



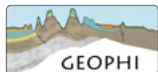
SUBSURFACE  
GEOLOGY AND  
GEOPHYSICS



**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 2022**

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

Bologna 10 novembre 2022



## Indice

<b>Executive Summary</b>	<b>3</b>
<b>1 Attività di stoccaggio dal 1 ottobre al 30 settembre 2022</b>	<b>6</b>
<b>2 Analisi GPS, aggiornamento al 30 settembre 2022</b>	<b>9</b>
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 . . . . .	19
<b>3 Piezometri e assestimetri: relazioni con la piovosità</b>	<b>33</b>
3.1 Piezometri . . . . .	33
3.2 Assestimetri . . . . .	36
<b>4 Analisi Geophi sul dato SqueeSAR relativo ai Cluster della concessione San Potito - Coti- gnola</b>	<b>37</b>
4.1 Analisi delle serie interferometriche sui Cluster B e C in relazione alla movimentazione di gas . . .	37
4.2 Analisi delle serie interferometriche sul Cluster A in relazione alla movimentazione di gas . . . .	44
<b>5 Relazione di tutto il sistema di monitoraggio con la movimentazione di gas</b>	<b>48</b>
<b>6 Conclusioni</b>	<b>56</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>58</b>

## 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 diciannovesimo rapporto relativo all'analisi, all'interpretazione e all'integrazione tra le differenti tipologie di dati monitorati fino alla fine di settembre 2022, 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 2022, la strumentazione installata presso l'impianto del Cluster-C continua ad essere funzionante. Dopo lo spurgo effettuato il 30 settembre 2021, anche se non è stato risolutivo per quel che riguarda il tratto fessurato più profondo (il foro rimane infatti saturo di sedimenti dai 280 metri in giù), il piezometro profondo mostra nell'ultimo anno variazioni di quota che descrivono le oscillazioni stagionali di pressione nell'acquifero da esso investigato. Ciò nonostante, lo strumento verrà dismesso e da dicembre 22 le variazioni di

pressione all'interno dell'acquifero profondo verranno registrate da un nuovo piezometro, finito di perforare a novembre 2022.

Complessivamente, nel semestre aprile - settembre 2022 sono stati iniettati  $\approx 267.7$  MSmc di gas.

Dal Cluster-A sono stati erogati  $\approx 52.3$  MSmc;

Dal Cluster-B sono stati erogati  $\approx 28.8$  MSmc;

Dal Cluster-C sono stati erogati  $\approx 191.7$  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 piezometro profondo mostra nell'ultimo anno oscillazioni della quota simili a quella del piezometro intermedio e che dunque confermano l'avvenuto ripristino dello strumento.

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.

La stazione GPS CLS2 ha qualità del dato (valori di MP1 e MP2) sufficiente ad essere considerata una stazione di buona qualità, in linea con quanto indicato dall'IGS, ed è in grado di fornire risultati da considerare significativi, data la lunghezza raggiunta dalla sua serie temporale ( $\approx 9.3$  anni). Gli spostamenti nella componente verticale di CLS2 e SP04 ( $\approx + 14.5$  mm in media) mostrano andamento correlabile con l'iniezione cumulata tra aprile e settembre 2022, 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 ( $\approx 4.5$  mm OSO) 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 2022. La stazione può ormai dare risultati significativi dopo un periodo di registrazione di quasi 3.9 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 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 un cono di sollevamento all'interno del Cluster-C, con valori medi fino a + 20 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  $\approx 4$  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; non si trova tuttavia un chiaro nesso di causa-effetto in quanto sia le serie interferometriche, che quelle GPS, hanno già mostrato variazioni di entità simili in periodi di non movimentazione di gas.

Sul Cluster-B si osserva un'area in sollevamento, localizzata nella parte sud-orientale del reservoir (tra + 3/4 mm, con massimi fino a + 8 mm). 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 + 3 e - 5 mm (con massimi fino a + 7 e - 6 mm), non correlabili con la fase di iniezione in esame, né in termini di tempo, né di distribuzione nello spazio.

## 1 Attività di stoccaggio dal 1 ottobre al 30 settembre 2022

Nella concessione di stoccaggio San Potito-Cotignola, nel semestre in esame (aprile - settembre 2022) sono stati iniettati complessivamente  $\approx 267.7$  Msmc ed erogati  $\approx 0.15$  Msmc, così suddivisi nei differenti cluster:

### Cluster A

Iniezione di 52277902 Smc ( $\approx 52.3$  MSmc) tra il 12 aprile ed il 12 luglio 2022, con una media di 470972 Smc/gg in 109 gg;

### Cluster B

Iniezione di 23767755 Smc ( $\approx 23.8$  MSmc) con una media di 293429 Smc/gg in 81 gg, tra il 15 aprile ed il 28 settembre 2022;

### Cluster C

Iniezione di 191701063 Smc ( $\approx 191.7$  MSmc) con una media di 1295277 Smc/gg in 148 gg, tra il 10 aprile ed il 28 settembre; Erogazione di 150069 Smc ( $\approx 0.15$  MSmc) il 26 agosto ed il 30 settembre 2022.

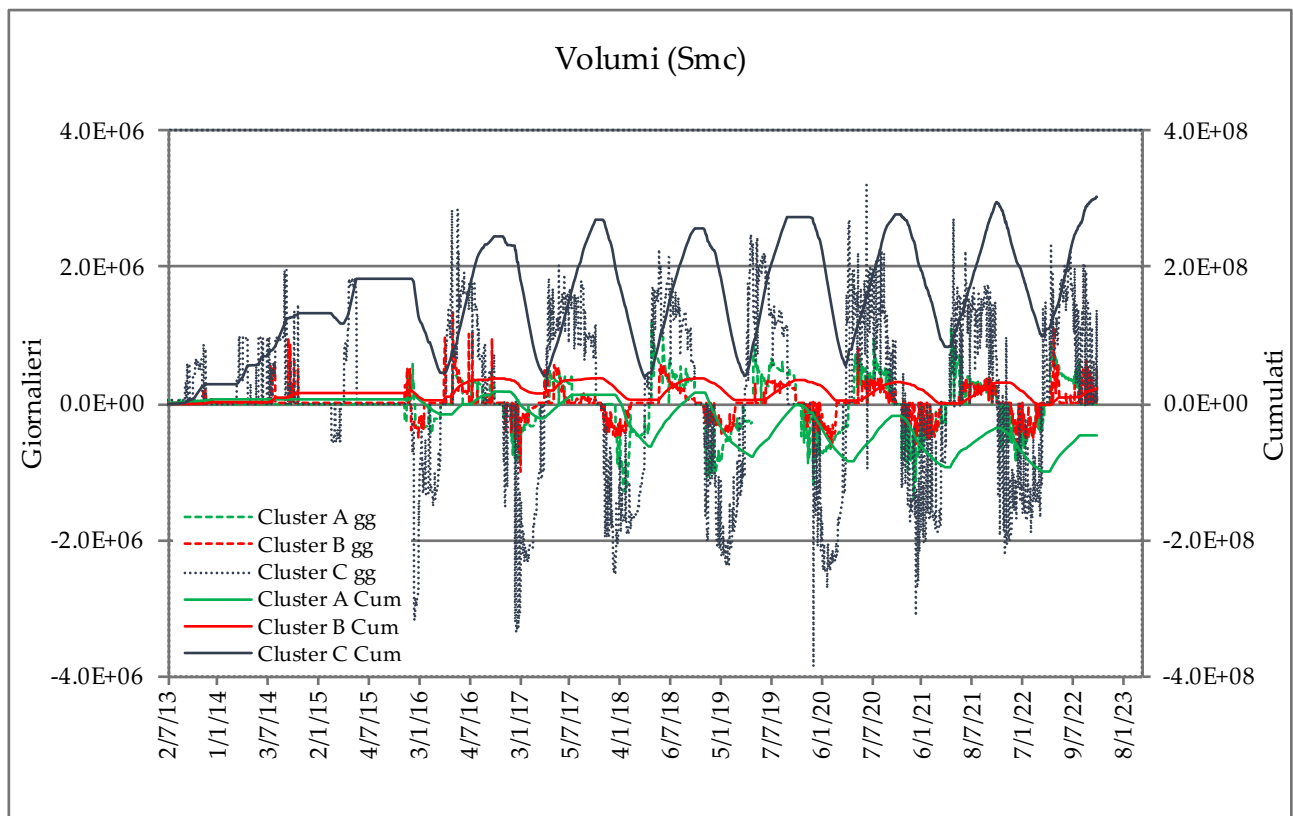


Figura 1.1: Movimentazione dei volumi di gas in metri cubi standard (Smc): valori giornalieri (linee tratteggiate) con ordinata a sinistra; valori cumulati (linee continue) con ordinata a destra.

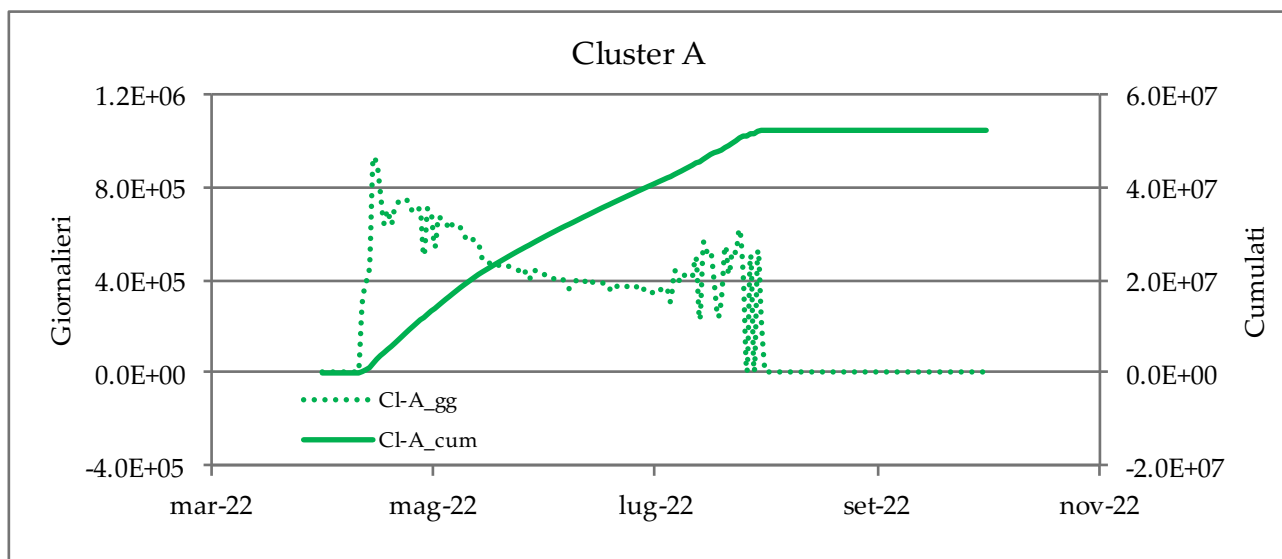


Figura 1.2: Cluster A. Movimentazione dei volumi di gas in metri cubi standard (Smc): valori giornalieri (linee tratteggiate) con ordinata a sinistra; valori cumulati (linee continue) con ordinata a destra. Iniezione di 52277902 Smc ( $\approx 52.3$  MSmc).

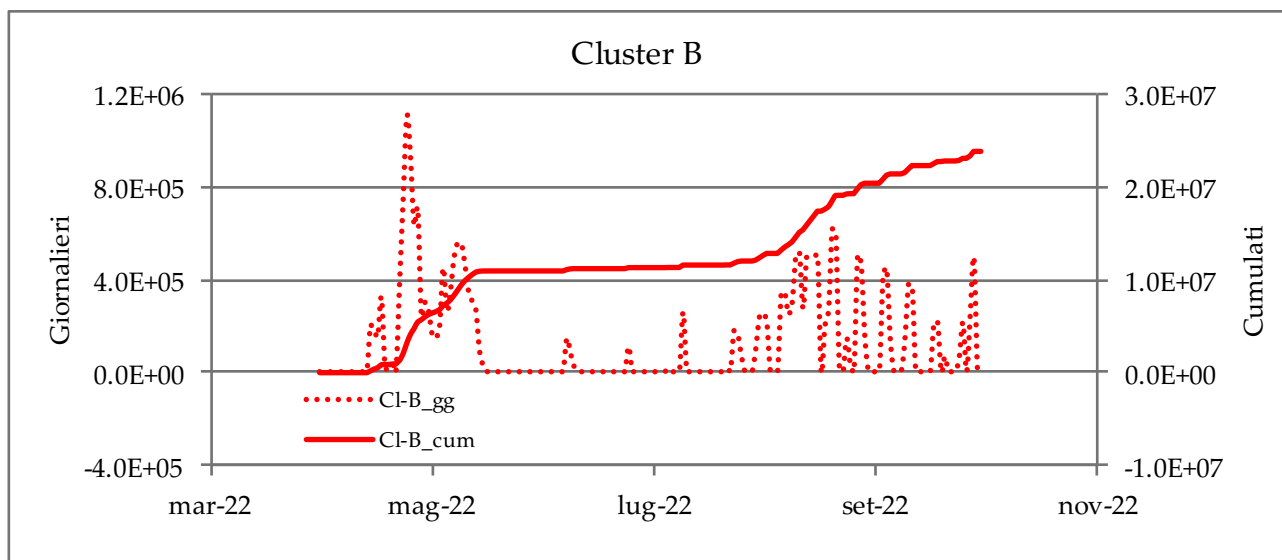


Figura 1.3: Cluster B. Movimentazione dei volumi di gas in metri cubi standard (Smc): valori giornalieri (linee tratteggiate) con ordinata a sinistra; valori cumulati (linee continue) con ordinata a destra. Iniezione di 23767755 Smc ( $\approx 23.8$  MSmc).

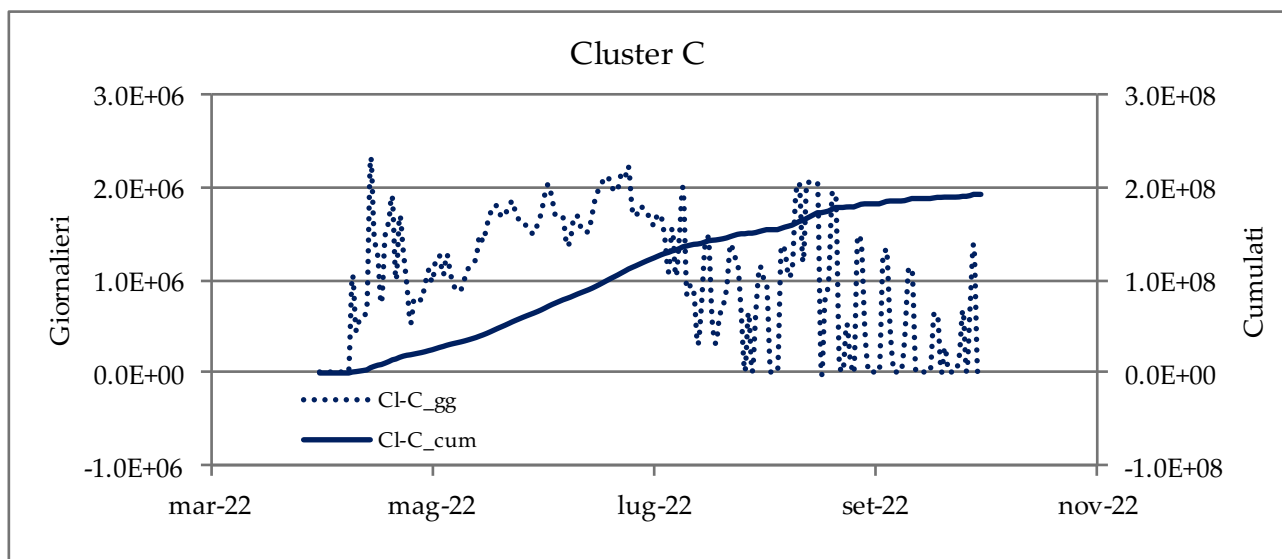


Figura 1.4: Cluster C. Movimentazione dei volumi di gas in metri cubi standard (Smc): valori giornalieri (linee tratteggiate) con ordinata a sinistra; valori cumulati (linee continue) con ordinata a destra. Iniezione di 191701063 Smc ( $\approx 191.7$  MSmc). Erogazione di 150069 Smc ( $\approx 0.15$  MSmc).



## 2 Analisi GPS, aggiornamento al 30 settembre 2022

### 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 2022 (Day of Year 2022/273).

E' stata inoltre aggiornata la serie temporale degli indici di qualità (MP1, MP2) sia di CLS2, che di SP12, fino al doy 2022/273. Le serie temporali delle stazioni analizzate sono state determinate nel sistema di riferimento IGB14 (<http://igs.cb.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://igs.cb.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 2022. La serie temporale di  $\approx 9.3$  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 2022), i valori restano sempre al

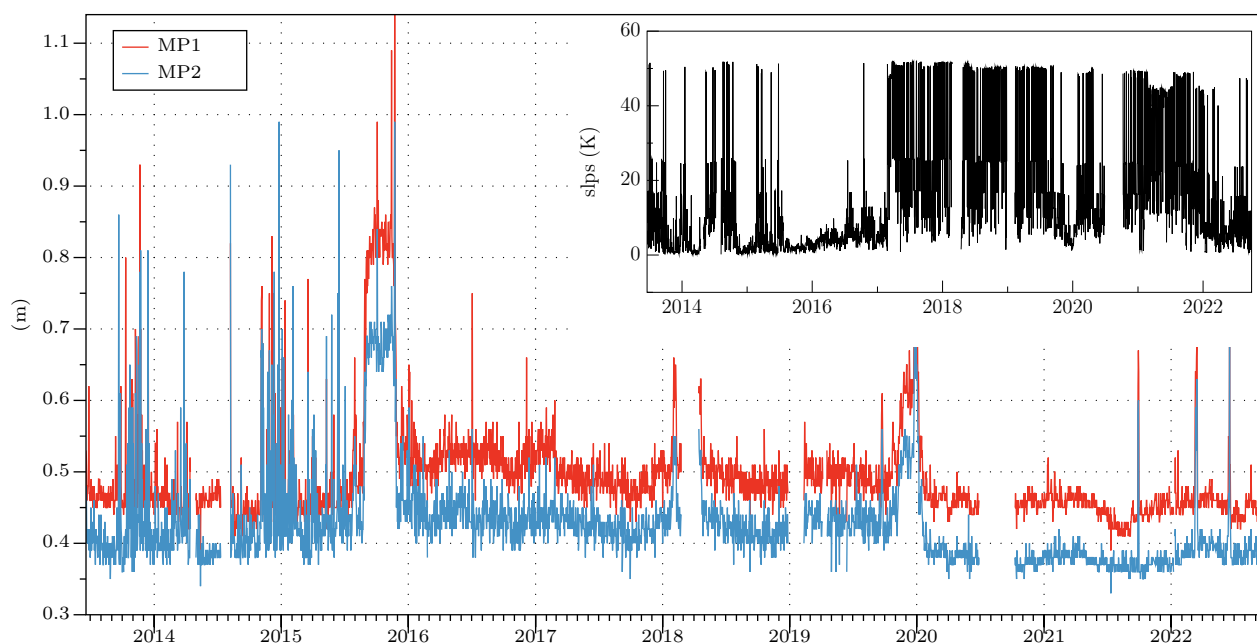


Figura 2.1: Andamento nel tempo dei valori di MP1, MP2 e numero di Cycle Slips della stazione CLS2 fino al 30 settembre 2022.

di sotto di 0.5 m e 0.45 m per MP1 e MP2 rispettivamente.

In Figura 2.2 è mostrato l'andamento dei valori di MP1, MP2 e CS della stazione SP12 durante il suoi primi 3.9 anni di acquisizione. I valori di multipath, in abbassamento nel semestre estivo, sono mediamente compresi tra 0.6 m e 0.5 m, mentre i valori di cycle slips sono mediamente al di sotto di 320, in aumento nel 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, 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)

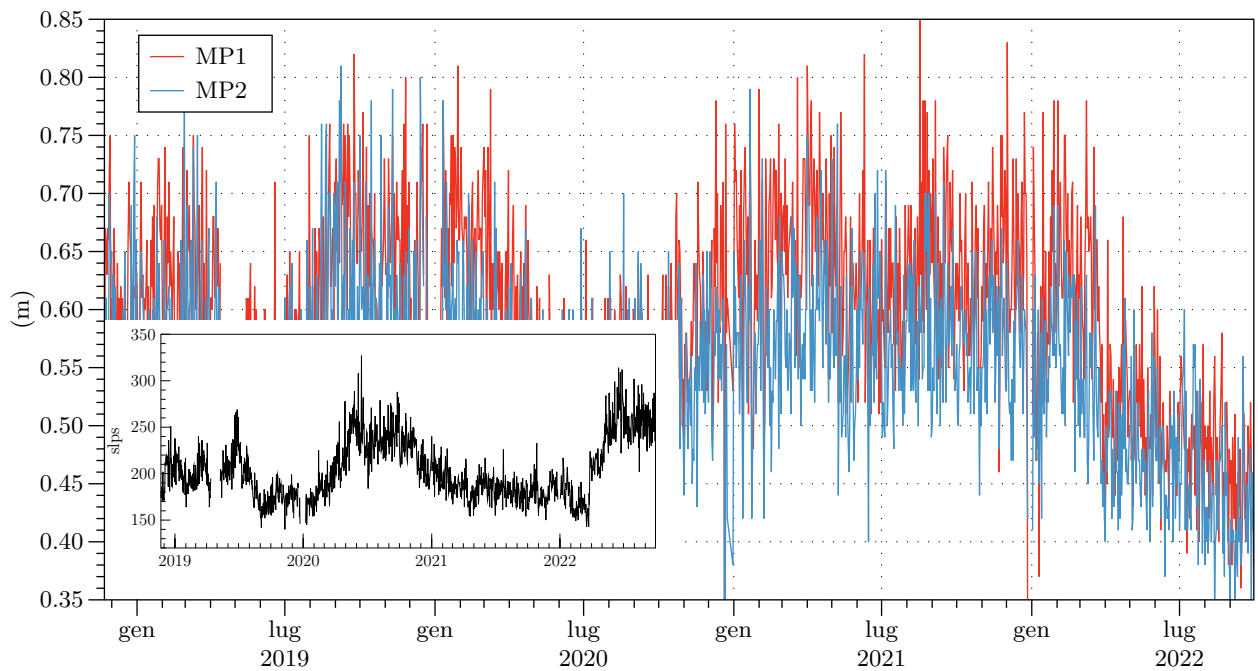


Figura 2.2: Andamento nel tempo dei valori di MP1, MP2 e numero di Cycle Slips della stazione SP12 fino al 30 settembre 2022.

