quantitativo di gas movimentato e abbassamenti/sollevamenti registrati tramite interferometria.

Così come nei semestri precedenti, le componenti orizzontali di spostamento GPS evidenziano una buona correlazione con la attività di iniezione/estrazione nel Cluster-C (Fig. 5.7): essi quantificano in maniera più significativa, rispetto alla componente verticale, l'effetto subito dalle stazioni CLS2 e SP04 a seguito della movimentazione di gas, poiché quasi non affetti da oscillazioni legate alla stagionalità. Nel semestre in esame, sulla base dei dati di CLS2, si verifica uno spostamento negativo sia lungo la componente Est (≈ -7 mm) che lungo quella Nord (≈ -1 mm): la composizione di tale moto restituisce uno spostamento che allontana la stazione dal centro del Cluster-C di ≈ 7 mm in direzione est. Anche la stazione SP04 registra spostamenti negativi lungo la componente Est del moto, che la allontanano dal centro del reservoir (≈ -13 mm); lungo la componente Nord invece, una oscillazione non accumula spostamento effettivo nel semestre. Un allontanamento viene registrato anche dai bersagli radar Sentinel-1 individuati attorno alla stazione CLS2 (≈ -5 mm verso Ovest): come si vede in figura 5.7, la serie temporale di spostamento orizzontale Sentinel-1 (curva verde e fit verde) ha infatti andamento che negli ultimi 4 anni mima quasi esattamente la componente Est della serie GPS di CLS2 e SP04 (punti rossi e curva fit rossa; curva fit viola).

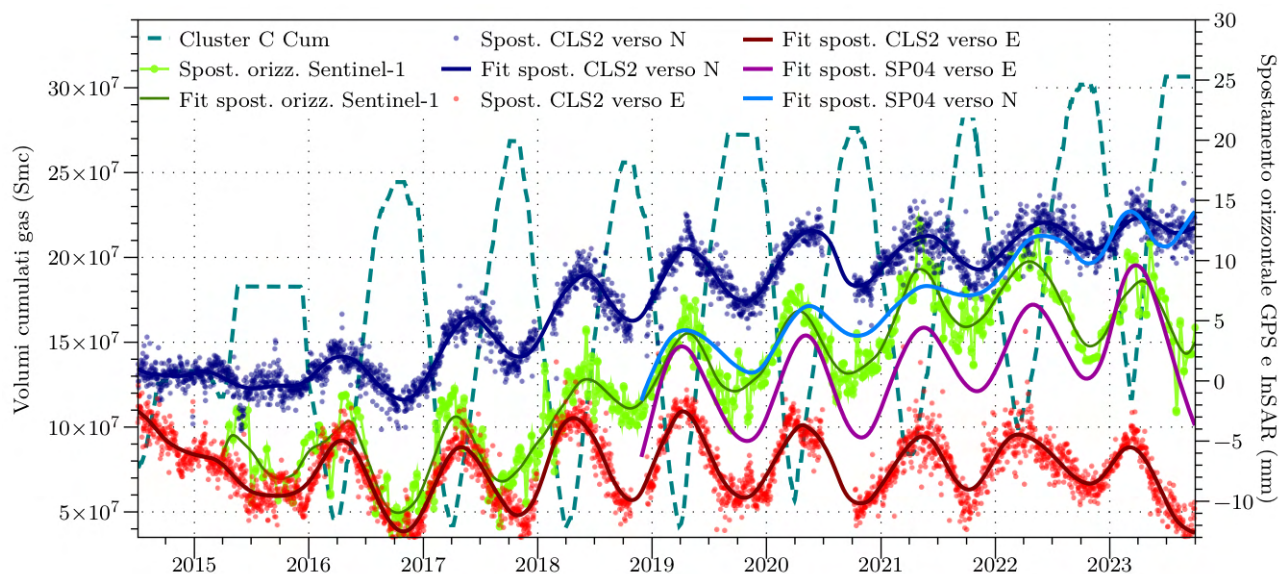


Figura 5.7: Confronto tra la serie temporali delle posizioni GPS orizzontali delle stazioni CLS2 e SP04 con la movimentazione di gas nel Cluster-C. Gli spostamenti sono riferiti alla placca Adria, allo scopo di eliminare la componente crostale del moto; in rosso la componente est e in blu la componente nord di CLS2; in azzurro la componente nord di SP04, e in viola la sua componente est; in verde chiaro lo spostamento orizzontale medio dei bersagli radar Sentinel-1 limitrofi alla stazione CLS2.

