

PARTE 3

Sommario

PARTE 3.....	1
3.1 Introduzione	2
3.2 Processing del dato SAR	3
3.3 Risultati.....	3
3.4 Confronto tra elaborazioni INGV e quello fornito dal concessionario	6
3.5 Considerazioni relative a possibili modifiche nelle indicazioni contenute in ILG.....	11
Parte monitoraggio InSAR	11

3.1 Introduzione

Il monitoraggio tramite tecniche di interferometria che utilizzano immagini radar ad apertura sintetica (InSAR) riguardante il sito di stoccaggio di Minerbio è stato effettuato dalla Concessionaria STOGIT S.p.A. mediante l'utilizzo di tecniche di elaborazione del dato basate sull' approccio dei Persistent Scatterers (PS), con Tecnica PSP-IFSAR™, applicate a dati in banda C.

L'analisi interferometrica si è basata sull'elaborazione congiunta delle immagini radar acquisite in geometria ascendente e discendente dai satelliti Radarsat-1 e 2 e del sensore Sentinel nel periodo Ottobre 2003 - Novembre 2018.

L'utilizzo dei dati in banda -C di Radarsat e Sentinel nelle due linee di vista risulta conforme agli Indirizzi e Linee Guida del MISE. Come specificato negli stessi ILG l'utilizzo delle due geometrie ascendente e discendente permette di ricavare la componente verticale ed orizzontale (nella direzione E-O) di spostamento del suolo.

La finestra temporale coperta dalle elaborazioni effettuate dal concessionario è conforme a quanto riportato negli ILG, che raccomandano *“l'utilizzo di misure InSAR effettuate su dati di archivio acquisiti possibilmente negli ultimi 15-20 anni, e comunque relativi almeno agli ultimi 10 ann,”*.

Sentinel 1a e 1b sono una coppia di satelliti equipaggiati con sensori in banda C dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA), le cui immagini sono scaricabili gratuitamente dal sito dell'ESA, e costituiscono oggi una importante risorsa di dati di alta qualità caratterizzati da brevi periodi di rivista dello stesso sensore (6gg). I dati Radarsat sono acquisiti da satelliti commerciali acquistabili dell'Agenzia Spaziale Canadese.

Per la validazione del dataset fornito dal concessionario sono stati processati i dati Sentinel nello stesso span temporale. Come ulteriore validazione dei risultati, l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) ha effettuato un'analisi di dati Sentinel-1 mediante tecnica Interferometric Point Target Analysis (IPTA) che condivide alcune caratteristiche dei due principali approcci di elaborazione del dato SAR, quali PS e Small Baseline Subsets (SBAS).

3.2 Processing del dato SAR

Il dataset Sentinel-1 elaborato consiste di 120 immagini SAR acquisite lungo orbita ascendente e 103 in orbita discendente entrambe con un angolo di incidenza di circa 39° . Sia i dati in orbita ascendente che quelli in orbita discendente coprono un intervallo temporale che va da Marzo 2015 a Luglio 2018 con un tempo di rivisita minimo di 6 giorni e massimo di 12. I dati sono stati mediati a circa 90m per ridurre lo speckle noise applicando fattori di multilook di 24 per la direzione range e 6 per la direzione azimuth. La componente topografica è stata rimossa mediante il DEM a 90m fornito dalla missione SRTM. Sono stati quindi calcolati gli interferogrammi seguendo la filosofia SBAS: sono cioè state imposte delle soglie massime per la baseline perpendicolari e temporali pari a 100m e 80 giorni per le immagini acquisite in geometria ascendente e 200m e 90 giorni per quelle in geometria discendente. Tale scelta ha restituito due reti molto fitte di 827 interferogrammi per l'orbita ascendente e 757 per quella discendente, mostrate in Fig. 1.

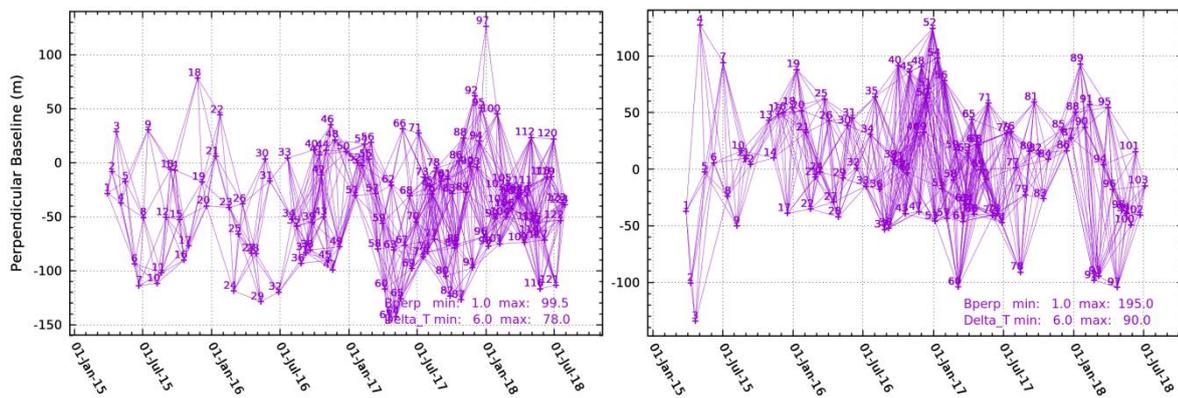


Figura 1: Rete di interferogrammi costruita per l'orbita ascendente (a sinistra) e discendente (a destra).