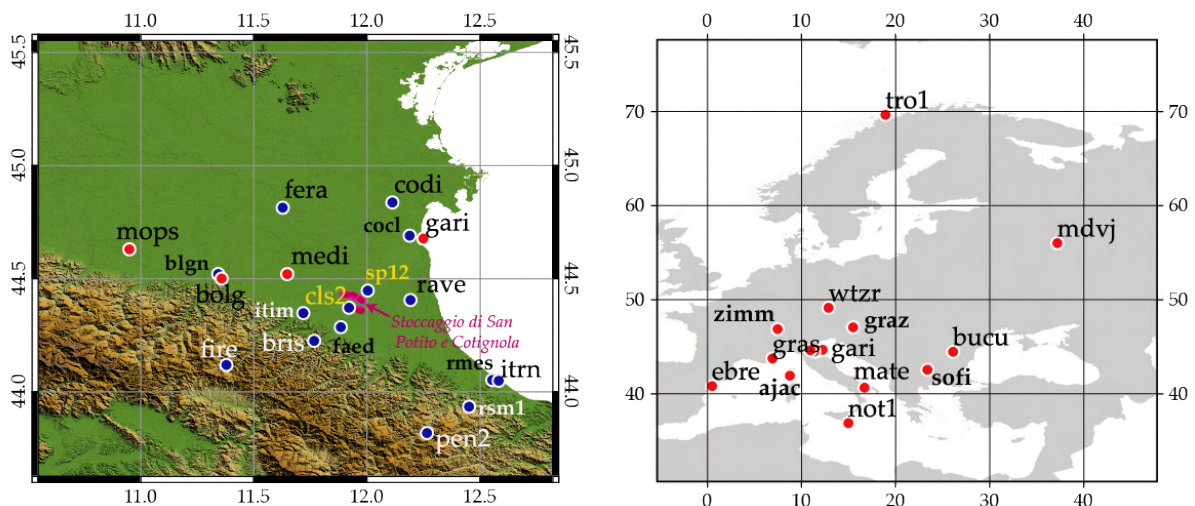


Figura 2.3: Mappa della rete geodetica utilizzata per il processing dei dati e per l'inquadramento nel sistema Igb14 di CLS2 e SP12. Fig. a): rete regionale di stazioni situate attorno al reservoir di San Potito e Cotignola: in rosso le stazioni di riferimento EUREF, in blu le stazioni delle reti RING e Netgeo Emilia-Romagna. Fig b): stazioni di riferimento europee delle reti EUREF.

- CODI (Codigoro), ITIM (Imola), ITRN (Rimini) e RAVE (Ravenna) della rete Topcon-Netegeo-Emilia Romagna. A partire dal 3 gennaio 2022 la rete non è purtroppo più attiva ed i dati delle stazioni non sono dunque più disponibili e processabili assieme agli altri, dopo questa data;
- 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).

#### 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 (Mendeleev, Russia; CS), BUCU (Bucarest, Romania), SOFI (Sofia, Bulgaria).

La nuova stima delle coordinate della stazione CLS2 nel sistema di riferimento IGB14, riportate al 30/09/2022 (decimal year 2022.745205), restituisce:

X: 4468302.86067 (m) Y: 943210.79020 (m) Z: 4437714.25377 (m)

Latitudine: N 44° 22' 16.462263" Longitudine: E 11° 55' 10.345940" Quota: 60.75173 (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 2022:

- Ampiezza Annuale Est:  $2.464 \pm 0.050$  mm; Nord:  $1.674 \pm 0.058$  mm;
- Ampiezza Annuale Up:  $3.733 \pm 0.194$  mm;
- Ampiezza Semi-Annuale Est:  $0.391 \pm 0.049$  mm; Nord:  $0.174 \pm 0.057$  mm;
- Ampiezza Semi-Annuale Up:  $0.651 \pm 0.192$  mm.

**CLS2** COTIGNOLA Edison Lon/Lat: 11.9195 44.3712  
Time Span (yrs): 9.2876 N.Epochs: 3390 N.Obs: 3083

**A - Sistema di riferimento IGB14**

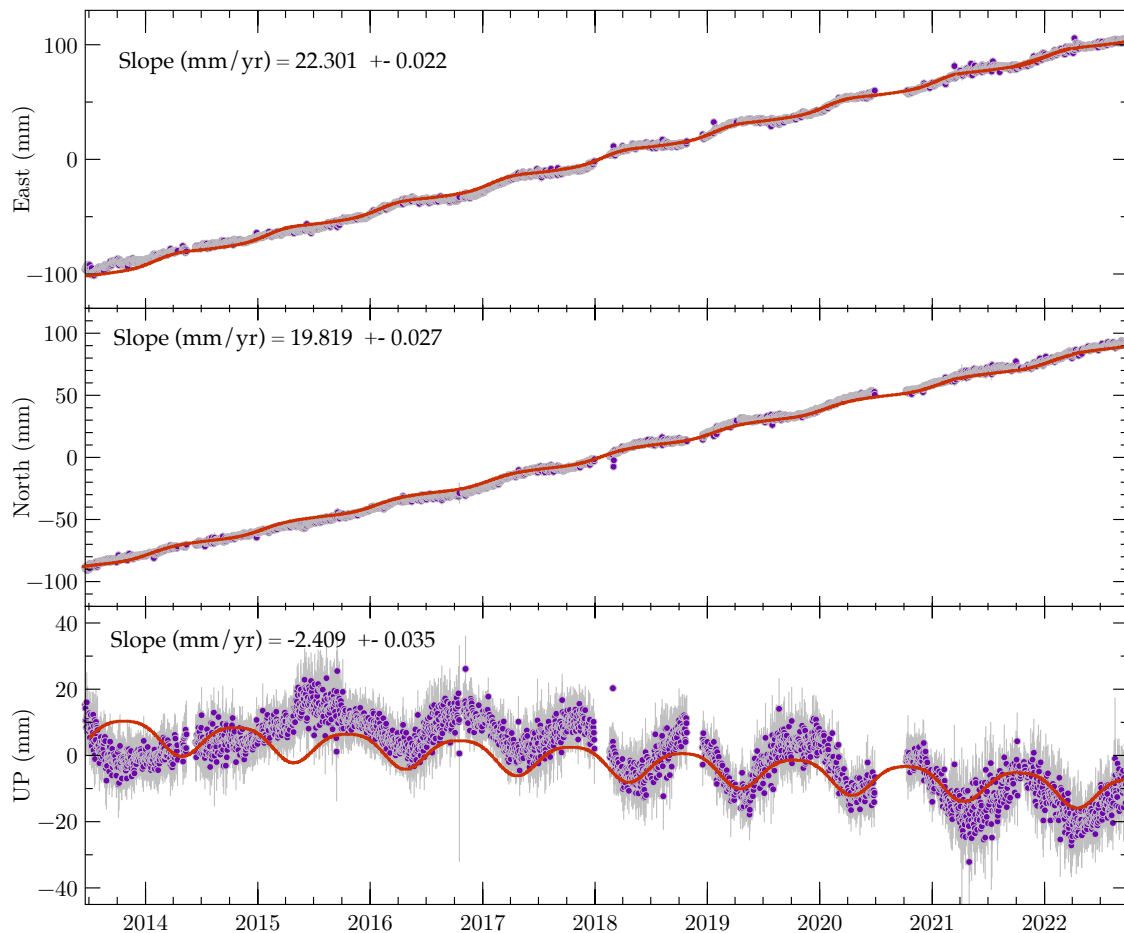


Figura 2.4: Serie temporale delle posizioni della stazione CLS2, aggiornata al 30 settembre 2022, nel sistema di riferimento IGB14. La linea arancio indica il modello ottenuto da una stima dell'andamento lineare e stagionale. Le linee grigie indicano le barre d'errore (2 sigma) delle posizioni giornaliere.

Le velocità stimate per le tre componenti, E, N e Up nel sistema di riferimento IGB14 analizzando la serie temporale aggiornata al 30 settembre 2022 sono (in mm/anno):

- Velocità Est:  $22.301 \pm 0.022$  (mm/anno);
- Velocità Nord:  $19.819 \pm 0.027$  (mm/anno);
- Velocità Verticale:  $-2.409 \pm 0.035$  (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 30/09/2022 (decimal year 2022.745205), restituisce:

X: 4461144.56593 (m) Y: 948495.42159 (m) Z: 4443722.04657 (m)

Latitudine: N 44° 26' 49.432158" Longitudine: E 12° 0' 11.053491" Quota: 44.69084 (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 2022:

- Ampiezza Annuale Est:  $5.156 \pm 0.087$  mm; Nord:  $6.182 \pm 0.100$  mm;
- Ampiezza Annuale Up:  $5.041 \pm 0.354$  mm;
- Ampiezza Semi-Annuale Est:  $1.785 \pm 0.084$  mm; Nord:  $2.379 \pm 0.096$  mm;
- Ampiezza Semi-Annuale Up:  $1.557 \pm 0.344$  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 2022 sono (in mm/anno):

- Velocità Est:  $25.221 \pm 0.063$  (mm/anno);
- Velocità Nord:  $18.870 \pm 0.079$  (mm/anno);
- Velocità Verticale:  $-6.789 \pm 0.291$  (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): 9.2876 N.Epochs: 3390 N.Obs: 3083

**B - Sistema di riferimento Adria fixed**

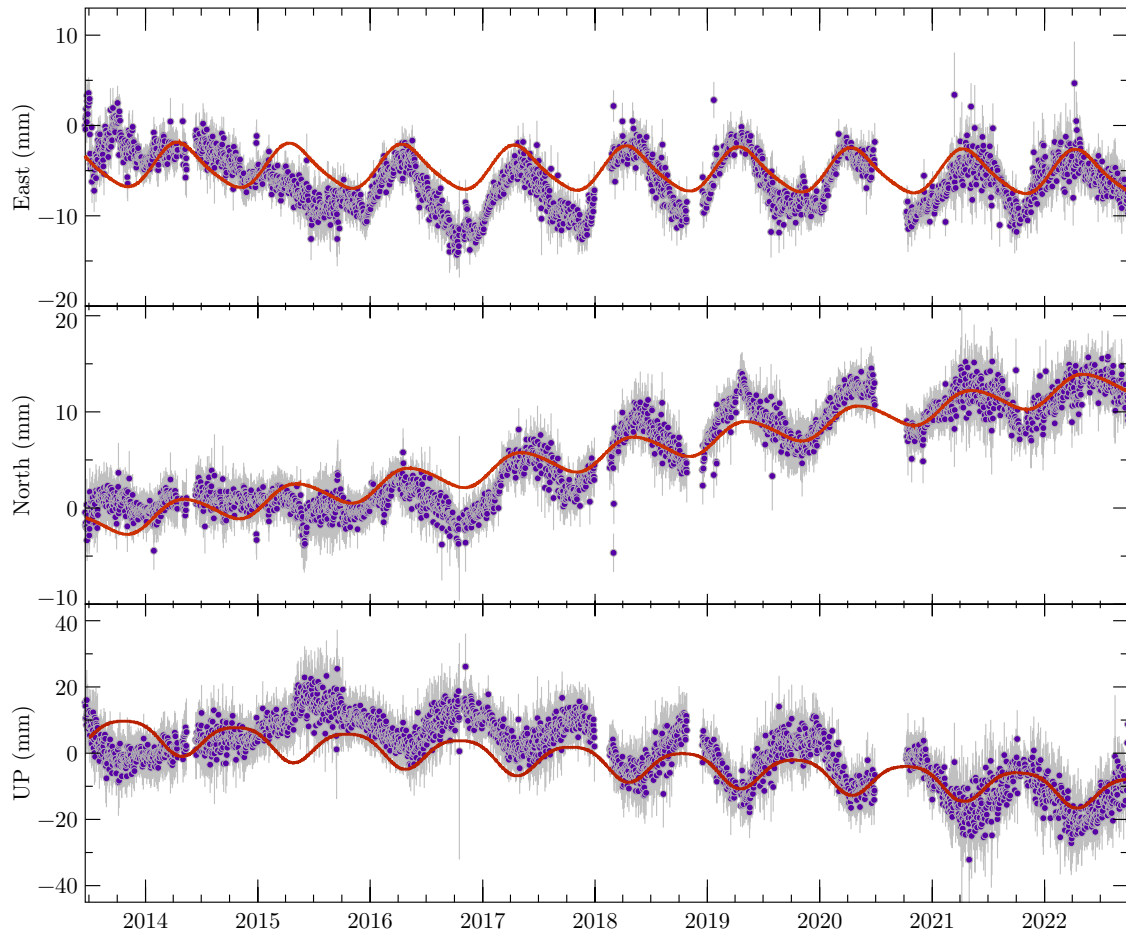


Figura 2.5: Serie temporale delle posizioni della stazione CLS2, aggiornata al 30 settembre 2022, in un sistema di riferimento locale Adria-fixed, ottenuto utilizzando il polo di rotazione della microplacca Adriatica determinato in Serpelloni et al. (2016).

**SP12** SAN POTITO Edison Lon/Lat: 12.0031 44.4471

Time Span (yrs): 3.8575

N.Epochs: 1408

N.Obs: 1336

**A - Sistema di riferimento IGB14**

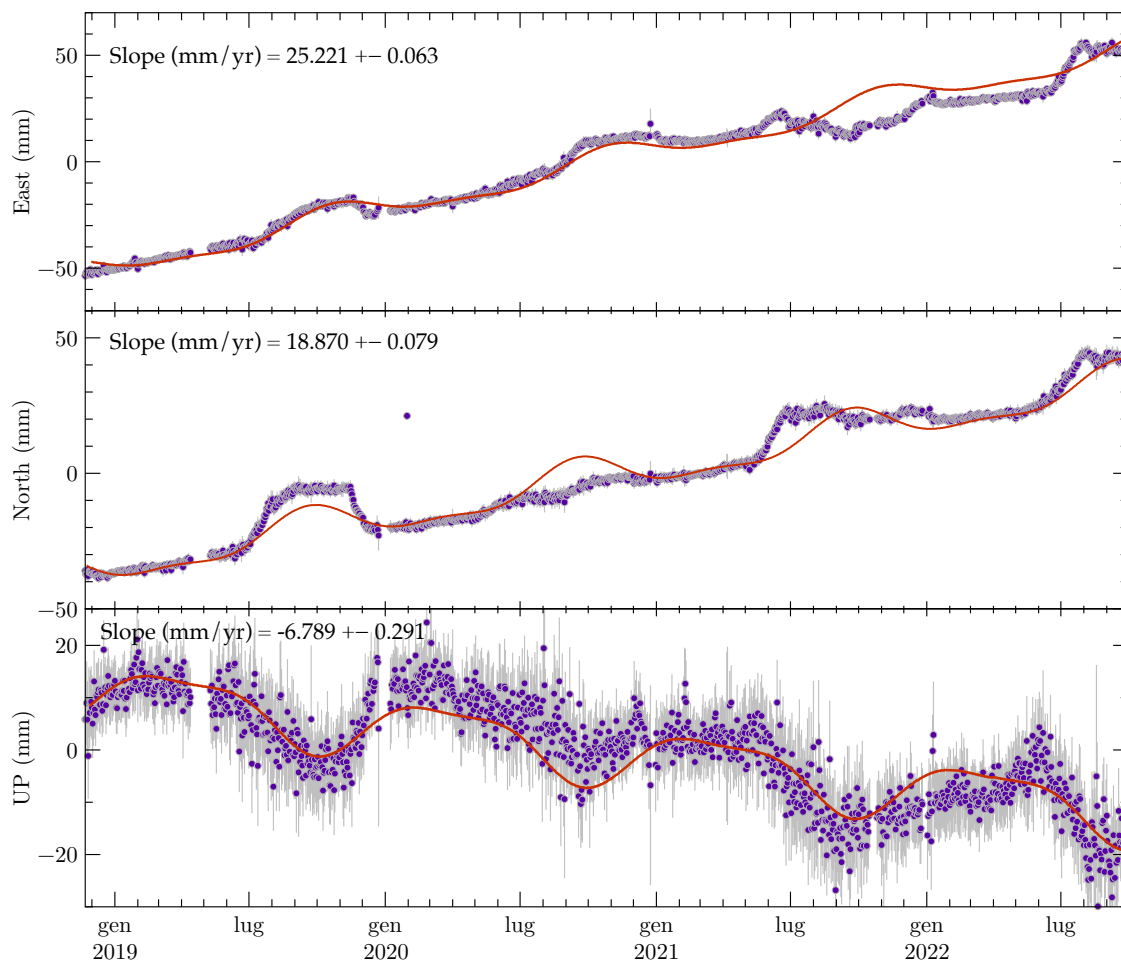


Figura 2.6: Serie temporale delle posizioni della stazione SP12, aggiornata al 30 settembre 2022, nel sistema di riferimento IGB14. La linea arancio indica il modello ottenuto da una stima dell'andamento lineare e stagionale. Le linee grigie indicano le barre d'errore (2 sigma) delle posizioni giornaliere.



**SP12** SAN POTITO Edison Lon/Lat: 12.0031 44.4471

Time Span (yrs): 3.8575

N.Epochs: 1408

N.Obs: 1336

**B - Sistema di riferimento Adria fixed**

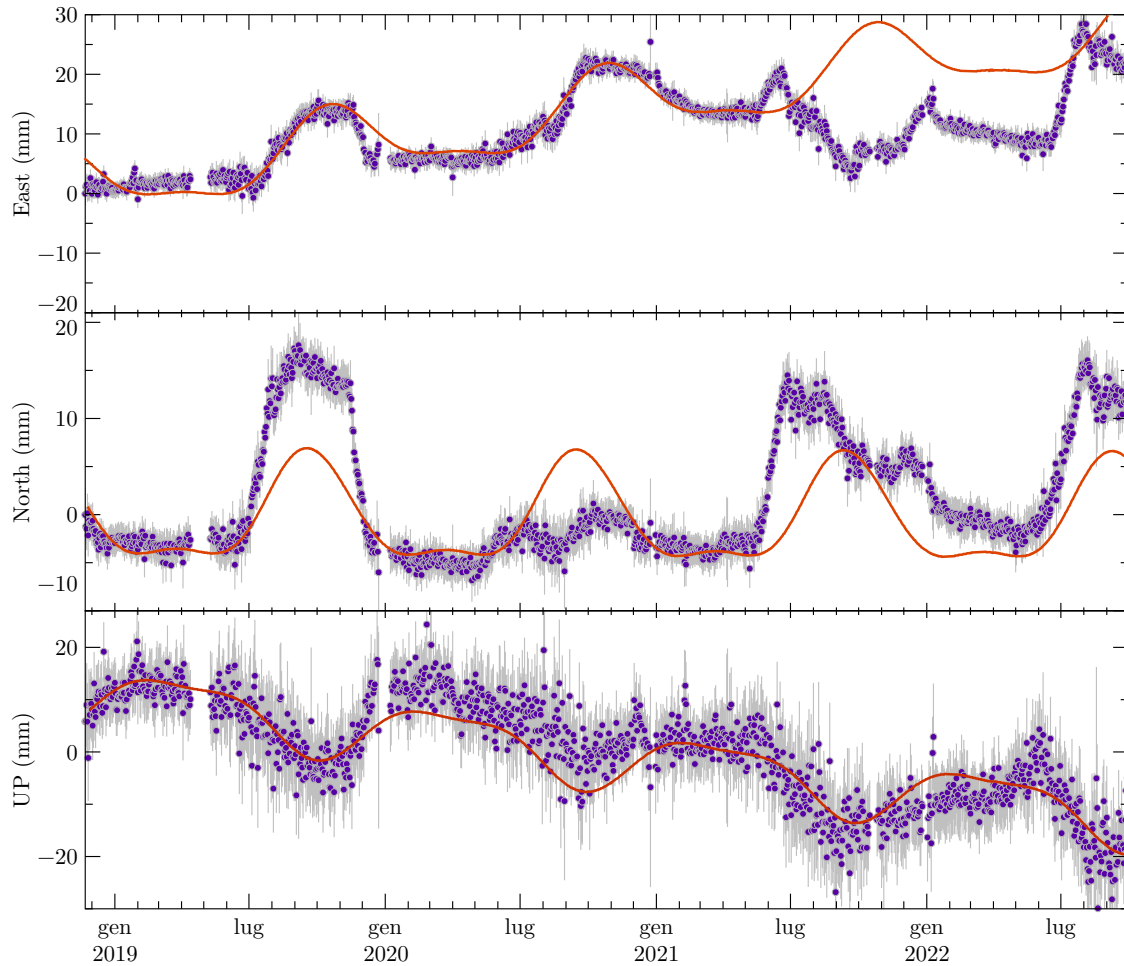


Figura 2.7: Serie temporale delle posizioni della stazione SP12, aggiornata al 30 settembre 2022, in un sistema di riferimento locale Adria-fixed, ottenuto utilizzando il polo di rotazione della microplacca Adriatica determinato in Serpelloni et al. (2016). Le linee grigie indicano le barre d'errore (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  $\approx 11$  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.