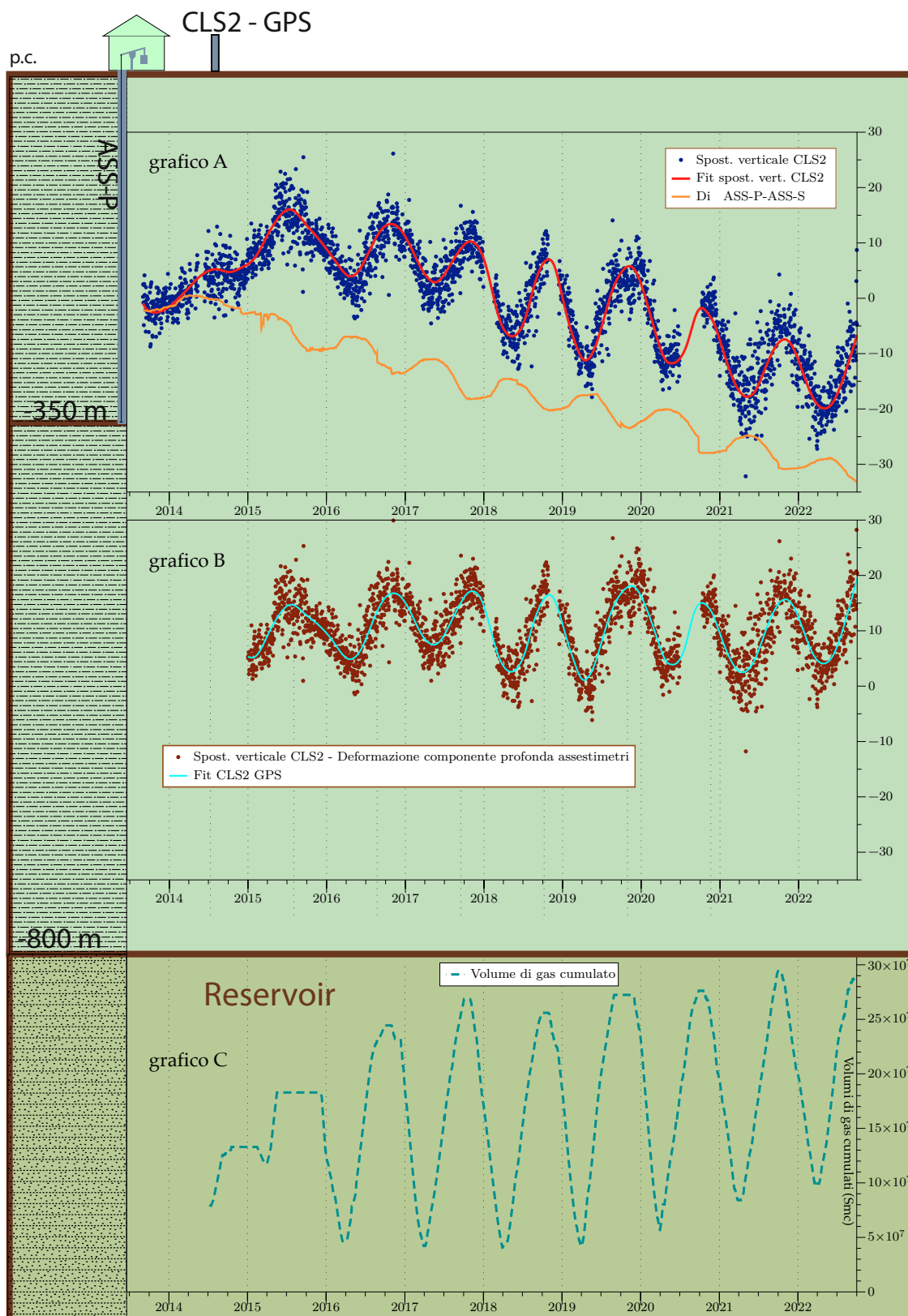


Figura 5.8: Schema esplicativo della distribuzione delle componenti deformative investigate dagli strumenti nel sottosuolo al di sotto del Cluster-C e nel reservoir Pool-C.

6 Conclusioni

A fine settembre 2023 la strumentazione installata presso il Cluster-C continua ad essere funzionante.

Da dicembre 2022, vengono acquisiti i dati del nuovo piezometro profondo, perforato tra ottobre e novembre 2022 vicino a PP1C nello stesso intervallo stratigrafico per investigare lo stesso acquifero.