Gli interferogrammi calcolati sono stati quindi campionati in corrispondenza di *point target* selezionati con criterio a soglia di coerenza ed è stata utilizzata la *Singular Value Decomposition* per stimare trend di deformazione e serie temporali di spostamento.

3.3 Risultati

Le due mappe in Fig. 2 mostrano le velocità medie di deformazione del terreno lungo la linea di vista del sensore per entrambe le orbite stimate nell'intervallo di acquisizione dei dati (2015-2018). Nella zona della concessione di Minerbio, rappresentata indicativamente dal poligono blu, i valori più alti di deformazione si attestano all'incirca tra i 5 e i 10/12 mm/anno.

Considerato l'angolo di incidenza del sensore Sentinel-1 pari a 39° , questi valori corrispondono ad una deformazione verticale di circa 6-14 mm/anno, consistente con quella mostrata dalla STOGIT nell'ultimo report emesso a Febbraio 2019.

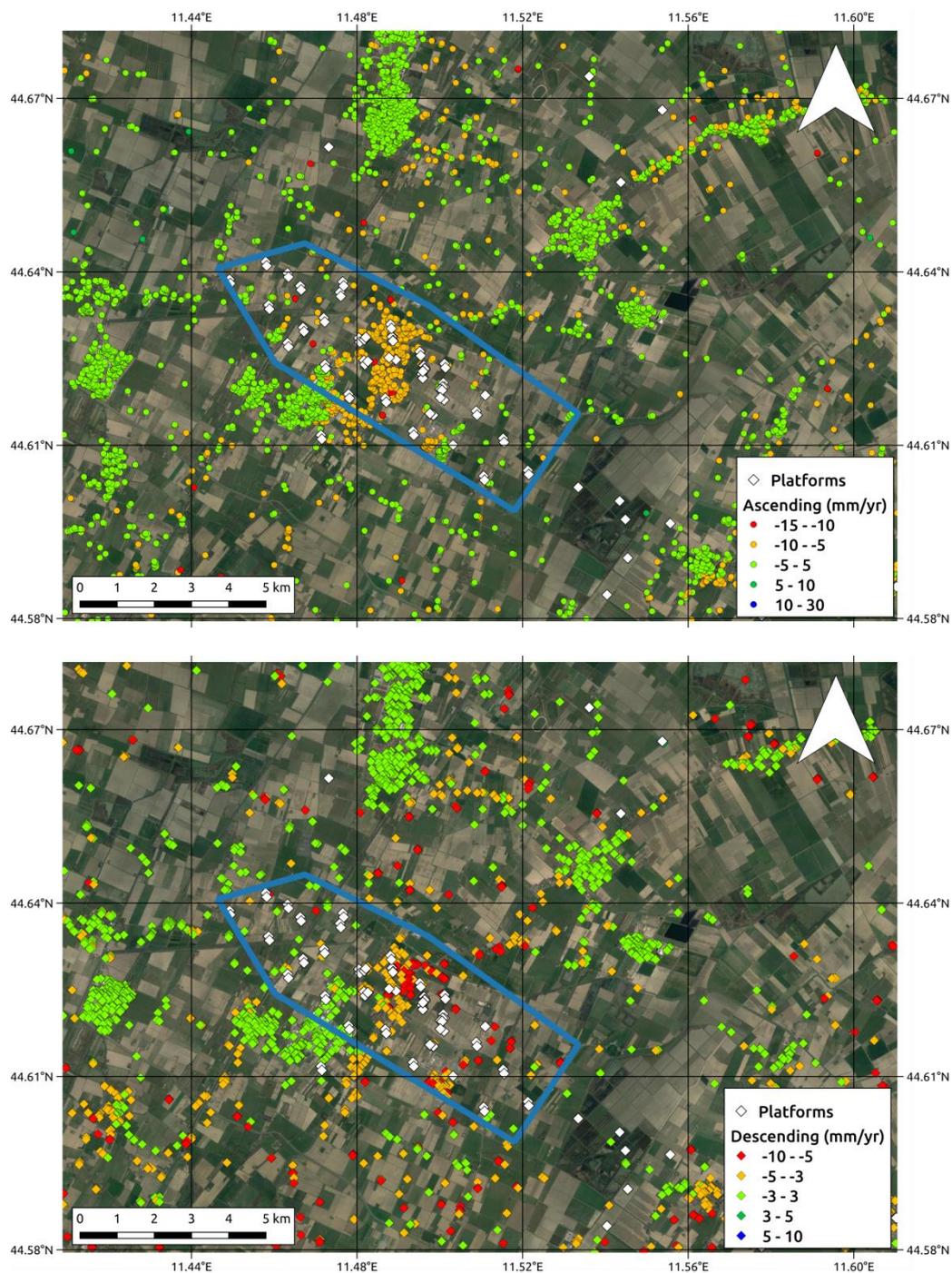


Figura 2: Velocità di deformazione del terreno stimate per l'orbita ascendente (in alto) e discendente (in basso) con dati InSAR Sentinel-1. L'area interessata dalla concessione è circonscritta dal poligono blu. I pozzi (Platforms) sono indicati con il simbolo rombo bianco.

Anche l'analisi delle serie temporali risulta coerente con quanto indicato nei report del concessionario. In Fig. 3 sono mostrate le serie temporali di tre punti all'interno della zona della concessione stimate con l'algoritmo IPTA. In particolare, si è scelto di mostrare l'andamento dei punti posti nelle immediate vicinanze dei punti 0000TB, 00012e e 00012X mostrati nel report della STOGIT.