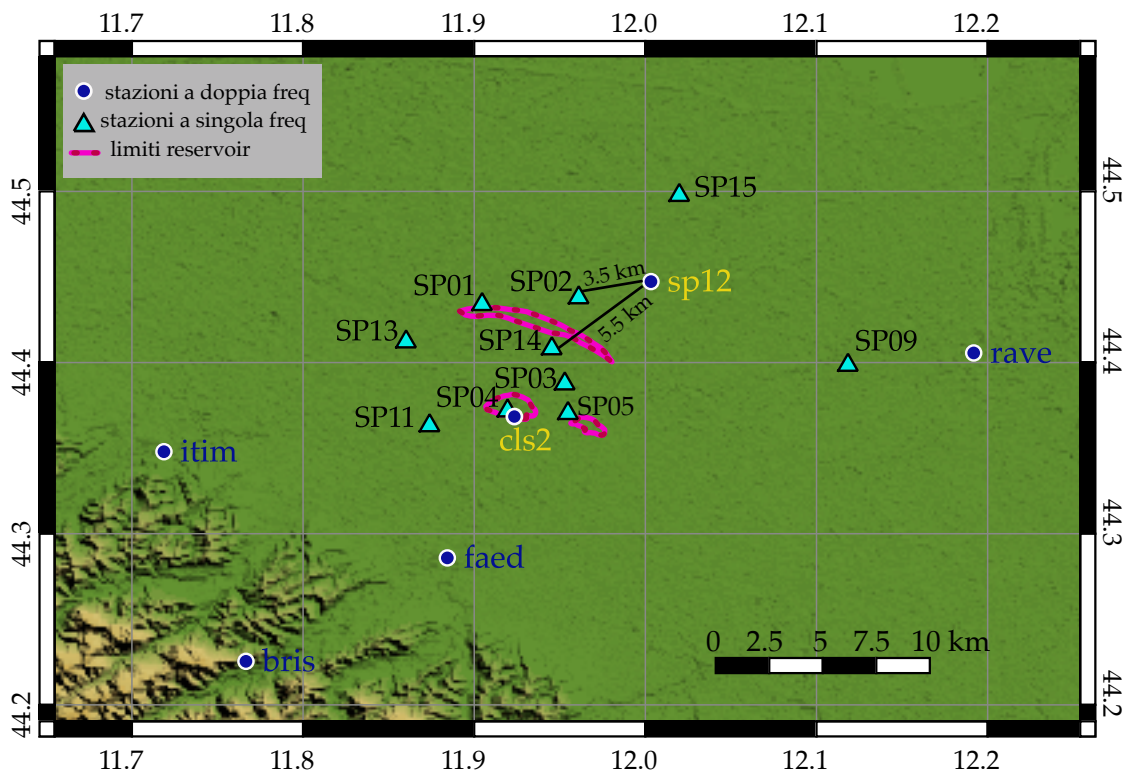


Figura 2.8: Mappa della rete a singola frequenza attorno ai reservoir di San Potito e Cotignola. In azzurro (triangoli) le stazioni Edison Stoccaggio a singola frequenza; in blu le stazioni Edison Stoccaggio a doppia frequenza CLS2 ed SP12 (etichetta gialla) e le stazioni regionali a doppia frequenza 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
=GPS1 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 2022), 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.

### 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

Stazione	Obs attese	Obs proc	% proc/att	ambfix	% fix/proc	outl rimossi
SP01	183	183	100.00%	182	99.45%	7
SP02	183	183	100.00%	182	99.45%	8
SP03	183	179	97.81%	177	98.88%	10
SP04	183	183	100.00%	182	99.45%	7
SP05	183	183	100.00%	182	99.45%	10
SP09	183	183	100.00%	180	98.36%	11
SP11	183	183	100.00%	182	99.45%	7
SP13	183	173	94.54%	169	97.69%	10
SP14	183	144	78.69%	144	100.00%	3
SP15	183	179	97.81%	159	88.83%	3

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 2022.

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  $\pm 5.5$  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 2022), come si vede bene dalle figure 2.9 e 2.10, SP01 si abbassa e solleva nella componente Up di  $\approx \pm 4$  mm, mantenendo alla fine la stessa quota nel semestre.

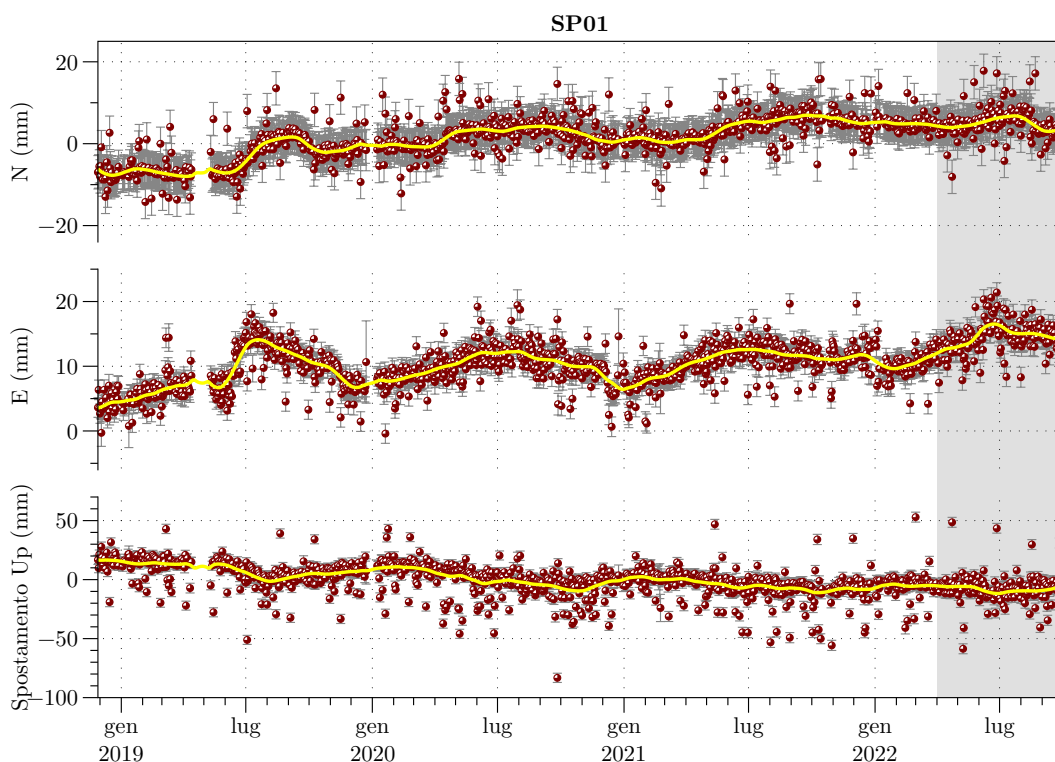


Figura 2.9: Spostamento relativo del ricevitore GNSS SP01 calcolato rispetto a SP12 e successivamente rimosso del moto di quest'ultimo, nelle componenti N, E e UP, aggiornato al 30 settembre 2022. In giallo la curva di regressione locale LOESS, scelta per fittare la distribuzione degli spostamenti ed usata per eliminare i valori anomali che ricadono fuori dai  $3\sigma$ .

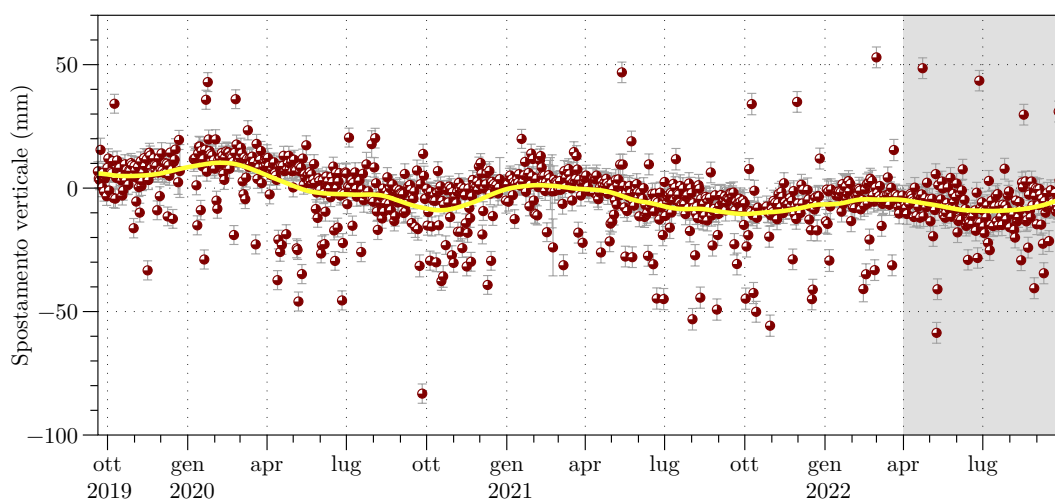


Figura 2.10: Serie temporale dello spostamento del ricevitore GNSS SP01 corretto dal moto di SP12, nelle componente UP, aggiornata al 30 settembre 2022. In giallo la curva di regressione locale LOESS, scelta per fittare la distribuzione degli spostamenti ed usata per eliminare i valori anomali che ricadono fuori dai  $3\sigma$ .

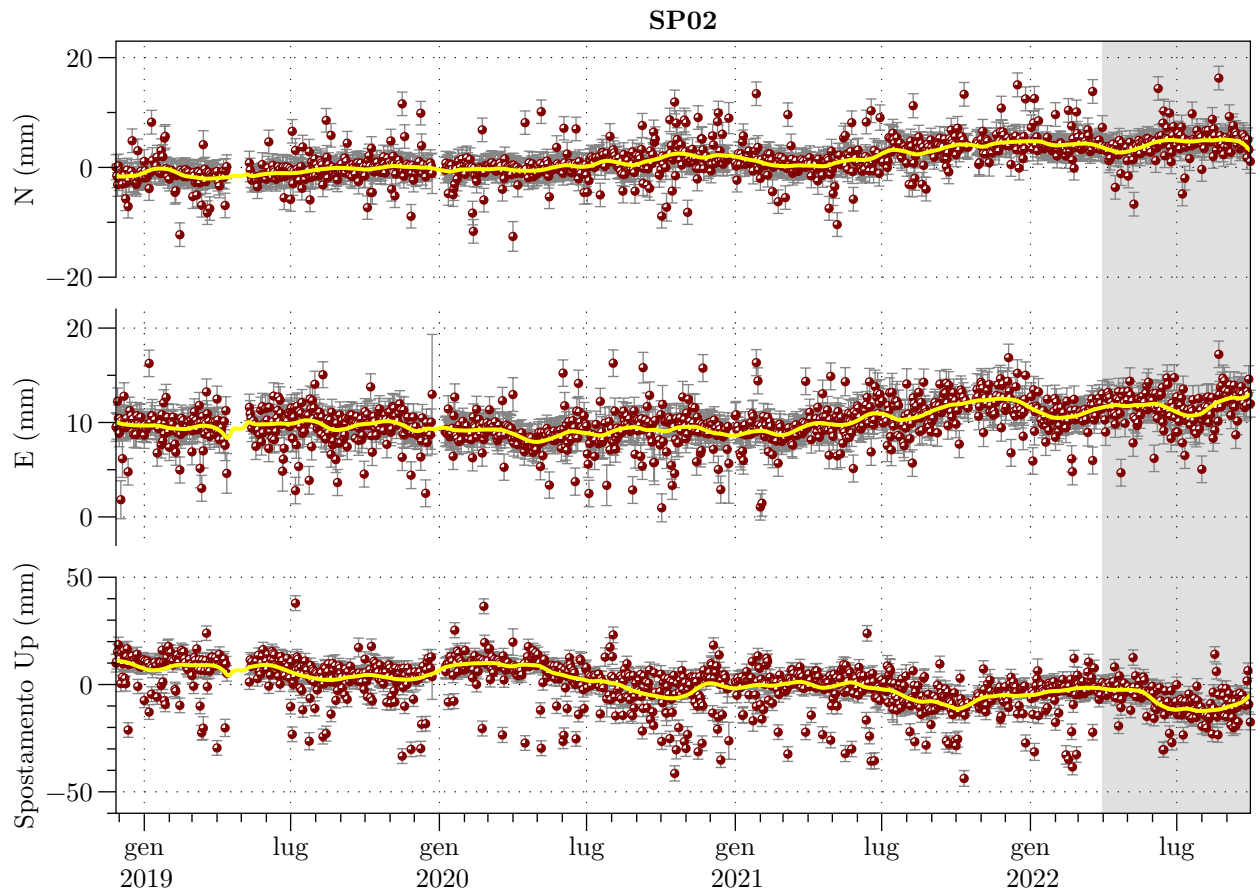


Figura 2.11: Spostamento relativo del ricevitore GNSS SP02 calcolato rispetto a SP12 e successivamente rimosso del moto di quest'ultimo, nelle componenti N, E e UP, aggiornato al 30 settembre 2022. In giallo la curva di regressione locale LOESS, scelta per fittare la distribuzione degli spostamenti ed usata per eliminare i valori anomali che ricadono fuori dai  $3\sigma$ .

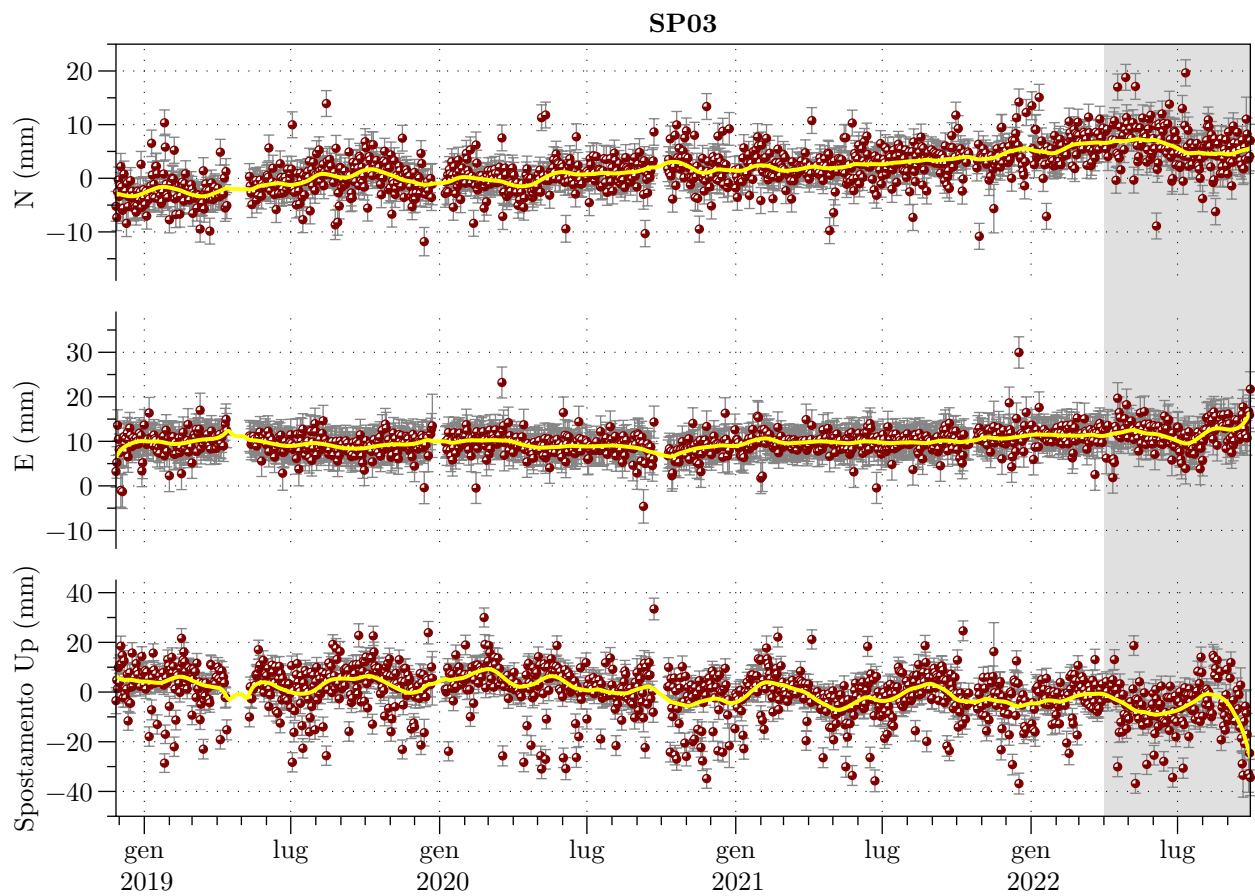


Figura 2.12: Spostamento relativo del ricevitore GNSS SP03 calcolato rispetto a SP12 e successivamente rimosso del moto di quest'ultimo, nelle componenti N, E e UP, aggiornato al 30 settembre 2022. In giallo la curva di regressione locale LOESS, scelta per fittare la distribuzione degli spostamenti ed usata per eliminare i valori anomali che ricadono fuori dai  $3\sigma$ .



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  $\approx +15$  mm (curva di fit gialla in Fig. 2.13, blu in Fig 2.14), che mima l'andamento di CLS2.

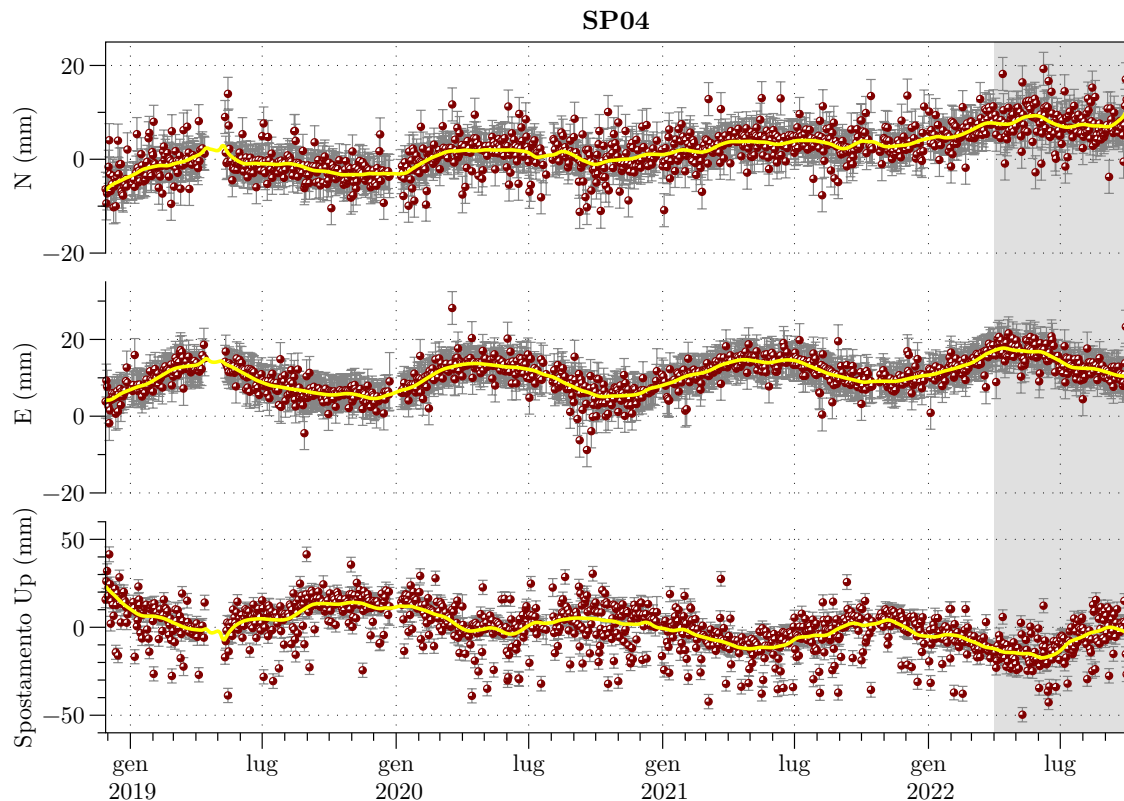


Figura 2.13: Spostamento relativo del ricevitore GNSS SP04 calcolato rispetto a SP12 e successivamente rimosso del moto di quest'ultimo, nelle componenti N, E e UP, aggiornato al 30 settembre 2022. In giallo la curva di regressione locale LOESS, scelta per fittare la distribuzione degli spostamenti ed usata per eliminare i valori anomali che ricadono fuori dai  $3\sigma$ .

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.

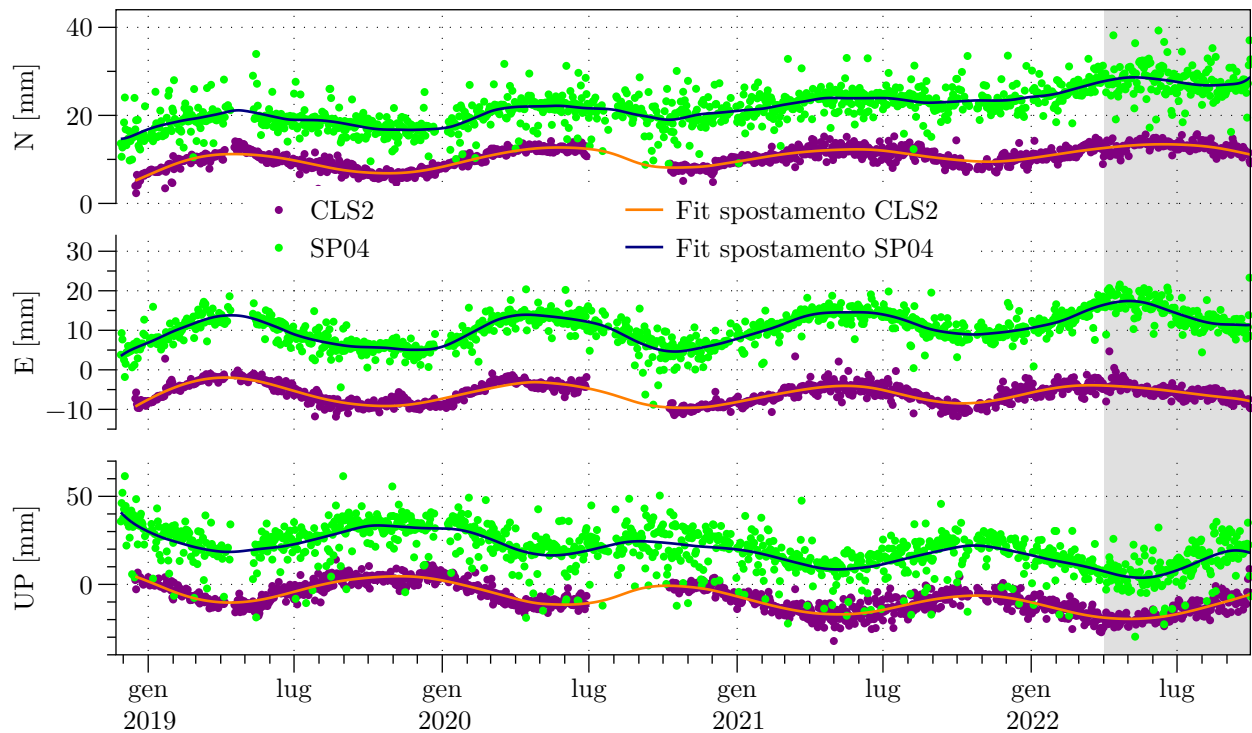


Figura 2.14: Confronto tra la serie temporale di CLS2 processata nelle rete a doppia frequenza e la serie a singola frequenza di SP04, aggiornate al 30 settembre 2022.