Nel Cluster-A sono stati iniettati 56725544 Smc (≈ 56.7 MSmc) a partire dal 10 aprile 2023, con una media giornaliera di 324146 Smc/gg.

Nel Cluster-B sono stati iniettati 29411363 Smc (≈ 29.4 MSmc) a partire dal 10 aprile 2023, con una media giornaliera di 168065 Smc/gg.

Nel Cluster-C sono stati iniettati 153482215 Smc (≈ 153.5 MSmc) tra il 7 aprile ed il 29 giugno 2023, con una media di 1827169 Smc/gg (1.8 MSmc/gg).

La stazione GPS CLS2 ha qualità del dato (valori di MP1 e MP2) sufficiente ad essere considerata attendibile, in linea con quanto indicato dall'IGS per una stazione di buona qualità, ed è in grado di fornire risultati da considerare significativi, data la lunghezza raggiunta dalla sua serie temporale (10.3 anni). La stima della componente verticale degli spostamenti della serie GPS restituisce valori con velocità media in abbassamento di ≈ -2.475 mm/anno, da inizio monitoraggio, con trend più evidente a partire dal 2015. Negli ultimi 8 anni si assiste infatti ad una accelerazione della subsidenza, attestatasi a ≈ -3.7 mm/anno. Gli spostamenti nella componente verticale di CLS2 ed SP04 mostrano andamento correlabile con l'iniezione cumulata tra aprile e settembre 2023 ($\approx +13$ mm CLS2 e $+36$ mm SP04); tuttavia i valori delle oscillazioni osservate nel semestre non si discostano significativamente da quelli già osservati in conseguenza di fenomeni annuali/stagionali legati principalmente alle dinamiche del carico idrologico superficiale (periodi antecedenti dicembre 2015).

Le serie temporali delle componenti orizzontali di CLS2 ed SP04 si correlano anch'esse con l'attività di iniezione, registrando uno spostamento verso ovest di ≈ 7 mm e 13 mm per CLS2 e SP04 rispettivamente, in allontanamento dal centro del Pool CC1 (Cluster-C).

La nuova stazione GNSS SP12 funziona da 4.8 anni ed anche i suoi valori di MP1 e MP2 sono in linea con gli standard IGS di una stazione di buona qualità. La lunghezza della sua serie temporale è ritenuta sufficiente dalla comunità scientifica per ottenere una stima realistica delle velocità medie di spostamento attese localmente: riportiamo la stima della velocità verticale che è pari a ≈ -6.716 mm/anno.

Le stazioni rover GNSS a singola frequenza sono attive da 4.8 anni: i loro spostamenti GPS calcolati rispetto a SP12 risultano affetti dai movimenti anomali di quest'ultima avvenuti nei semestri precedenti. Per tale motivo, il moto di SP12 è stato considerato e rimosso dalle serie temporali delle stazioni a singola frequenza, per meglio confrontare i loro spostamenti con gli altri dati di monitoraggio.

All'interno del Cluster-C, sopra il centro del giacimento, la media tra le serie temporali di interferometria (aggiornate all'intervallo temporale 30/03/2015 - 01/10/2023, satellite Sentinel-1) dei PS qui localizzati, evidenzia per il semestre in esame un sollevamento verticale medio fino a + 16 mm (max +19).

I dati di interferometria ben si correlano con i trend delle misurazioni delle antenne GPS installate sul Cluster-C, sia per la sincronia con cui avvengono i cambi di tendenza, sia per l'entità degli spostamenti misurati.

I dati di deformazione del suolo sul Cluster-C pertanto evidenziano una correlazione temporale tra spostamenti in sollevamento/abbassamento e la movimentazione di gas nel sottosuolo; non vi è però una altrettanto chiara proporzionalità diretta tra le entità degli spostamenti che le curve descrivono ed i quantitativi di gas movimentati.

Sul Cluster-B, in concomitanza con l'attività di iniezione dell'ultimo semestre (aprile-settembre 2023), si osserva un'area in sollevamento con valori medi intorno a $\approx +4$ mm (max fino a +10 mm) nella parte centrale del reservoir e con valori medi di $\approx +10$ mm, in una zona più a sud rispetto alla proiezione in superficie dei margini del reservoir. Al momento, non è evidente una correlazione causa-effetto tra movimentazione del gas e deformazione, né in termini temporali né in termini di intensità degli spostamenti. Negli ultimi semestri di monitoraggio, sia le componenti verticali che quelle orizzontali hanno evidenziato trend deformativi in fase con le attività di movimentazione di gas su questo cluster, a fronte di una attività di stoccaggio che rimane però invariata rispetto agli anni precedenti. Tuttavia le oscillazioni della superficie topografica, in alcune delle fasi di stoccaggio, "anticipano" le variazioni di volume di gas nel Cluster-B, con zone anche centrali del campo che si sollevano "prima" delle zone a ridosso dei pozzi.