La stazione SP05 è posizionata nelle vicinanze del Cluster-B,  $\approx 500$  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  $\approx +3$  mm (Figs 2.15 e 2.16), in accordo con la fase dello stoccaggio, ma più probabilmente imputabile alla scarsa dilatazione dei sedimenti più superficiali durante il relativamente più piovoso (rispetto al resto del semestre) agosto-settembre 2022.

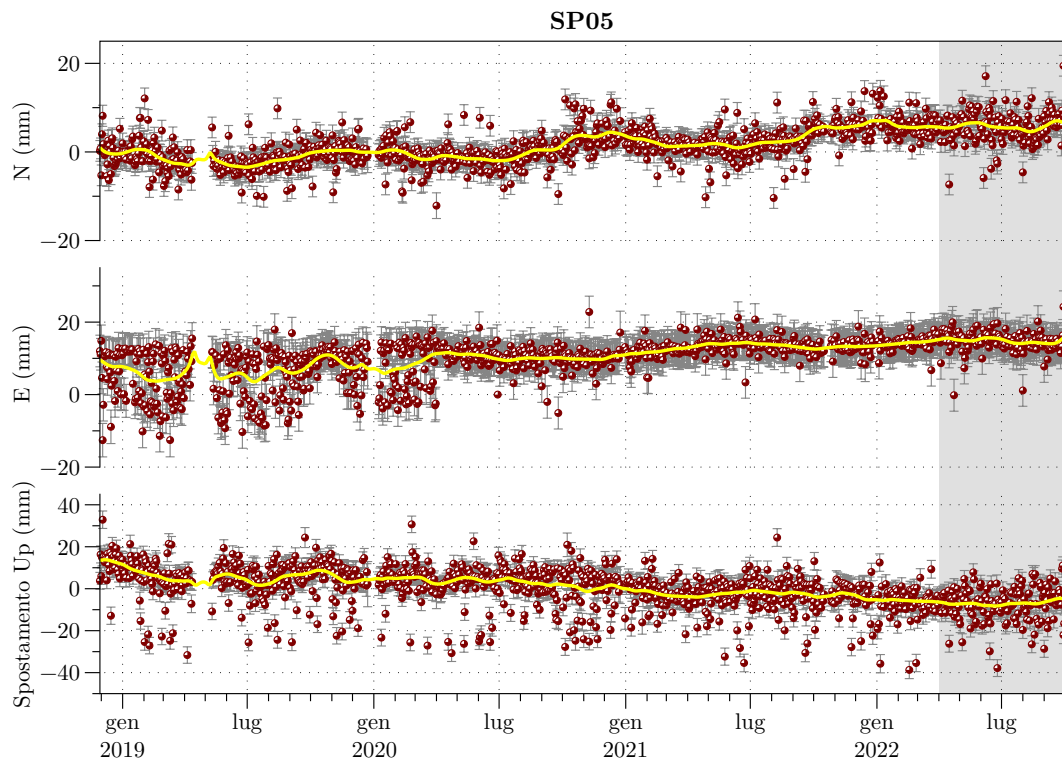


Figura 2.15: Spostamento relativo del ricevitore GNSS SP05 calcolato rispetto a SP12 e successivamente rimosso del moto di quest'ultimo, nelle componenti N, E e UP, aggiornato al 30 settembre 2022. In giallo la curva di regressione locale LOESS, scelta per fittare la distribuzione degli spostamenti ed usata per eliminare i valori anomali che ricadono fuori dai  $3\sigma$ .

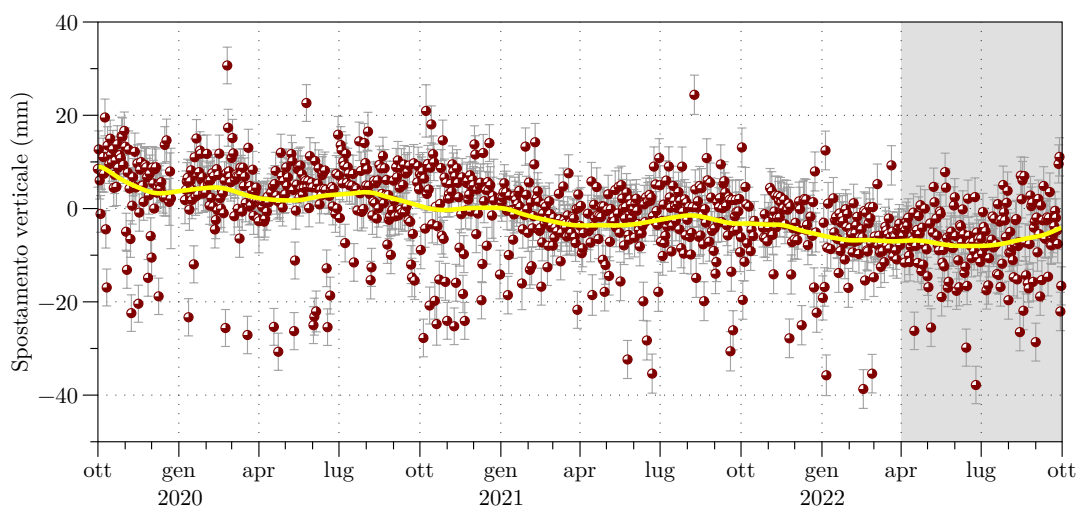


Figura 2.16: Serie temporale dello spostamento del ricevitore GNSS SP05 corretto dal moto di SP12, nelle componente UP, aggiornata al 30 settembre 2022. In giallo la curva di regressione locale LOESS, scelta per fittare la distribuzione degli spostamenti ed usata per eliminare i valori anomali che ricadono fuori dai  $3\sigma$ .

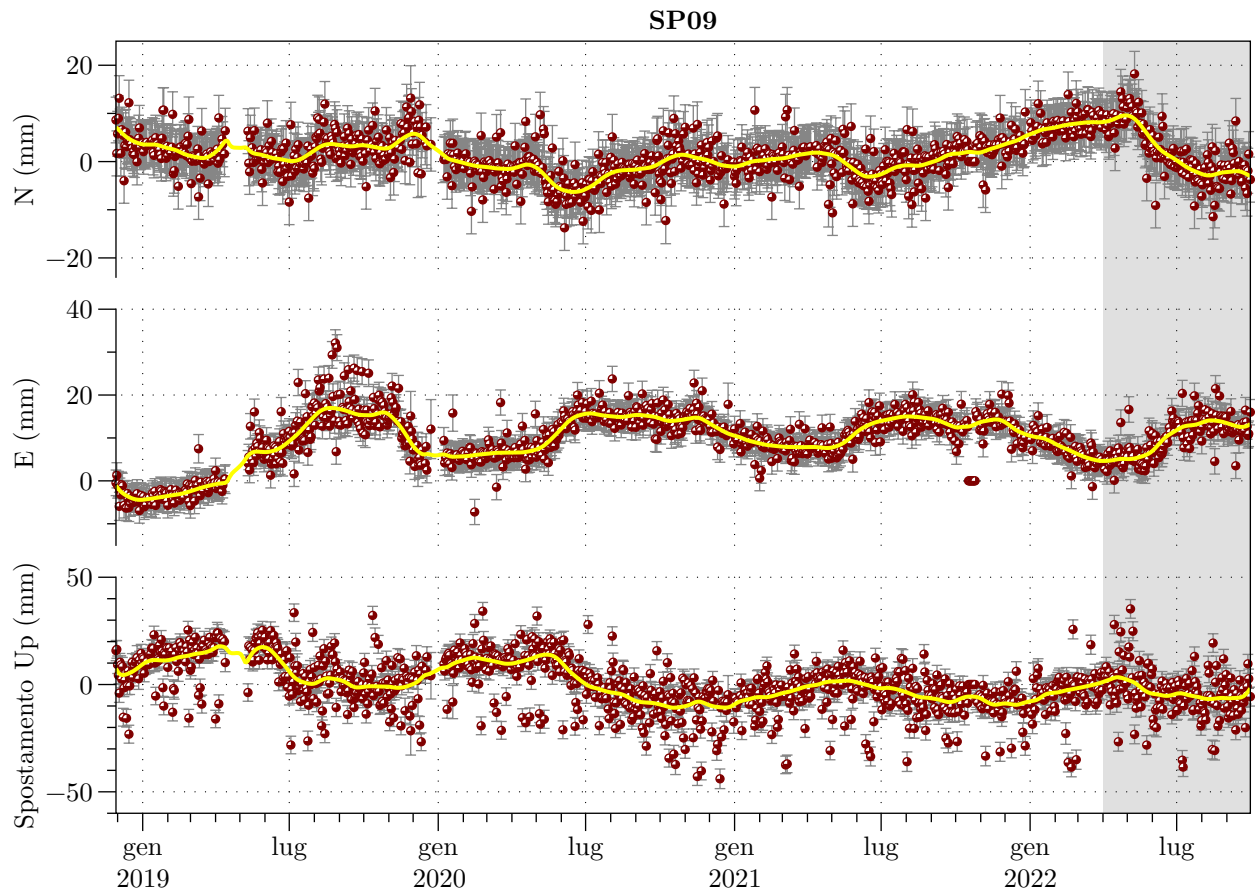


Figura 2.17: Spostamento relativo del ricevitore GNSS SP09 calcolato rispetto a SP12 e successivamente rimosso del moto di quest'ultimo, nelle componenti N, E e UP, aggiornato al 30 settembre 2022. In giallo la curva di regressione locale LOESS, scelta per fittare la distribuzione degli spostamenti ed usata per eliminare i valori anomali che ricadono fuori dai  $3\sigma$ .

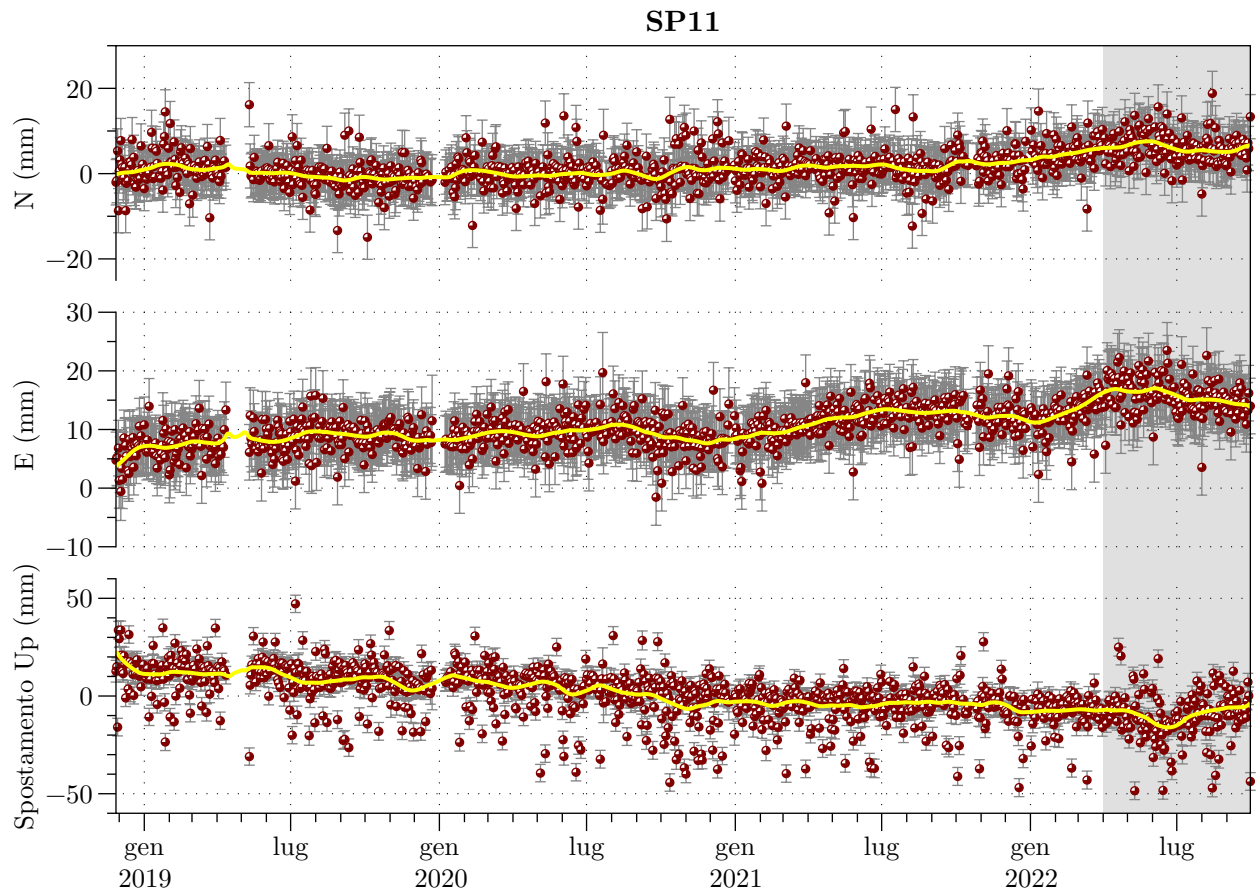


Figura 2.18: Spostamento relativo del ricevitore GNSS SP11 calcolato rispetto a SP12 e successivamente rimosso del moto di quest'ultimo, nelle componenti N, E e UP, aggiornato al 30 settembre 2022. In giallo la curva di regressione locale LOESS, scelta per fittare la distribuzione degli spostamenti ed usata per eliminare i valori anomali che ricadono fuori dai  $3\sigma$ .

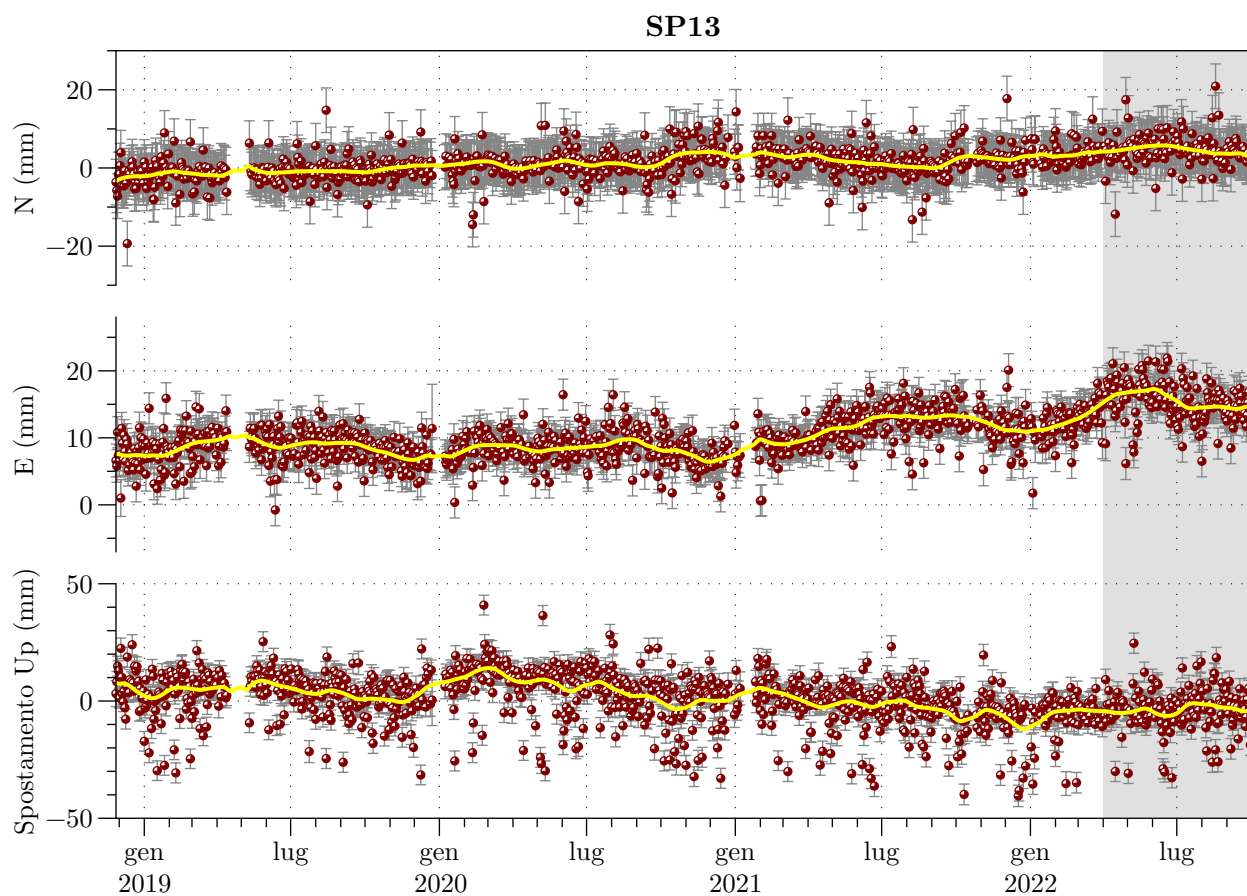


Figura 2.19: Spostamento relativo del ricevitore GNSS SP13 calcolato rispetto a SP12 e successivamente rimosso del moto di quest'ultimo, nelle componenti N, E e UP, aggiornato al 30 settembre 2022. In giallo la curva di regressione locale LOESS, scelta per fittare la distribuzione degli spostamenti ed usata per eliminare i valori anomali che ricadono fuori dai  $3\sigma$ .

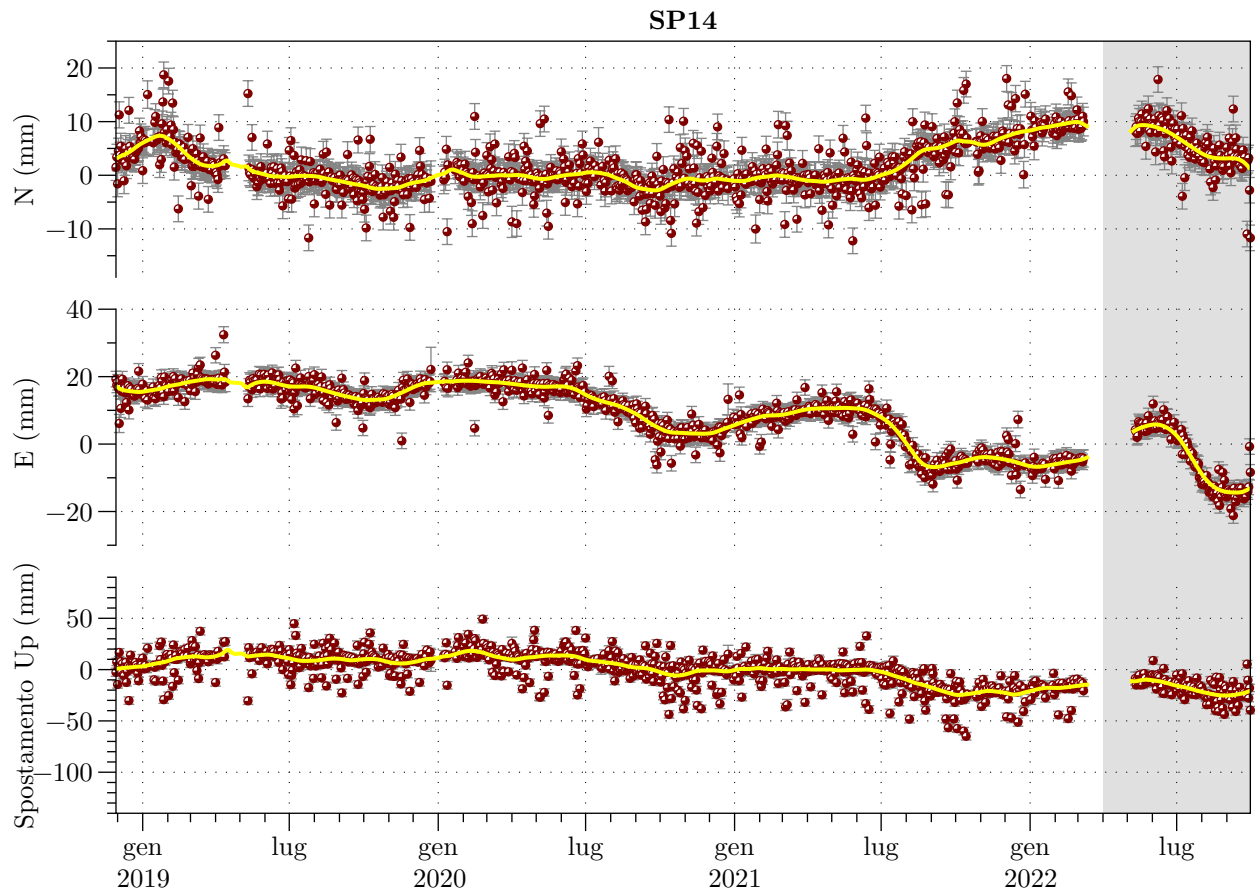


Figura 2.20: Spostamento relativo del ricevitore GNSS SP14 calcolato rispetto a SP12 e successivamente rimosso del moto di quest'ultimo, nelle componenti N, E e UP, aggiornato al 30 settembre 2022. In giallo la curva di regressione locale LOESS, scelta per fittare la distribuzione degli spostamenti ed usata per eliminare i valori anomali che ricadono fuori dai  $3\sigma$ .

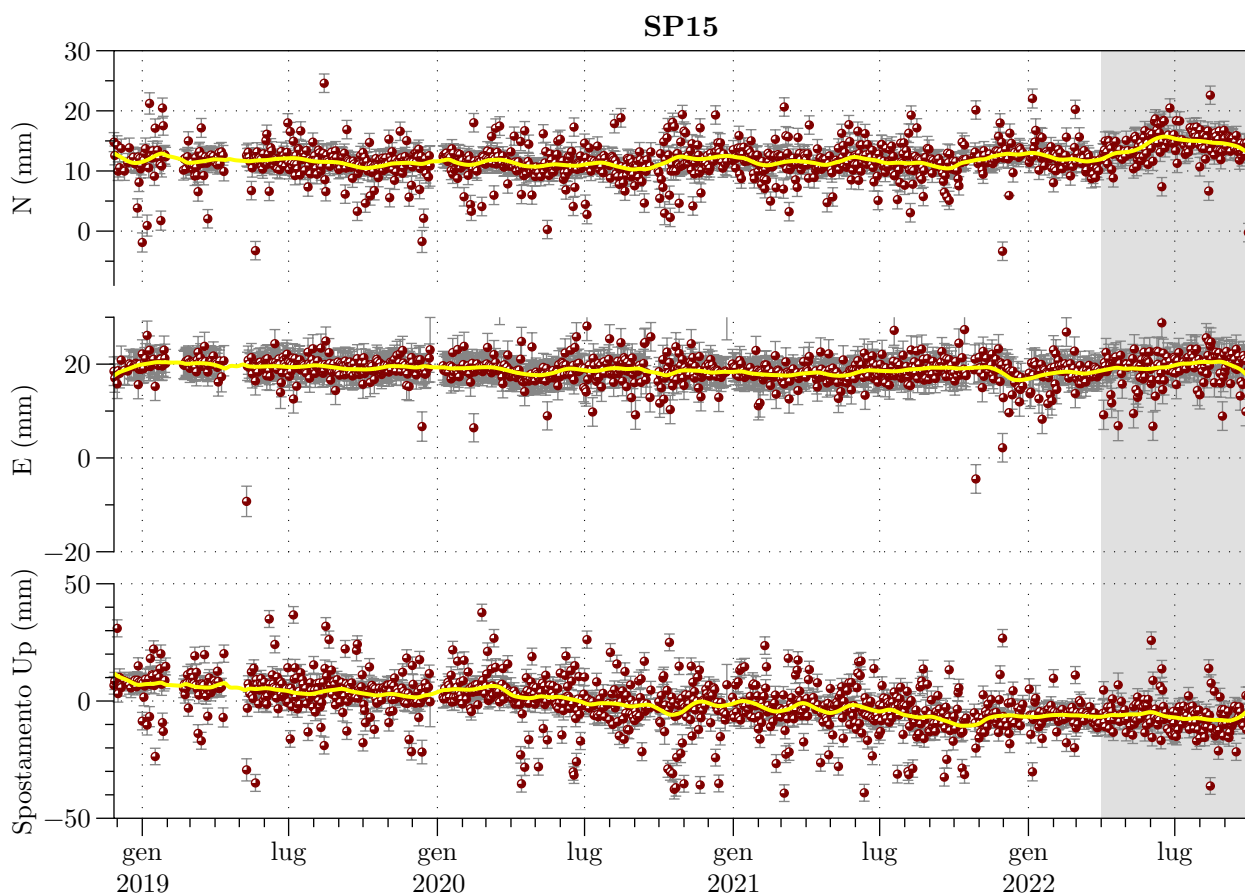


Figura 2.21: Spostamento relativo del ricevitore GNSS SP15 calcolato rispetto a SP12 e successivamente rimosso del moto di quest'ultimo, nelle componenti N, E e UP, aggiornato al 30 settembre 2022. In giallo la curva di regressione locale LOESS, scelta per fittare la distribuzione degli spostamenti ed usata per eliminare i valori anomali che ricadono fuori dai  $3\sigma$ .



### 3 Piezometri e assestimetri: relazioni con la piovosità

#### 3.1 Piezometri

Il comportamento dei piezometri superficiale ed intermedio, nel periodo aprile - settembre 2022 mostra un trend di abbassamento delle quote piezometriche nel periodo estivo, analogo a quello verificatosi nello stesso semestre dell'anno precedente, con valori leggermente più contenuti. Si osserva un lievissimo abbassamento delle quote anche nel piezometro più profondo.

Nel semestre in esame la quota del piezometro PS1C si attesta intorno a  $\approx -4.17$  m da p.c., a seguito di un

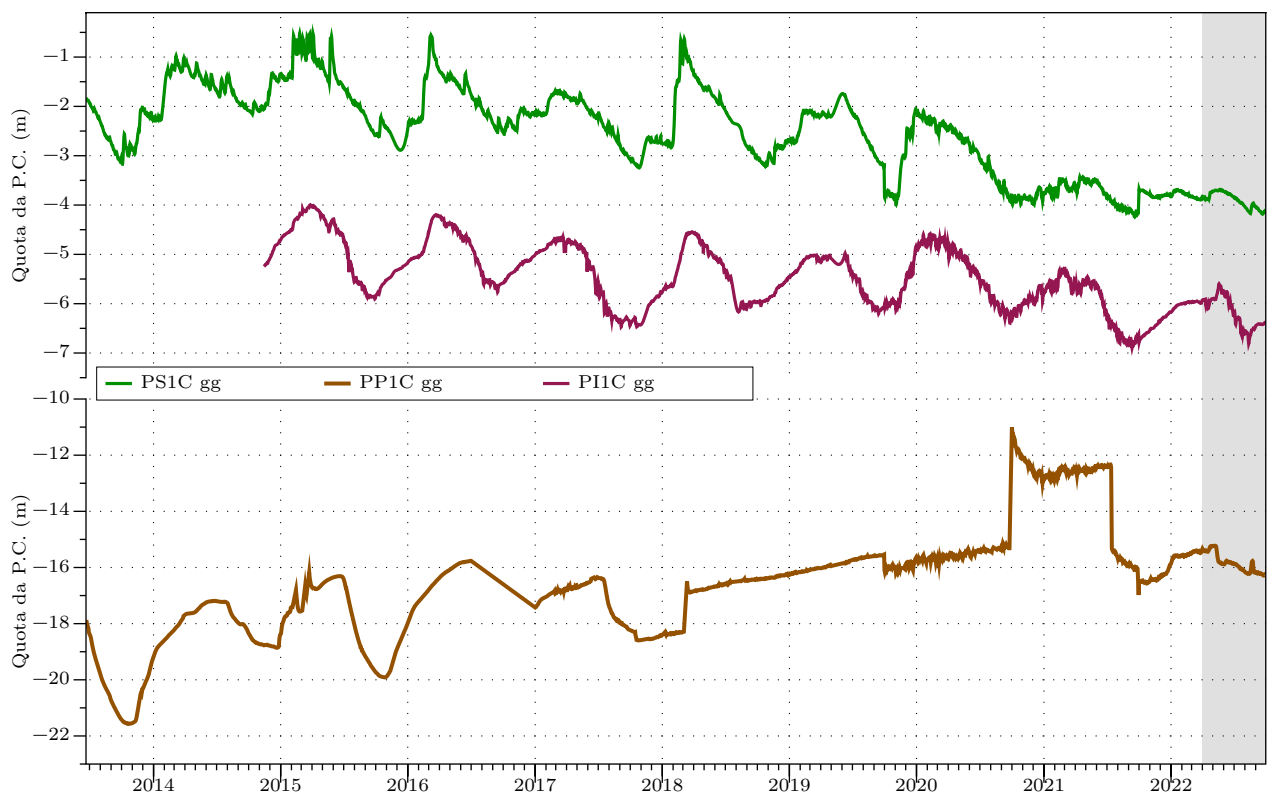


Figura 3.1: Variazioni giornaliere medie della quota dal piano campagna registrate rispettivamente nei piezometri superficiale, intermedio e profondo, compensate per la pressione atmosferica. Dal grafico sono escluse le medie con valori di deviazione standard  $\geq 0.05$ .

abbassamento di  $\approx 0.35$  m nel semestre in esame con un massimo di  $-0.45$  m tra fine maggio e metà agosto 2022.

La quota del piezometro intermedio si attesta  $\approx -6.4$  m ha registrato un abbassamento di  $\approx 0,45$  m con un trend più marcato tra maggio e fine agosto 2022.

Si osservano piccole risalite nelle quote dei due piezometri in corrispondenza di precipitazioni verificatesi a fine

agosto 2022.

Per quanto riguarda il piezometro profondo, a fine settembre 2021 è stato effettuato un tentativo di spurgo tramite un'unità coiled tubing con esito negativo: a causa dei sedimenti, il piezometro risulta non accessibile oltre la profondità 281m, corrispondente all'inizio del tratto fenestrato. In quest'ultimo semestre di monitoraggio, il piezometro profondo è tornato a registrare un andamento compatibile con i periodi estivi, mostrando un trend di abbassamento delle quote piezometriche (Fig. 3.2 e 3.3); l'entità degli abbassamenti registrati appare contenuta, dell'ordine di  $\approx 1$  m.

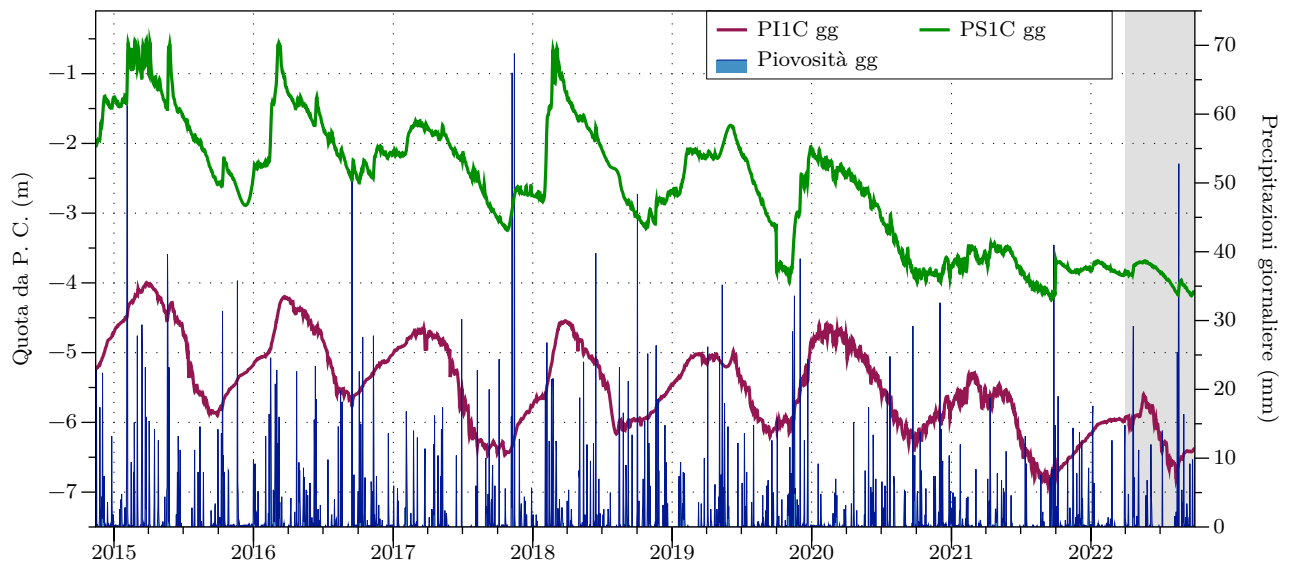


Figura 3.2: Variazioni giornaliere medie della quota da P. C. registrate nei piezometri superficiale e intermedio, in relazione alla piovosità giornaliera.

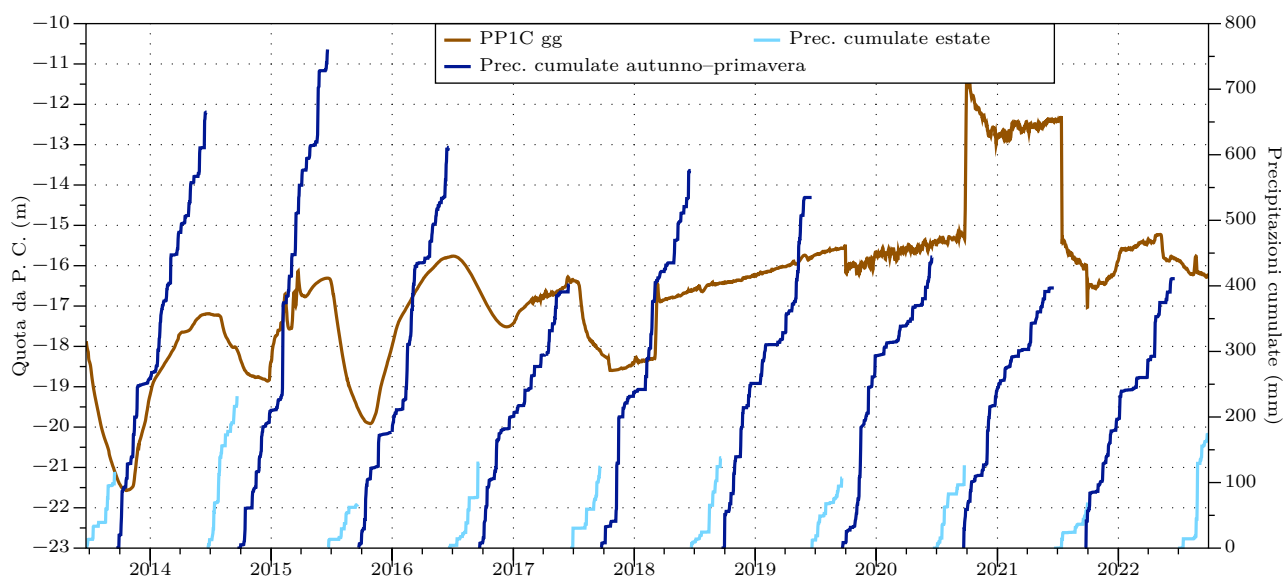


Figura 3.3: Variazioni giornaliere medie della quota da P. C. registrate nel piezometro profondo in relazione con le precipitazioni cumulate ogni anno. Per meglio evidenziare il comportamento stagionale dello strumento, le cumulate della piovosità vengono calcolate a partire dall'inizio dell'autunno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

### 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, ma appaiono più contenute in termini assoluti. Questi andamenti si inseriscono in un ulteriore quadro di compattazione generale osservabile con entrambi gli strumenti.

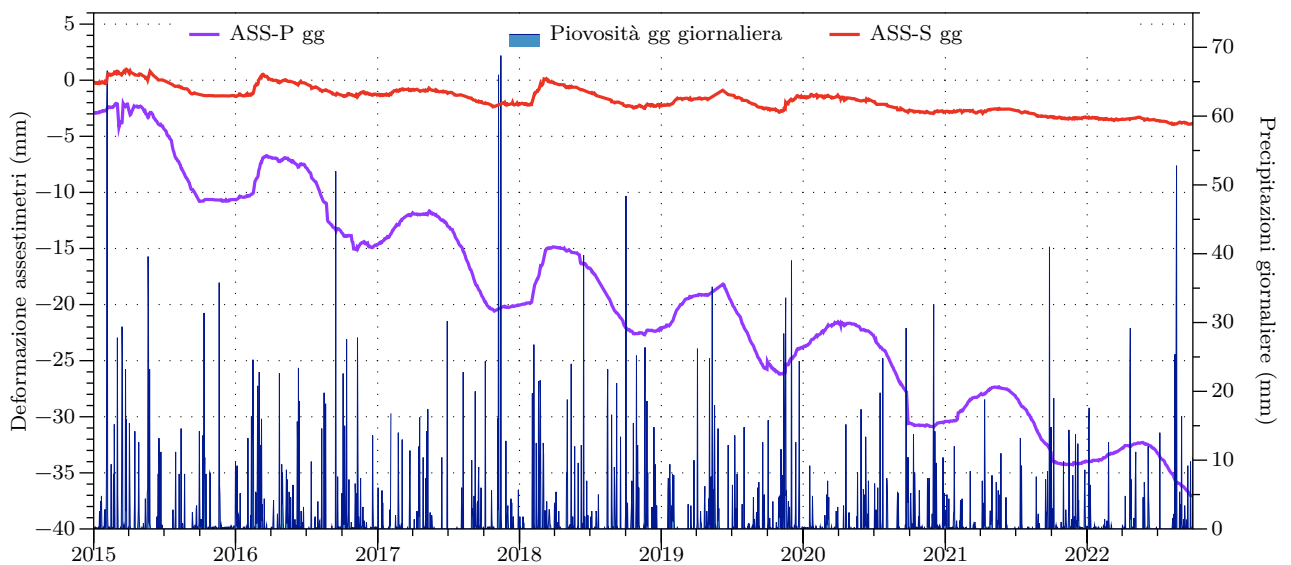


Figura 3.4: Deformazioni giornaliere medie registrate lungo le aste degli assestimetri superficiale (ASS-S) e profondo (ASS-P) in relazione alle precipitazioni giornaliere, a partire da gennaio 2015 fino al 30 settembre 2022.

- Nel semestre in esame, i primi 11 metri di sedimento (linea rossa in figura 3.4) si sono compattati di  $\approx 0.45$  mm tra aprile e settembre 2022. Questa dinamica copia il trend di lievissima compattazione da inizio monitoraggio ( $- 0.36$  mm/anno); a fine marzo 2022 lo strumento indica 3.93 mm di compattazione accumulata.
- I 350 metri di colonna sedimentaria, monitorata tramite l'assestometro profondo (linea viola in figura 3.4), si sono compattati di  $\approx 4.2$  mm nel semestre in esame. Tale dilatazione si verifica a partire da fine maggio e settembre 2022, successivamente ad una lievissima dilatazione della colonna nei primi mesi primaverili. Questa dinamica si inserisce nel complessivo trend di compattazione costante da inizio monitoraggio ( $\approx - 3.9$  mm/anno); a fine settembre 2022 lo strumento indica una compattazione complessiva di  $\approx 37.1$  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 25/09/22, 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.

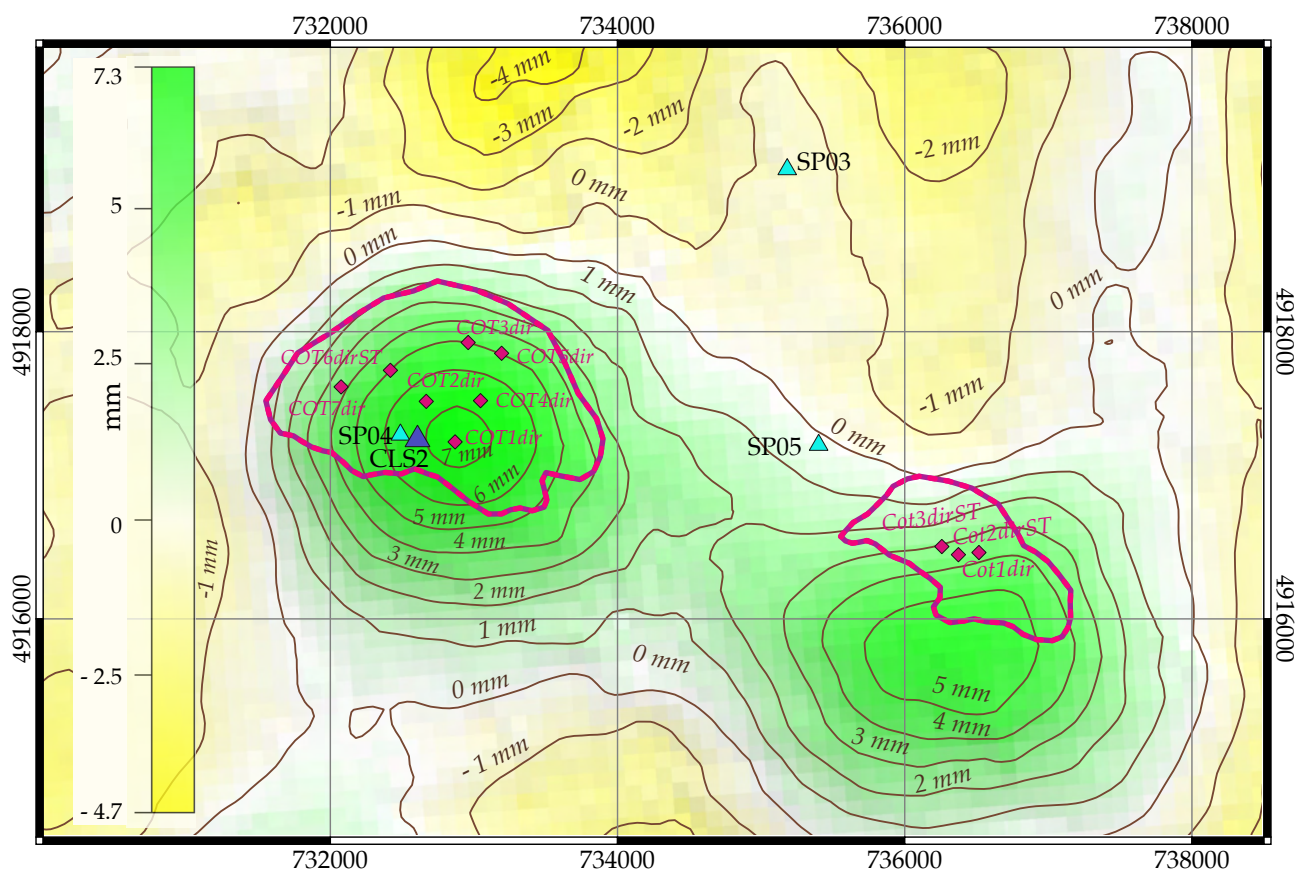


Figura 4.1: Superficie di spostamento verticale ottenuta tramite la serie temporale Sentinel-1: l'interpolazione utilizza lo spostamento cumulato da ogni bersaglio radar durante l'ultima fase di iniezione tra aprile e settembre 2022.