Sul Cluster-A sono state evidenziate deformazioni geodetiche mediamente contenute entro i ≈ 4 mm (con massimi fino a + 8 e - 6.5 mm), non correlabili con la fase di iniezione in esame, né in termini di tempo, né di distribuzione nello spazio. Sulla culminazione strutturale del reservoir, nei pressi del pozzo SP2DIR, i bersagli radar accumulano nel semestre aprile-settembre 2023 una deformazione di $\approx - 1$ mm, in disaccordo con il sollevamento atteso durante una fase di iniezione, e in accordo con la compattazione stagionale.

Gli assestimetri ed i piezometri installati continuano a monitorare in modo efficiente le deformazioni poroelastiche nei primi 350 m di sottosuolo. Le deformazioni registrate dall'assestmetro superficiale vengono ottimamente correlate alle oscillazioni piezometriche superficiali e intermedie, suggerendo che le componenti superficiali e di media-profondità continuano ad essere influenzate principalmente dalle precipitazioni, dalle temperature e dalla circolazione idrica negli acquiferi.

I 2 strumenti installati nei primi 350 metri di sottosuolo (ASS-P e PP1C) non evidenziano una relazione chiara tra le deformazioni da essi registrate e la movimentazione di gas.

L'andamento dell'assestmetro profondo continua a registrare una compattazione al ritmo di $\approx - 3.6$ mm/anno.

Le compattazioni/dilatazioni registrate lungo l'assestometro profondo si verificano in controtendenza rispetto agli abbassamenti/sollevamenti registrati tramite GPS/InSAR: ad esempio, le compattazioni estive registrate si verificano contestualmente ai sollevamenti dell'antenna GPS (che registra la somma di tutte le deformazioni del sottosuolo, anche ben oltre i 350 m investigati dall'assestometro). La sostanziale uguaglianza tra le entità della compattazione misurata dall'assestometro profondo ed il tasso di subsidenza misurato della stazione GPS CLS2 (- 3.6 vs - 3.7 mm/anno) induce ad ipotizzare che tale abbassamento del suolo, poiché il suo valore è maggiore della naturale subsidenza tettonica dell'area ($\approx - 1$ mm/anno), avvenga per cause antropiche quali per esempio l'emungimento d'acqua da pozzi, entro e non oltre i primi 350 di sottosuolo (si veda discussione dettagliata a pag. 52). In base a queste osservazioni, non si deriva una correlazione tra l'entità delle deformazioni dell'assestometro ed i volumi di gas movimentati nel campo, bensì si deduce una estraneità delle fasi di stoccaggio rispetto alla subsidenza dell'area. Se da un lato la ciclicità delle deformazioni dello strumento si correla meglio alle dinamiche idrogeologiche stagionali della colonna di sedimenti investigata, dall'altro il suo trend di subsidenza è più facilmente imputabile a prelievi idrici dai pozzi presenti nell'area.

Il sollevamento delle quote, rispetto al piano campagna, del nuovo piezometro profondo durante i suoi primi 10 mesi di funzionamento, conferma che lo strumento rileva le oscillazioni stagionali di pressione all'interno della acquifero profondo da esso investigato, le quali mostrano andamento simile a quelle del piezometro intermedio nell'acquifero sovrastante (ricarica autunno - inverno).

Bibliografia

Blewitt, G., and D. Lavallee (2002), Effect of annual signals on geodetic velocity, *J. Geophys. Res.*, 107(B7), 2145, doi:10.1029/2001JB000570.

Herring, T. A., R. W. King, and S. C. McClusky. "Introduction to gamit/globk." Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts (2010).

Serpelloni, E., G. Vannucci, L. Anderlini, and R. A. Bennett (2016), Kinematics, seismotectonics and seismic potential of the eastern sector of the European Alps from GPS and seismic deformation data, *Tectonophysics*, 688(C), 157-181, doi:10.1016/j.tecto.2016.09.026.

Vaclavovic P, Dousa J (2016), G-Nut/Anubis - open-source tool for multi-GNSS data monitoring *In: IAG Symposia Series, Springer*, Vol. 143, pp. 775-782, doi:10.1007/1345_2015_157.