I dati dell'aggiornamento a settembre 2022 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 2022, nei cluster B e C ( $\approx 192$  MSmc nel Cluster-C,  $\approx 24$  MSmc nel Cluster-B, fig. 4.1), mostra le due zone di subsidenza 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 115 righe x 112 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  $+ 5$  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 una sollevamento areale compresa tra  $+ 2$  e  $+ 7$  mm all'interno del campo, con una media di  $+6/+7$  mm 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  $\approx 800/1000$  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.

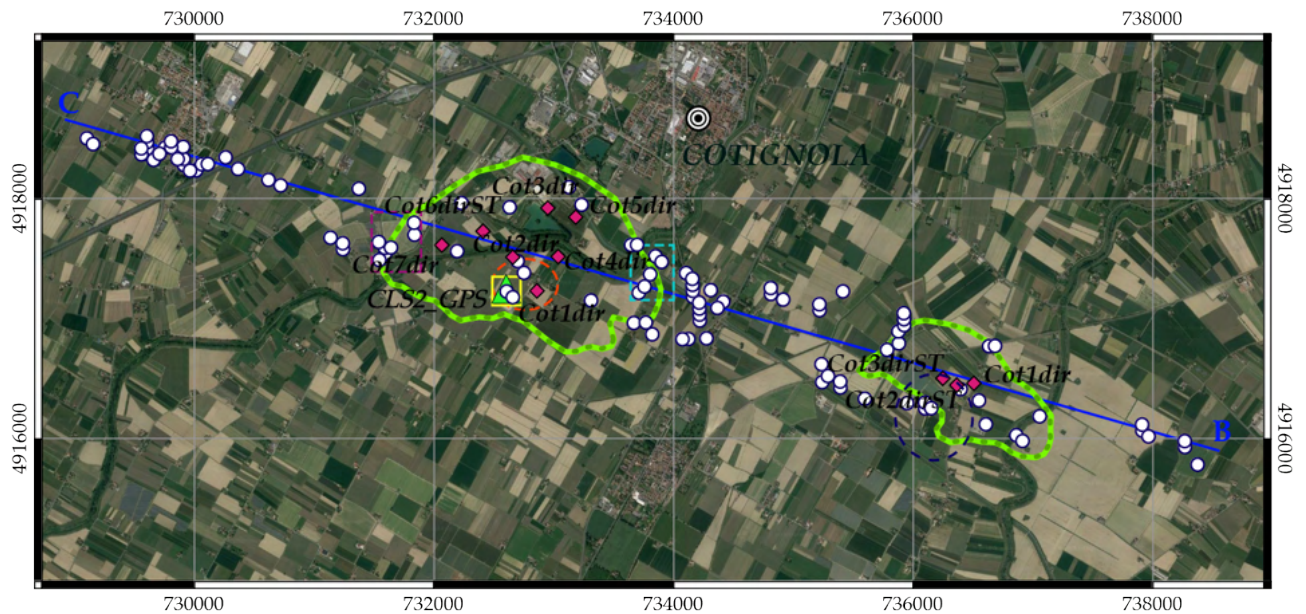


Figura 4.2: Mappa dei limiti di reservoir dei Cluster C e B; localizzazione del profilo CB (in blu) lungo il quale sono stati proiettati i bersagli radar (in bianco) che si distribuiscono attorno ad esso; il cerchio arancio al centro del Cluster-C evidenzia i bersagli radar di cui sono state analizzate 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.

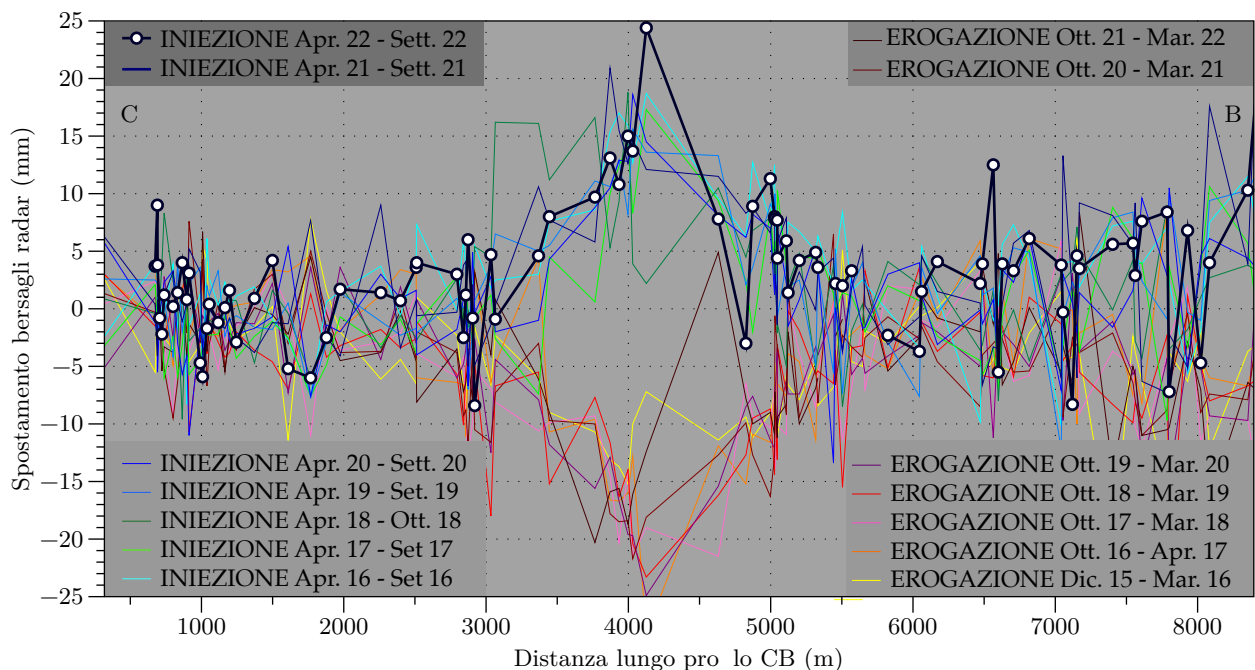


Figura 4.3: Profilo longitudinale di spostamento verticale ottenuto dai dati delle serie temporali Sentinel-1. Le curve del grafico sono costruite proiettando lungo il profilo CB, in blu nella mappa di figura 4.3, i valori di spostamento verticale dei bersagli radar (punti bianchi in mappa), che si distribuiscono 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 2022 (curva blu con punti bianchi in Fig. 4.3) si possono notare:

- un sollevamento medio di 5 mm, fino ad un massimo di 8 mm (a fronte di 23.8 Msmc iniettati) localizzato intorno al centro del Cluster-B (7000 - 8000 m in ascissa);
- un sollevamento medio di  $\approx 10$  mm, con massimi di 15 mm (fino a 24mm a fronte di  $\approx 191.7$  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 sebbene un PS registri un valore di sollevamento massimo mai registrato finora.

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.

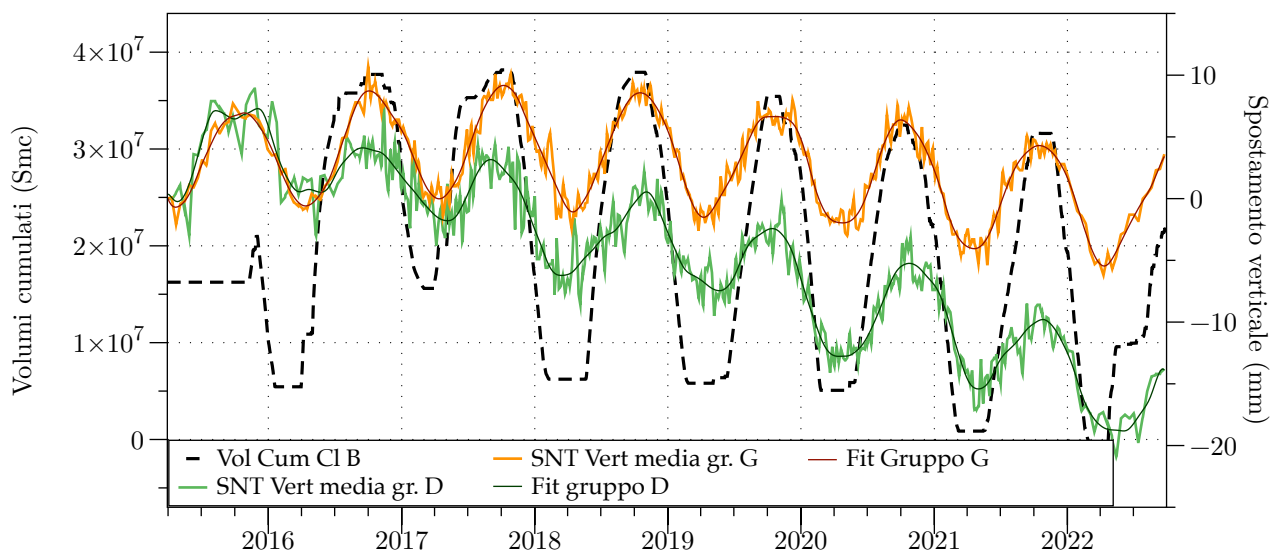


Figura 4.4: Serie temporali di spostamento verticale dei bersagli radar Sentinel-1 che hanno mostrato massimo abbassamento nel semestre aprile - settembre 2022, sia nella zona centrale che in quella centro-meridionale del Cluster-B (cerchio blu in fig. 4.2); in verde la media degli spostamenti dei PS (gruppo G) A3VBFQG, A3VWVC8, A3XP65K, A3YALRC, A3YW1D4, A3WIAY1, A3X3QJT, A3YW1D5; in arancione la media degli spostamenti dei PS A448XT5, A4322LO, A4322LP (gruppo D).

Questi PS (fig. 4.4), localizzati sia in un'area esterna alla proiezione in superficie del reservoir che al suo interno (cerchio blu in fig. 4.2), si sollevano fino a + 8 mm nell'ultimo semestre, in fase con l'iniezione. Bisogna sottolineare che il massimo di sollevamento intorno al Cluster-B si posiziona a ridosso dei confini del campo



(fig. 4.1) interessando maggiormente l'area a sud del reservoir; alcuni gruppi di PS (linea arancio in figura 4.4) mostrano pertanto medie di sollevamento anche più marcate rispetto a PS posizionati al centro del Cluster-B.

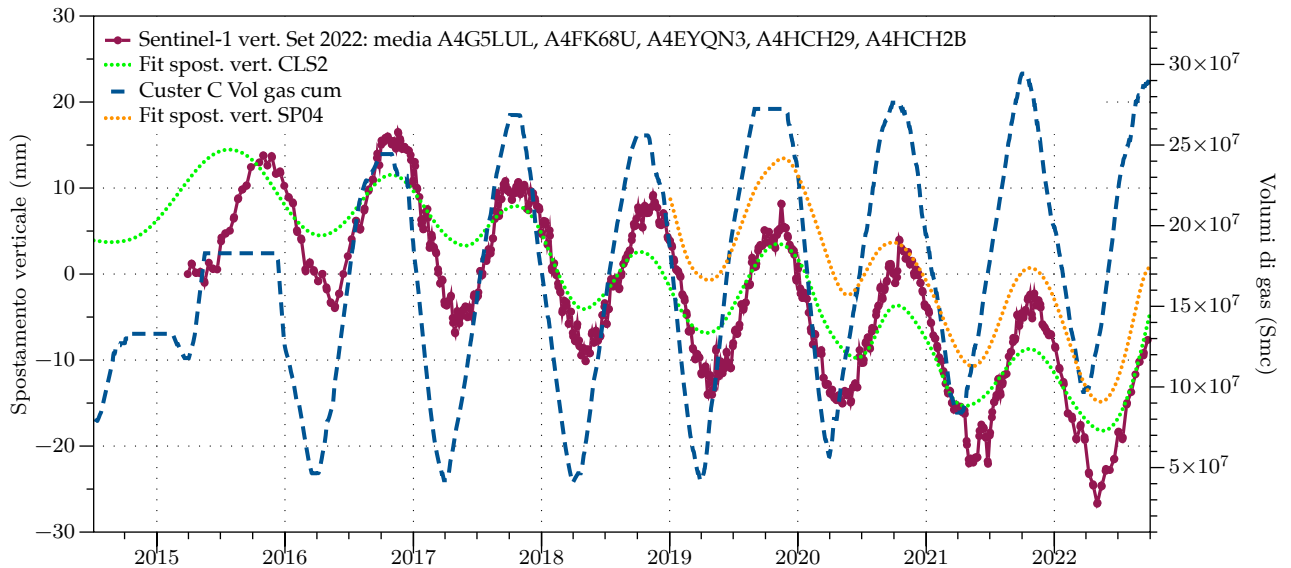


Figura 4.5: Confronto tra medie degli spostamenti verticali dei bersagli radar (mm) individuati al centro del Cluster-C (cerchio arancio in Fig. 4.2), fit delle serie GPS verticali di CLS2 e SP04 e volumi movimentati nel pool CC1.

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 5 PS situati al centro del Cluster-C ammonta a  $\approx +15$  mm, nel periodo maggio-settembre 2022. 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 negativi in ordinata indicano movimento verso ovest), così come i PS ad est con andamento opposto, leggermente positivo, si muovono verso est. Va inoltre osservato come nell'ultimo anno, ed in particolare nell'ultimo semestre, sia le serie poste ad est che quelle al centro del cluster (curve rossa e verde in fig. 4.6) descrivano dei trend di spostamento verso est che non evidenziano degli andamenti chiari e netti (in particolare nelle serie orizzontali poste al centro del Cluster-B) come negli anni scorsi (pre-2021).

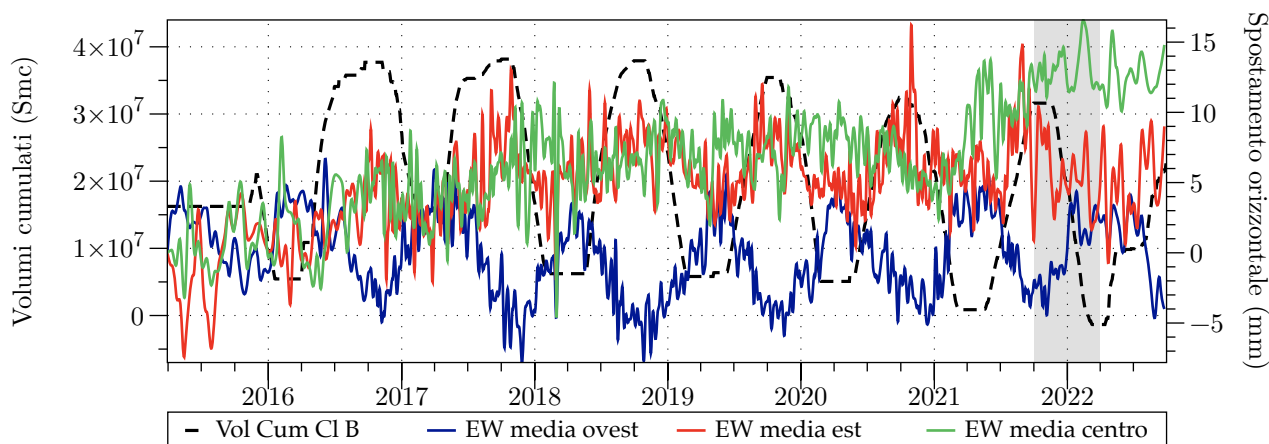


Figura 4.6: Serie temporali di spostamento orizzontale dei bersagli radar Sentinel-1 che hanno mostrato massimi movimenti nel semestre aprile - settembre 2022, nella zona centrale e meridionale del Cluster-B (cerchio blu in fig. 4.2); in rosso la media degli spostamenti dei PS ad est A3ZHGX6, A3YW1DF, 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  $\approx - 4$  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 positivi fino a  $\approx - 6$  mm, e descriva dunque un allontanamento (verso ovest) dal centro del reservoir.

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.

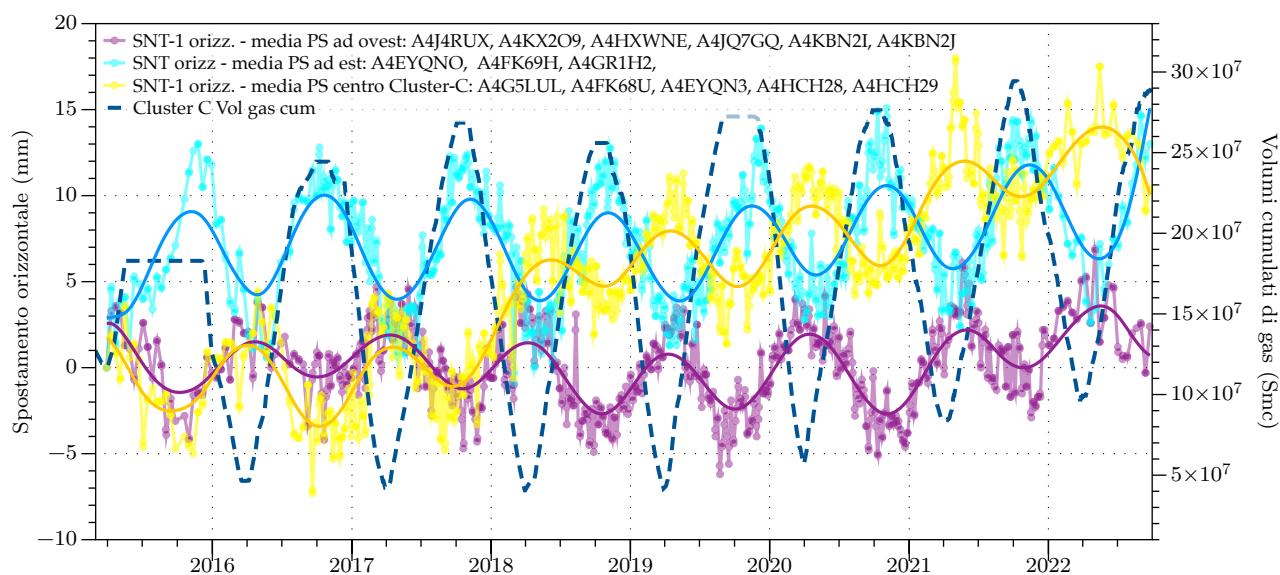


Figura 4.7: Confronto degli spostamenti orizzontali medi di gruppi di PS localizzati al centro del reservoir e in zone ad est e ad ovest di esso (box azzurro, giallo e viola in Fig. 4.2); in azzurro media degli spostamenti di PS situati ad est del centro; in giallo dei PS al centro; in viola di PS situati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

## 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 25/09/22 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 2022 nel Cluster-A ( $\approx 52$  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.

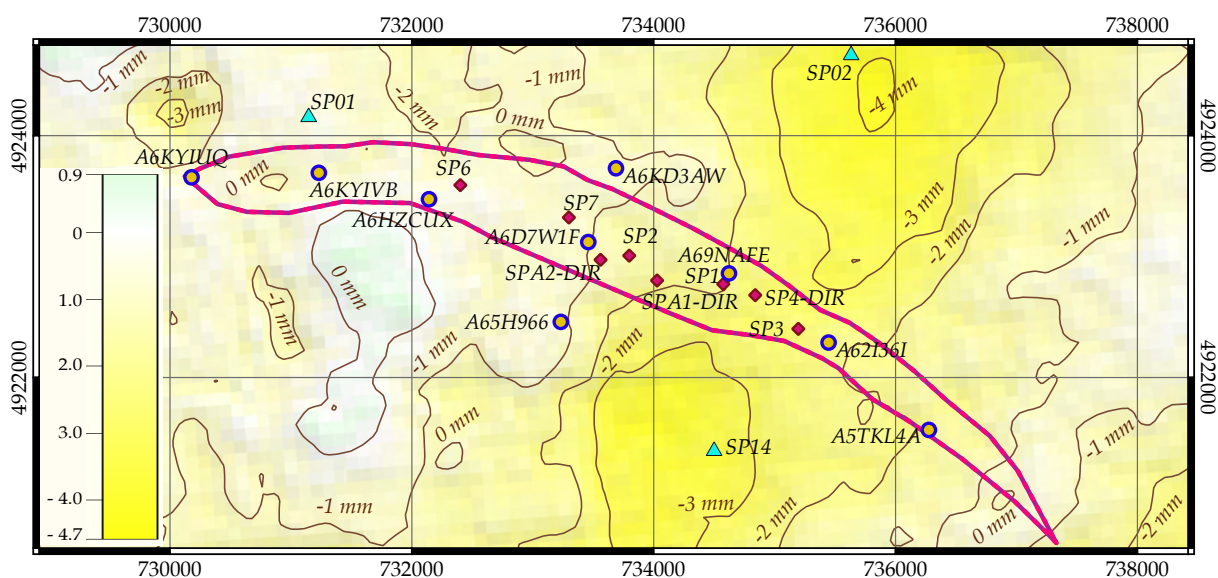


Figura 4.8: Superficie di spostamento verticale ottenuta tramite la serie temporale Sentinel-1: l'interpolazione utilizza lo spostamento cumulato da ogni bersaglio radar durante l'ultima fase di iniezione tra aprile e settembre 2022.

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.

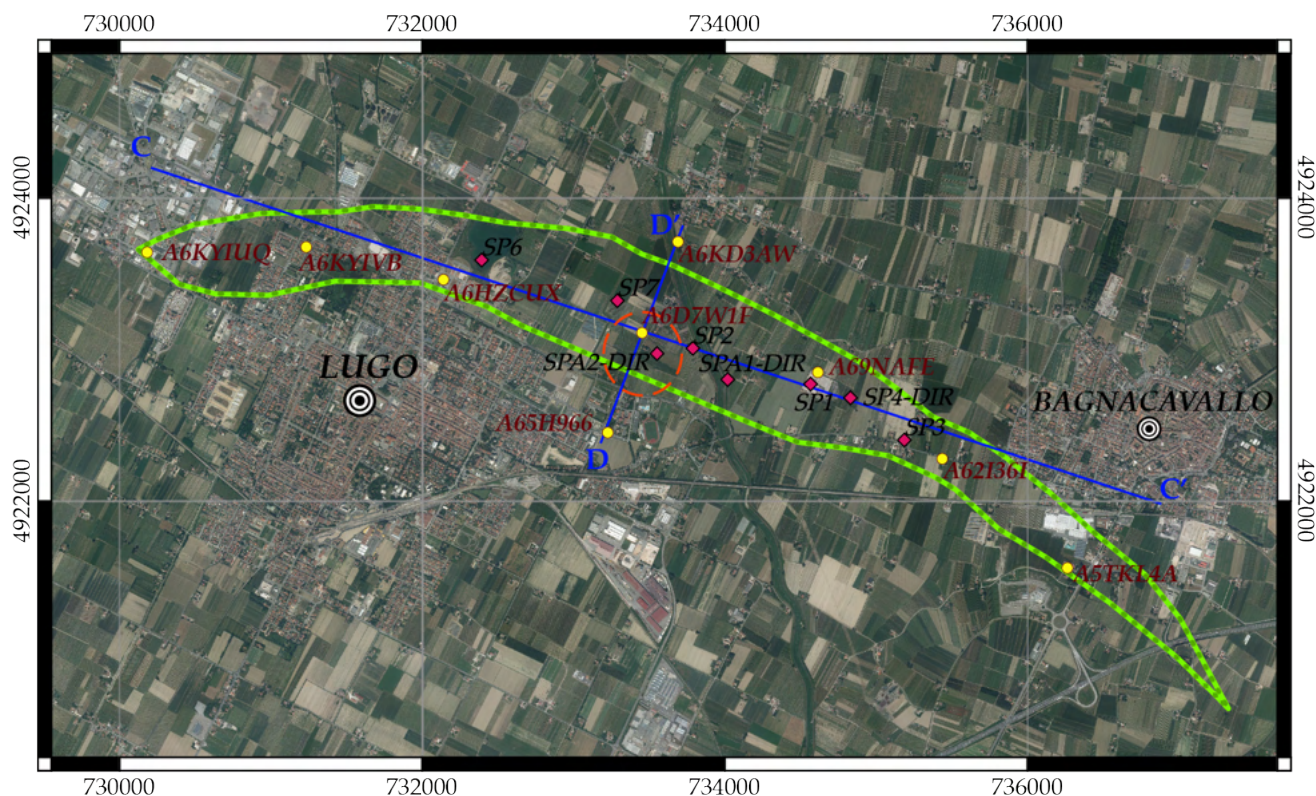


Figura 4.9: Mappa della proiezione in superficie del top del giacimento di San Potito, con la posizione dei fondo pozzo in fucsia; in giallo i bersagli radar della serie Sentinel-1 aggiornata al 25/09/22, i cui spostamenti sono stati proiettati lungo i profili CC' e DD' per creare le figure 4.10 e 4.11: 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 + 3 e - 5 mm tra una fase e l'altra, con massimi fino a + 7.5 e - 6.5 mm. Il PS A6HZCUX, posizionato a  $\approx 2070$  m lungo il profilo CC', continua ad essere (vedi precedente documento "Report14004COT01-GEOPH-EDIS0-DV20-REV03") quello più stabile con variazioni di quota topografica 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, fino a - 5 mm durante l'ultima e fino a - 6 mm

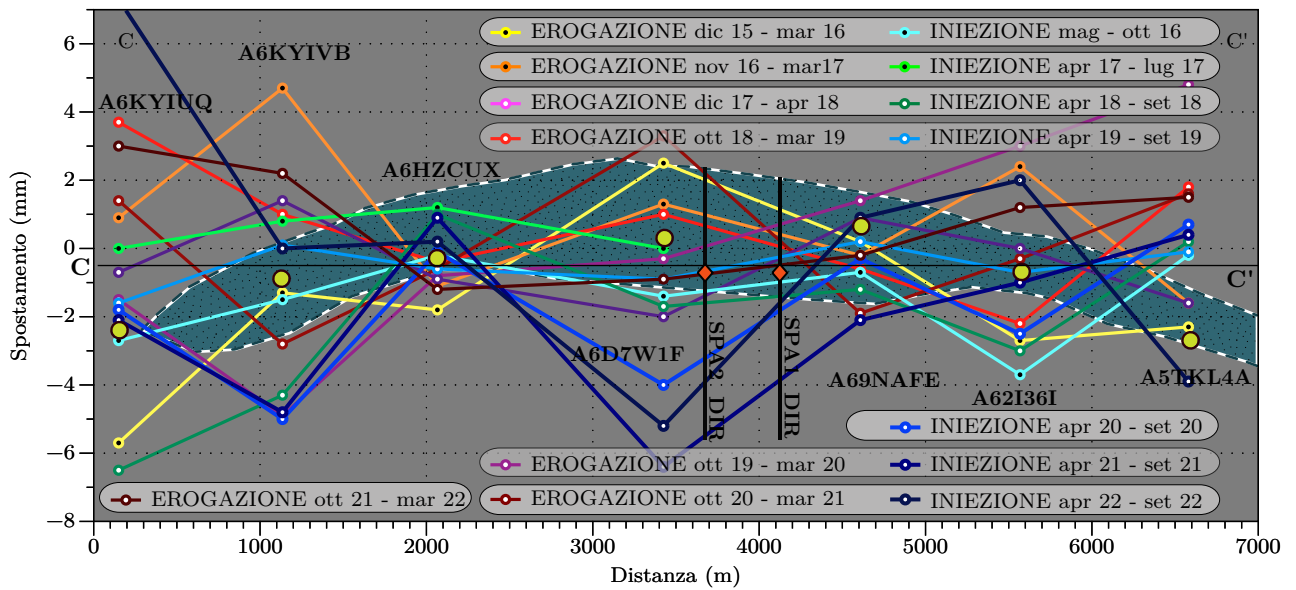


Figura 4.10: Spostamenti di 7 dei 9 bersagli radar di controllo per la modellazione geomeccanica, proiettati lungo la sezione CC' (mappa di Fig. 4.9); in azzurro verde e blu gli spostamenti avvenuti durante le fasi di iniezione; in giallo - bordeaux quelli durante le fasi di erogazione: le serie sono 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.

durante la penultima fase di iniezione. 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: in questo periodo per esempio A6D7W1F va in subsidenza di -5 mm, in disaccordo con la fase di iniezione aprile - settembre 2022 (così come nell'anno precedente aprile - settembre 2021); nel semestre precedente si era invece abbassato di -1 mm, in accordo con la fase di erogazione.

Anche tutti gli altri 7 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  $\approx + 7.5$  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 osserva nel semestre il proseguo dell'abbassamento iniziato a gennaio 2022 che perdura fino a fine luglio ( $\approx - 2$  mm nel semestre), fuori fase rispetto all'attività di iniezione; da agosto a fine settembre avviene un sollevamento di  $\approx + 1$  mm in fase con essa. Tale inversione di trend da fine luglio mima temporalmente, seppur con valori più contenuti, le deformazioni avvenute nei semestri di iniezione precedenti. 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.

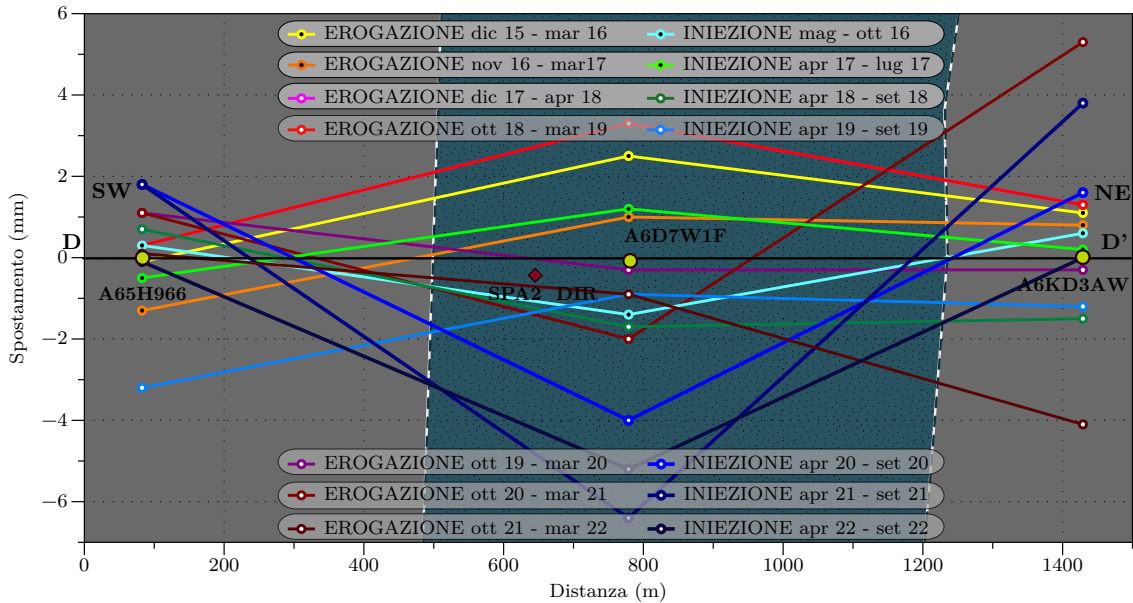


Figura 4.11: Spostamenti di 3 dei 9 bersagli radar di controllo per la modellazione geomeccanica, proiettati lungo la sezione DD' (mappa di Fig. 4.9); in azzurro, verde e blu gli spostamenti avvenuti durante le fasi di iniezione; in giallo - bordeaux quelli durante le fasi di erogazione: le serie sono 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  $\approx 70$  gradi verso E, per sovrapporre la sezione DD' all'asse delle ascisse della figura.

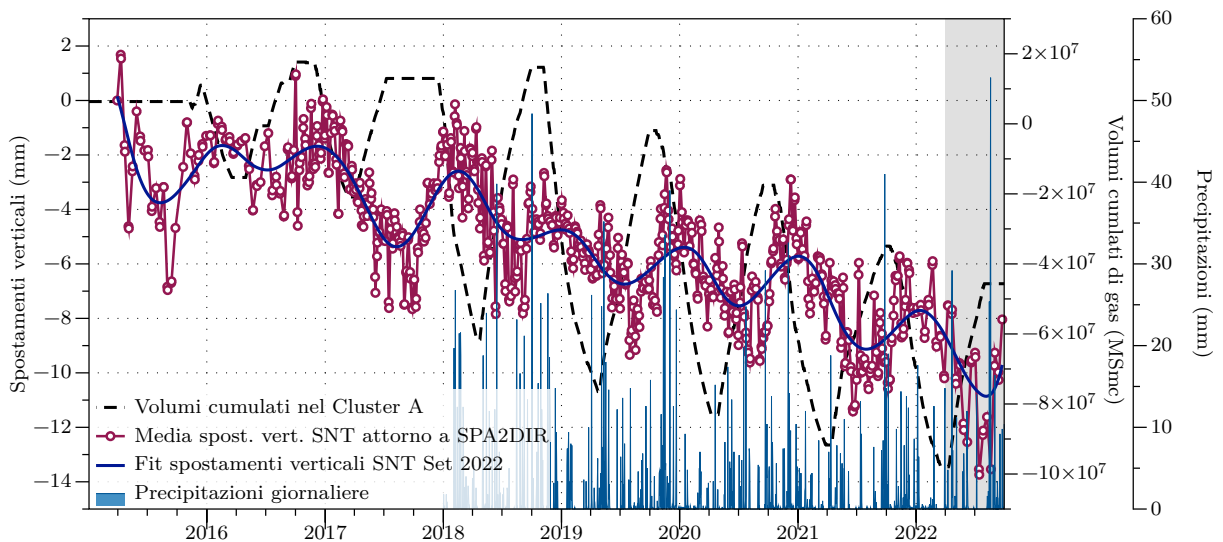


Figura 4.12: Serie temporale di spostamento medio dei cinque bersagli radar A6D7W1F, A6DTBN4, A68GF75, A6EER91, A68GF7C che circondano il pozzo San Potito A2 DIR (cerchio arancio in figura 4.9), al di sopra della culminazione strutturale del giacimento, in relazione alla movimentazione di gas ed alle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

La serie di dati lunga 1 anno, acquisita dopo l'intervento del 30 settembre 2021 sul piezometro profondo PP1C,

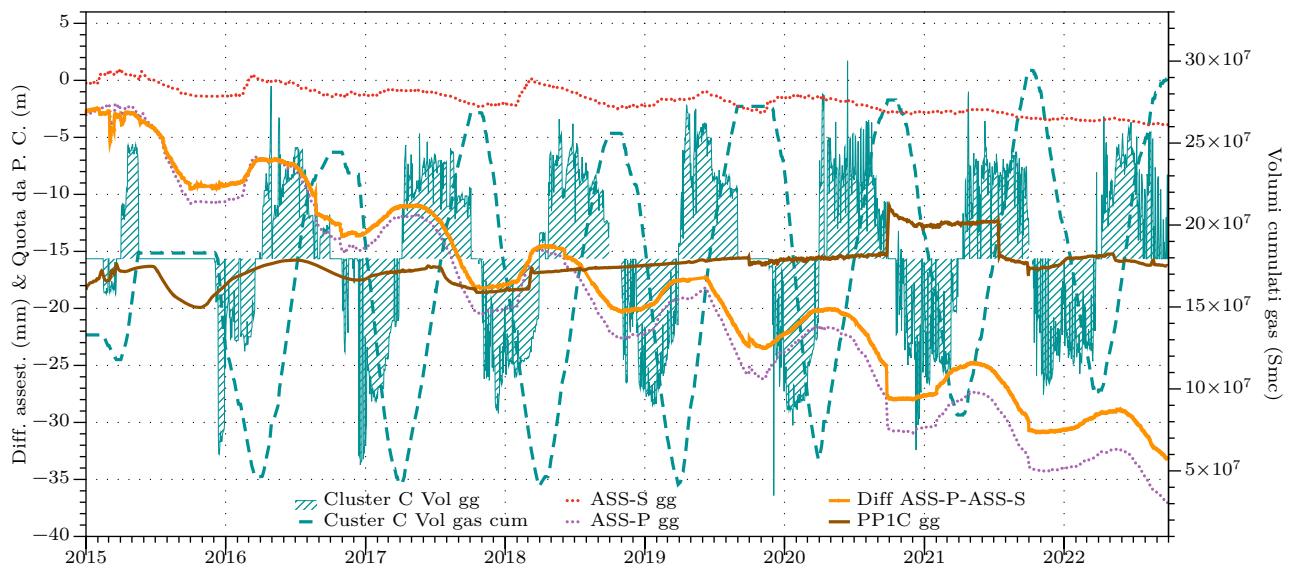


Figura 5.1: Andamento degli strumenti profondi in relazione alla movimentazione di gas nel reservoir del Cluster-C per tutto il periodo di monitoraggio. In arancio la curva che descrive la componente profonda della deformazione, ottenuta dalla differenza degli spostamenti di ASS-P meno quelli di ASS-S.

ha registrato la tipica oscillazione stagionale di pressione nell'acquifero profondo, seppur di entità contenuta. Nonostante questo ri-acquisito funzionamento, il piezometro PP1C verrà comunque dismesso poiché tra ottobre e novembre 2022 sul piazzale del Cluster-C è stato perforato un nuovo piezometro profondo, completato sullo stesso intervallo di quello esistente e distante pochi metri da esso, i cui dati saranno disponibili a partire da dicembre 2022; essi verranno dunque mostrati a partire dal prossimo report di monitoraggio semestrale, previsto per aprile 2023.

In questo semestre, non si evidenziano sostanziali variazioni riguardo la compattazione complessiva dei sedimenti profondi fino a 350 m ( $\approx -3.6$  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 inferiori, agli 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



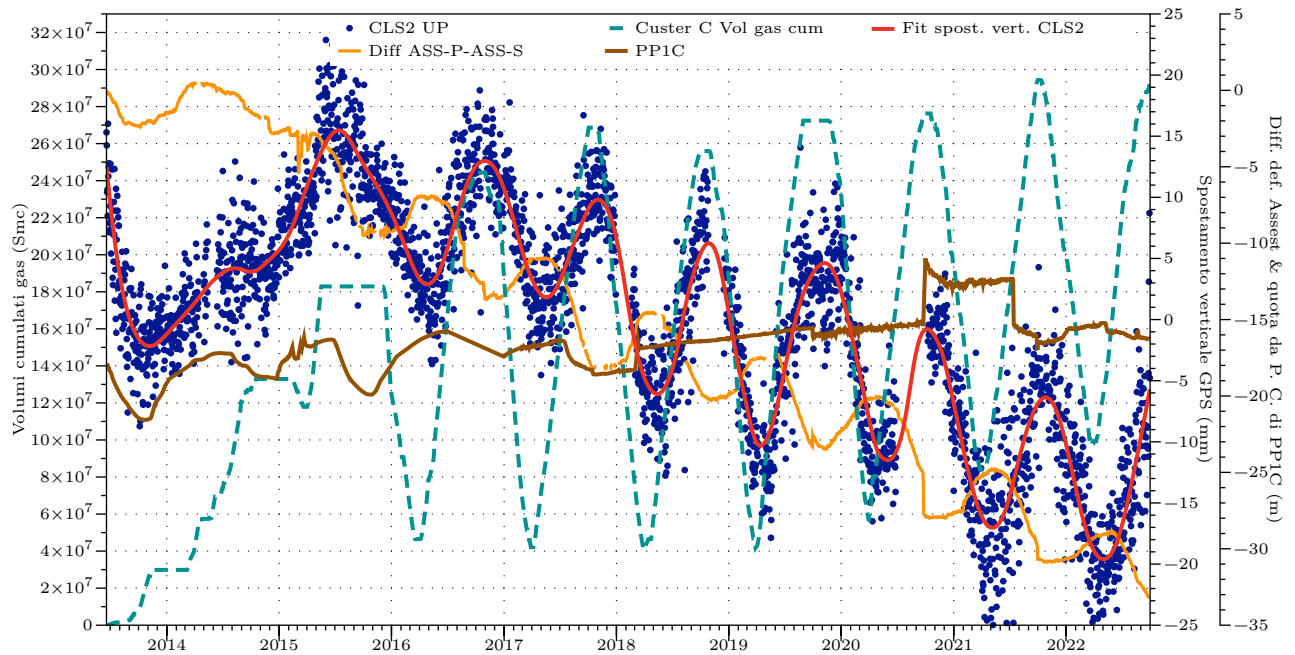


Figura 5.2: Confronto tra la serie temporale delle posizioni della stazione GPS CLS2 (componente verticale) con la movimentazione di gas nel Cluster-C, con l'andamento del piezometro profondo e con quello della differenza tra le misure degli assestimetri.

fatto che, nell'ultimo semestre, la minore compattazione registrata rispetto alle estati precedenti corrisponde ad una maggiore quantità di precipitazioni dell'ultimo agosto 2022.

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 2022, la stazione CLS2 registra un sollevamento medio di  $\approx +14$  mm a fronte dell'iniezione di  $\approx 191.7$  Msmc dal Cluster-C, simile a quanto riscontrato per la stazione a singola frequenza SP04 ( $\approx +15$  mm). Questi valori risultano in linea con quelli osservati in altre fasi di iniezione. 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  $\approx -3.7$  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  $\approx -3.6$  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  $\approx 7$  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 (2.7 mm) dice che i primi 10 m della colonna investigata sono responsabili già del 10% della compattazione misurata nei 350 m, 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 +14 mm nel semestre, mentre quella a singola frequenza SP04 + 15 mm;
- i valori di spostamento verticale mediati per i PS posti al centro del cluster-C descrivono un sollevamento di  $\approx + 20$  mm.
- dal 2016 (stoccaggio a regime) la serie Sentinel-1 evidenzia un complessivo andamento di subsidenza (-

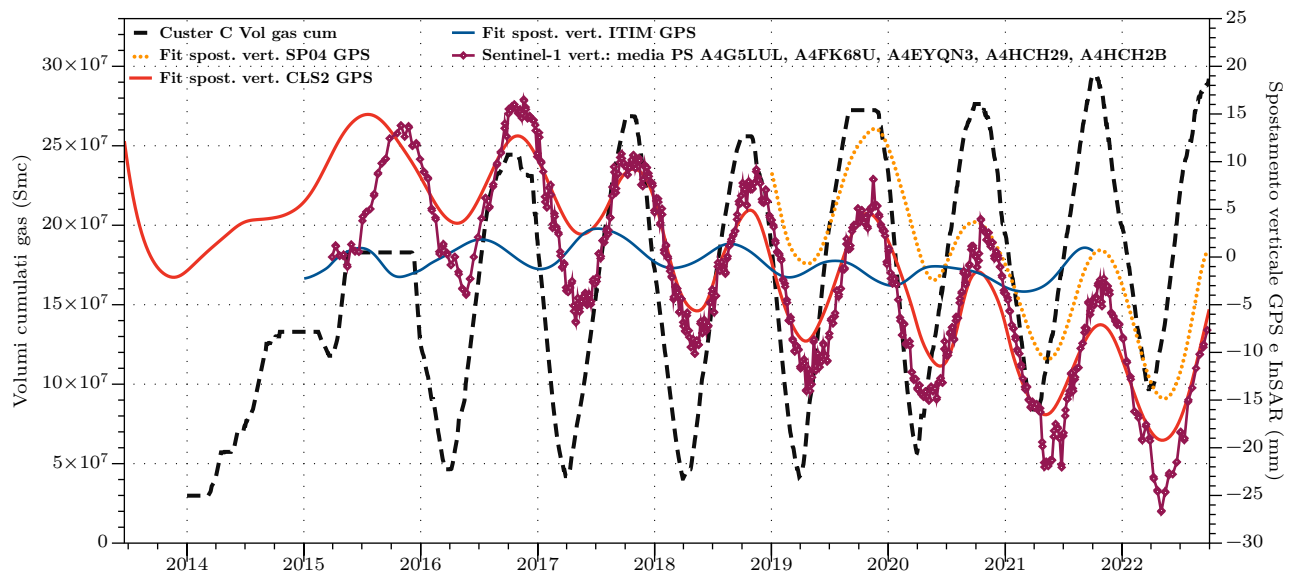


Figura 5.3: Confronto tra la serie temporale degli spostamenti della stazione GPS (componente verticale) con la movimentazione di gas nel Cluster-C, con la serie Sentinel-1 al 25 settembre 2022 e con la serie temporale GPS della stazione ITIM.

3.5 mm/anno) che si discosta di poco dalla serie GPS ( $\approx -3.7$  mm/anno, negli ultimi 7 anni)

La serie temporale di SP04 mostra un buon accordo con l'entità degli spostamenti della serie media dei 5 PS individuati al centro del Cluster-C, e con i tempi dei cicli di stoccaggio (Figs 5.3 e 5.4).

In questo semestre, a differenza del precedente, la serie temporale GPS di SP05 non risulta in accordo con lo spostamento complessivo misurato dalle serie temporali dei PS A4EDB2U e A4DRVH1 (localizzati rispettivamente a  $\approx 25$  metri NE e  $\approx 45$  m SO da essa): SP05 accumula infatti a fine semestre un sollevamento di + 3 mm, mentre la deformazione media della componente verticale InSAR dei 2 PS descrive un abbassamento di  $\approx -4.5$  mm (Fig. 5.5).

La serie temporale di SP01, non mostra accordo con le fasi della movimentazione di gas nello stoccaggio, ma è invece in accordo con l'andamento della serie temporale del PS A6QWUX6 (posizionato a  $\approx 220$  metri E da essa); nel semestre di iniezione in esame infatti SP01 si oscilla di  $\pm 4$  mm, senza accumulare deformazione, mentre A6QWUX6 si abbassa di solo -1 mm. SP01 non è invece in accordo con la deformazione del PS ascendente B7EUW5G (localizzato  $\approx 49$  metri a nord di essa) il quale accumula una deformazione verticale di  $\approx +3$  mm nel semestre (Fig. 5.6).

Nel caso delle serie interferometriche l'ampiezza del sollevamento non si discosta in maniera significativa da quelle già osservate per altri periodi di erogazione, così come per i dati GPS.

Allo stato attuale del monitoraggio, non è dunque verificata una proporzionalità tra quantitativo di gas movi-

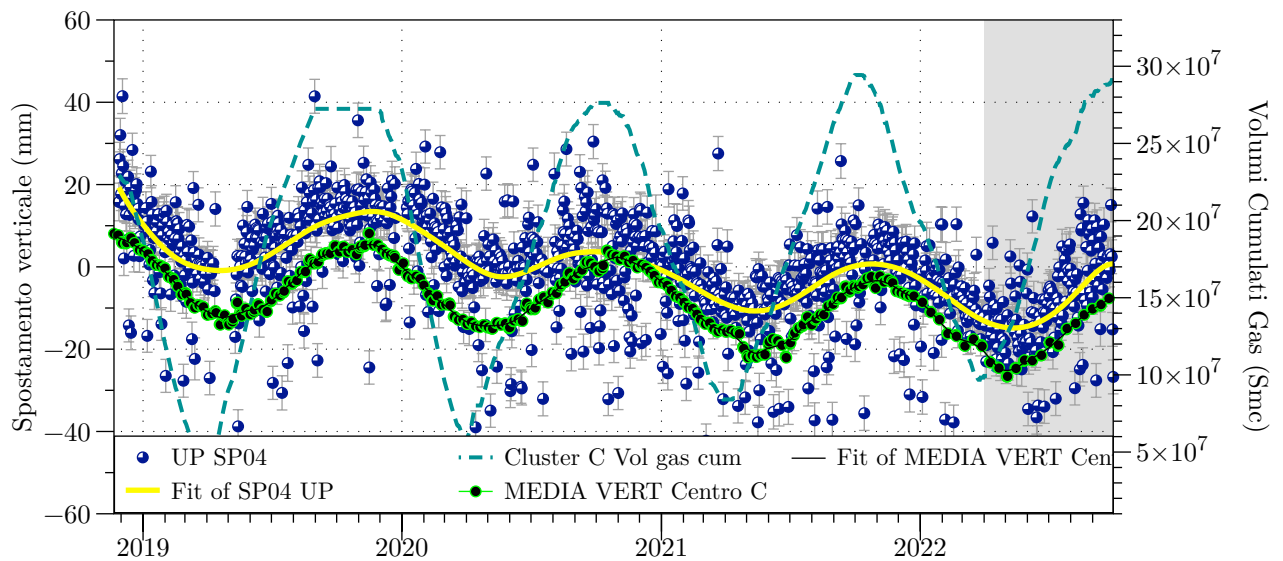


Figura 5.4: Confronto tra la serie temporale delle posizioni della stazione GNSS SP04 (componente verticale, da cui è stato rimosso il moto di SP12) con la movimentazione di gas nel Cluster-C e con le serie Sentinel-1 (media dei 5 punti al centro del Cluster-C), al 30 settembre 2022.

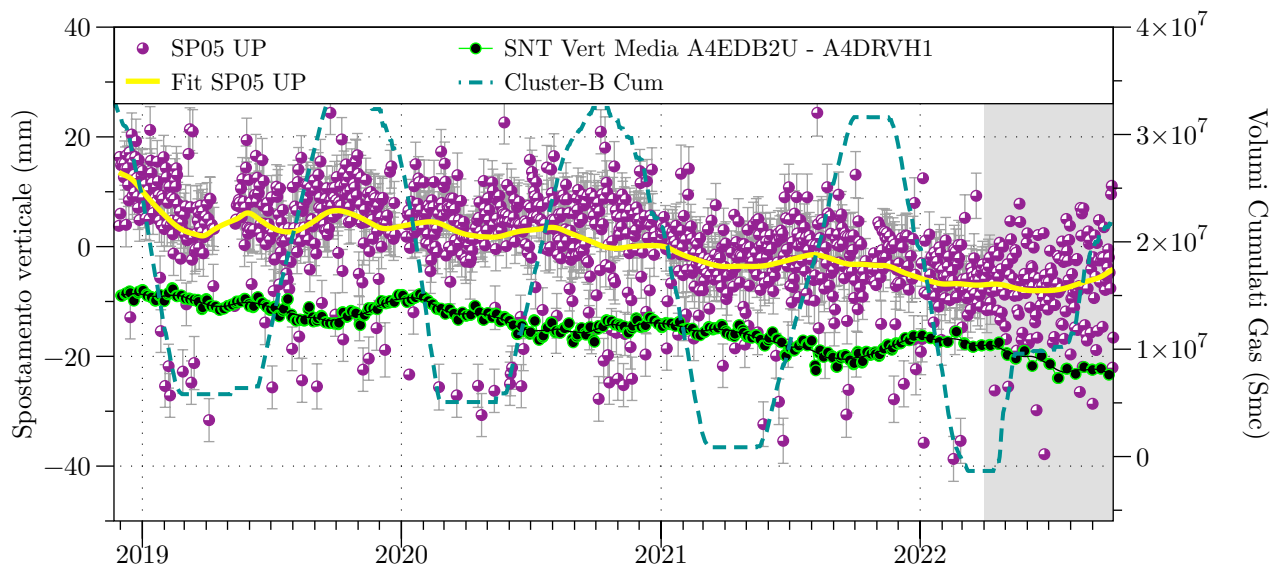


Figura 5.5: Confronto tra la serie temporale delle posizioni della stazione GNSS SP05 (componente verticale, corretta rispetto agli spostamenti di SP12) con la movimentazione di gas nel Cluster-B e con la media delle serie verticali Sentinel-1 dei PS A4EDB2U, A4DRVH1 posizionati rispettivamente a  $\approx 25$  m NE e 45 m SO da essa, al 30 settembre 2022.

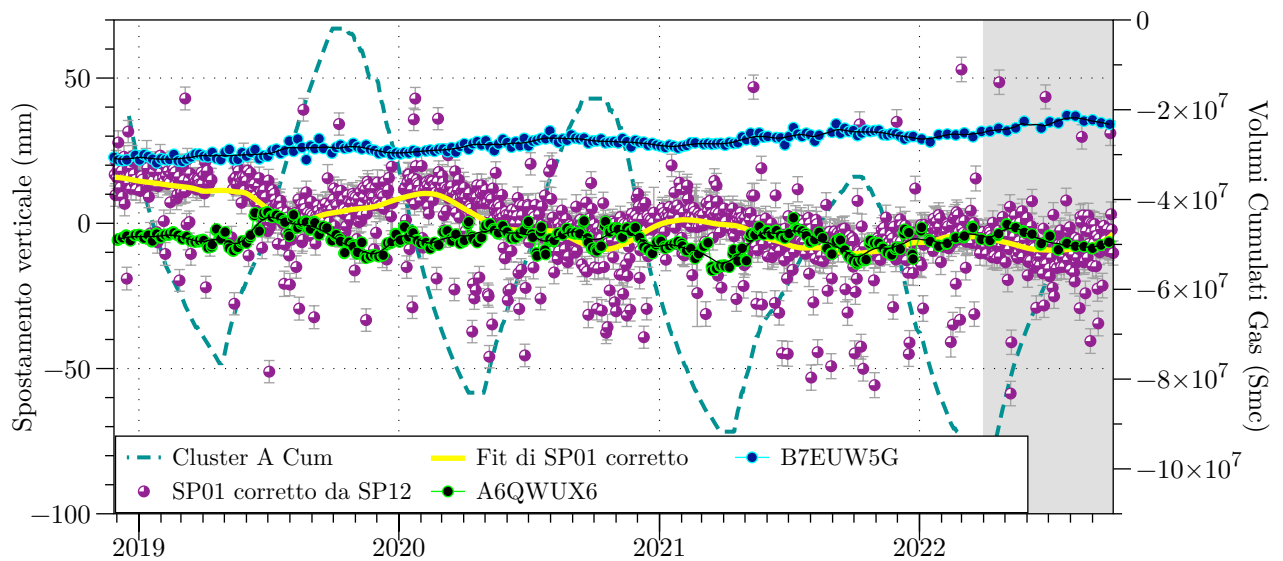


Figura 5.6: Confronto tra la serie temporale delle posizioni della stazione GNSS SP01 (componente verticale, corretta rispetto agli spostamenti di SP12) con la movimentazione di gas nel Cluster-A e con le serie Sentinel-1 ascendente (PS B7EUW5G posizionato a  $\approx 49$  m da SP01) e verticale (PS A6QWUX6 posizionato a  $\approx 220$  m E di SP01) al 30 settembre 2022.

mentato 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 ( $\approx -4$  mm) che lungo quella Nord ( $\approx -2$  mm): la composizione di tale moto restituisce uno spostamento che allontana la stazione dal centro del Cluster-C di  $\approx 4.5$  mm in direzione ovest-sud/ovest. Anche la stazione SP04 registra spostamenti negativi lungo le componenti Est e Nord del moto che la allontanano dal centro del reservoir ( $\approx -5$  mm e  $-1.5$  mm, rispettivamente). Tale allontanamento viene registrato anche dai bersagli radar Sentinel-1 individuati attorno alla stazione CLS2 ( $\approx -7$  mm): 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).

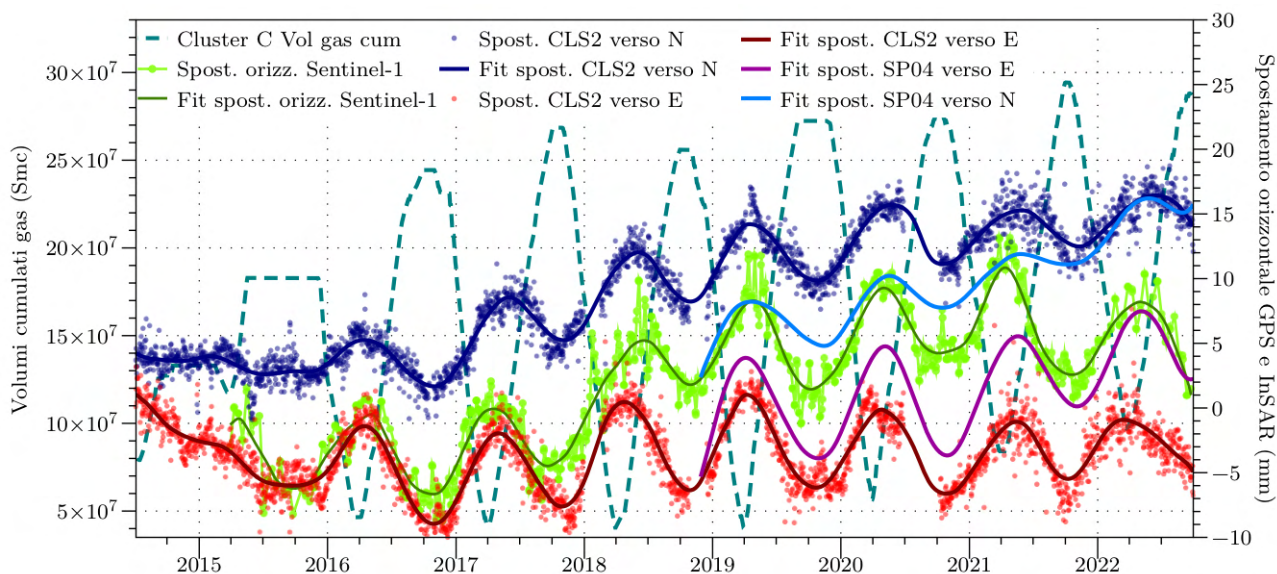


Figura 5.7: Confronto tra la serie temporali delle posizioni GPS orizzontali delle stazioni CLS2 e SP04 con la movimentazione di gas nel Cluster-C. Gli spostamenti sono riferiti alla placca Adria, allo scopo di eliminare la componente crostale del moto; in rosso la componente est e in blu la componente 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.

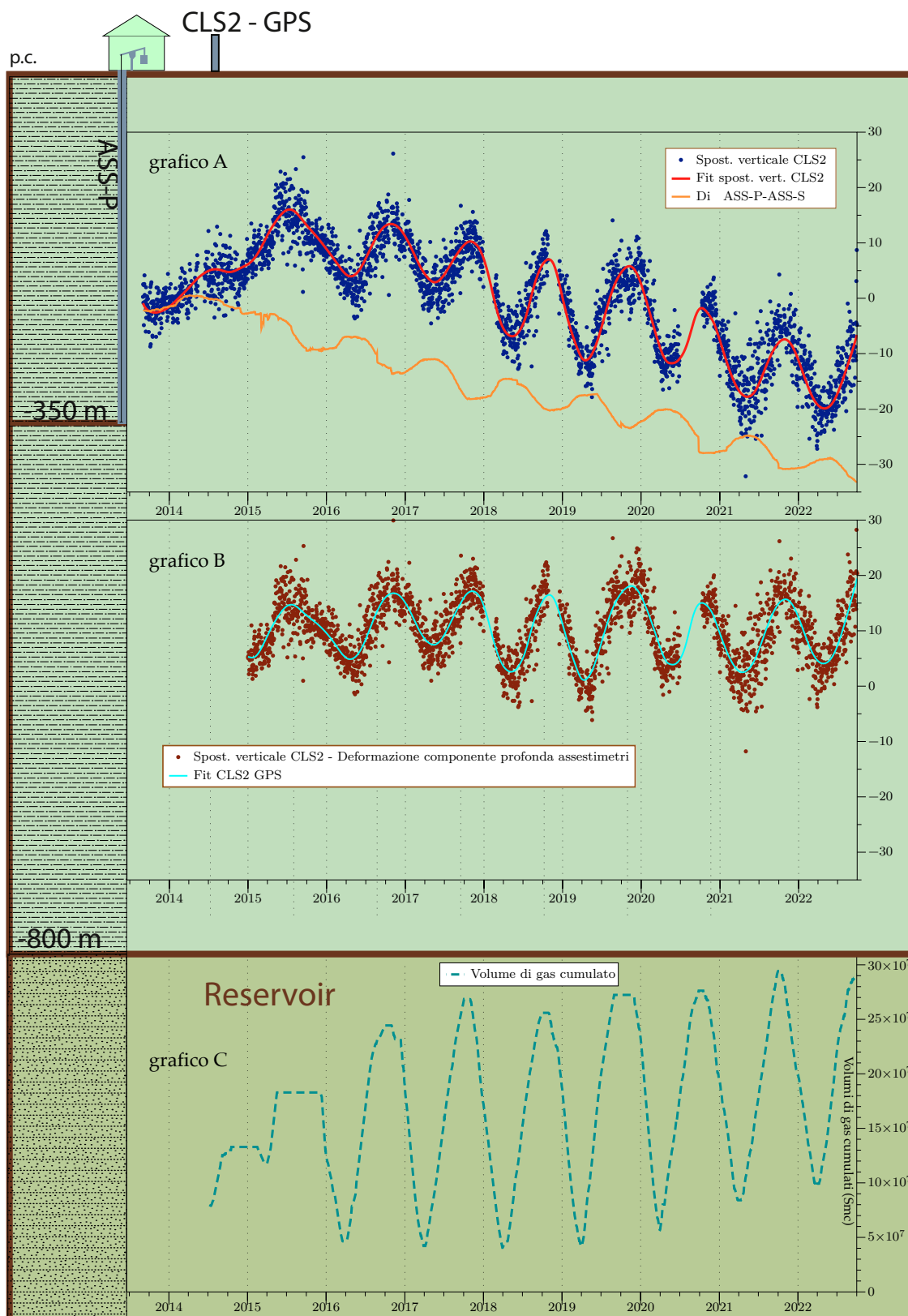


Figura 5.8: Schema esplicativo della distribuzione delle componenti deformative investigate dagli strumenti nel sottosuolo al di sotto del Cluster-C e nel reservoir Pool-C.

## 6 Conclusioni

A fine settembre 2022 la strumentazione installata presso il Cluster-C continua ad essere funzionante.

Dopo lo spurgo effettuato il 30 settembre 2021, le oscillazioni di quota del piezometro profondo hanno mostrato, nell'arco di un anno, il tipico andamento stagionale, confermando dunque una ri-acquisita capacità di rilevare le variazioni stagionali di pressione all'interno dell'acquifero profondo investigato dallo strumento. Nonostante gli sforzi fatti con gli interventi di ripristino descritti nei precedenti report, lo strumento verrà comunque dismesso: a partire da dicembre 2022, verranno acquisiti i dati di un nuovo piezometro profondo, perforato vicino a PP1C tra ottobre e novembre 2022.

Nal Cluster A sono stati iniettati 52277902 Smc ( $\approx 52.3$  MSmc) tra il 12 aprile ed il 31 luglio 2022, con una media di 470972 Smc/gg, calcolata rispetto ai 109 giorni di attività effettiva.

Nel Cluster B sono stati iniettati 23767755 Smc ( $\approx 23.8$  MSmc) tra il 15 aprile ed il 28 settembre 2022, con una media di 293429 Smc/gg, calcolata rispetto agli 81 giorni di attività effettiva.

Nel Cluster C sono stati iniettati 191701063 Smc ( $\approx 191.7$  MSmc) tra il 10 aprile ed il 28 settembre, con una media di 1295277 Smc/gg, calcolata rispetto ai 148 giorni di attività effettiva. Dal cluster sono stati erogati, 150069 Smc ( $\approx 0.15$  MSmc) durante le giornate del 26 agosto e del 30 settembre 2022.

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 (9.3 anni). La stima della componente verticale degli spostamenti della serie GPS restituisce valori con velocità media in abbassamento di  $\approx - 2.63$  mm/anno, da inizio monitoraggio, con trend più evidente a partire dal 2015. Negli ultimi 7.7 anni si assiste infatti ad una accelerazione della subsidenza, attestatasi a  $\approx - 3.7$  mm/anno. Gli spostamenti nella componente verticale di CLS2 ed SP04 mostrano andamento correlabile con l'iniezione cumulata tra aprile e settembre 2022 ( $\approx + 14$  mm CLS2 e  $+ 15$  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-sud-ovest di  $\approx 4.5$  mm (- 4 mm E; - 2 mm N), in allontanamento dal centro del Pool CC1 (Cluster-C).

La nuova stazione GNSS SP12 funziona da 3.9 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 localmen-



te: riportiamo la stima della velocità verticale che è pari a  $\approx - 6.8$  mm/anno.

Le stazioni rover GNSS a singola frequenza sono attive da 3.9 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 - 25/09/2022, satellite Sentinel-1) dei PS qui localizzati, evidenzia per il semestre in esame un sollevamento verticale medio fino a + 20 mm (max + 21 mm per un solo PS).

La componente est-ovest di spostamento dei bersagli radar evidenzia spostamenti orizzontali che "allontanano" i PS al centro del Cluster-C ( $\approx - 7$  mm per punti posti a ridosso della stazione GPS CLS2, - 4 mm per i punti situati nella zona occidentale, + 8 mm per quelli localizzati nella zona orientale del cluster, che si spostano verso est).

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 2022), si osserva un'area in sollevamento con valori medi intorno a + 3/4 mm (max fino a + 8 mm), localizzata nella parte centrale del reservoir ed in una zona più a sud (+ 5 mm) 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 + 3 e - 5 mm (con massimi fino a + 7, per un solo PS, e - 6 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 2022 una deformazione di  $\approx - 2$  mm, in

questo caso in disaccordo con la 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'assestometro 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.

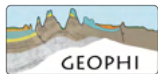
I 2 strumenti installati nei primi 350 metri di sottosuolo (ASS-P e PP1C) non evidenziano una relazione chiara tra le deformazioni da essi registrate e la movimentazione di gas.

L'andamento dell'assestometro 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. 50). 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.

L'andamento delle quote dal piano campagna del piezometro profondo sembra confermare che, a seguito del seppur parziale intervento di spurgo del 30 settembre 2021 (a 281 m di profondità il tratto fessurato è risultato saturo di sedimenti che non si è riusciti a rimuovere), lo strumento sia di nuovo in grado di rilevare 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 in autunno - inverno, svuotamento fine primavera - estate).

## 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.