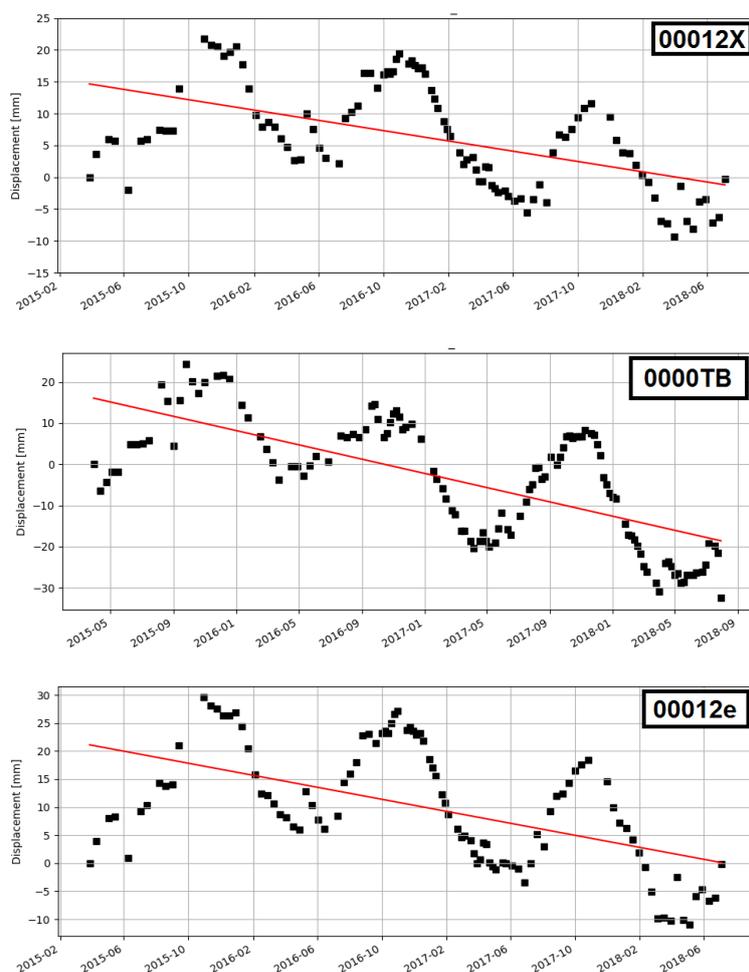


Figura 3: Serie Temporali di tre punti all'interno della zona di concessione

3.4 Confronto tra elaborazioni INGV e quello fornito dal concessionario

Nonostante l'utilizzo di tecniche e dati differenti i risultati in termini di trend e serie storiche di deformazione del terreno hanno mostrato risultati consistenti tra loro ed un'alta correlazione con la curva cumulativa di stoccaggio nel sito interessato dalla concessione.

Va sottolineato che le serie ottenute con Sentinel-1 nel report della STOGIT sono state traslate rigidamente per legarle e dare continuità ai dati RADARSAT. Inoltre, lavorando ad un frame SAR più esteso, nell'analisi effettuata dall'INGV il punto di aggancio della deformazione è stato fissato in corrispondenza della stazione GPS posta in un'area stabile di Bologna.

A titolo di esempio riportiamo il confronto tra il dato presentato dal concessionario e quello elaborato da INGV per l'orbita ascendente e discendente, circa le serie storiche di quattro punti (vedi tabella di seguito) ubicati nell'area di concessione (Fig. 4)

Punto	Orbita	Latitudine	Longitudine
P1;	DESC;	44.6292953;	11.4936209
P2;	DESC;	44.6222878;	11.4864378
P3;	ASC;	44.6269073;	11.4918213
P4;	ASC	44.6263847;	11.4947195

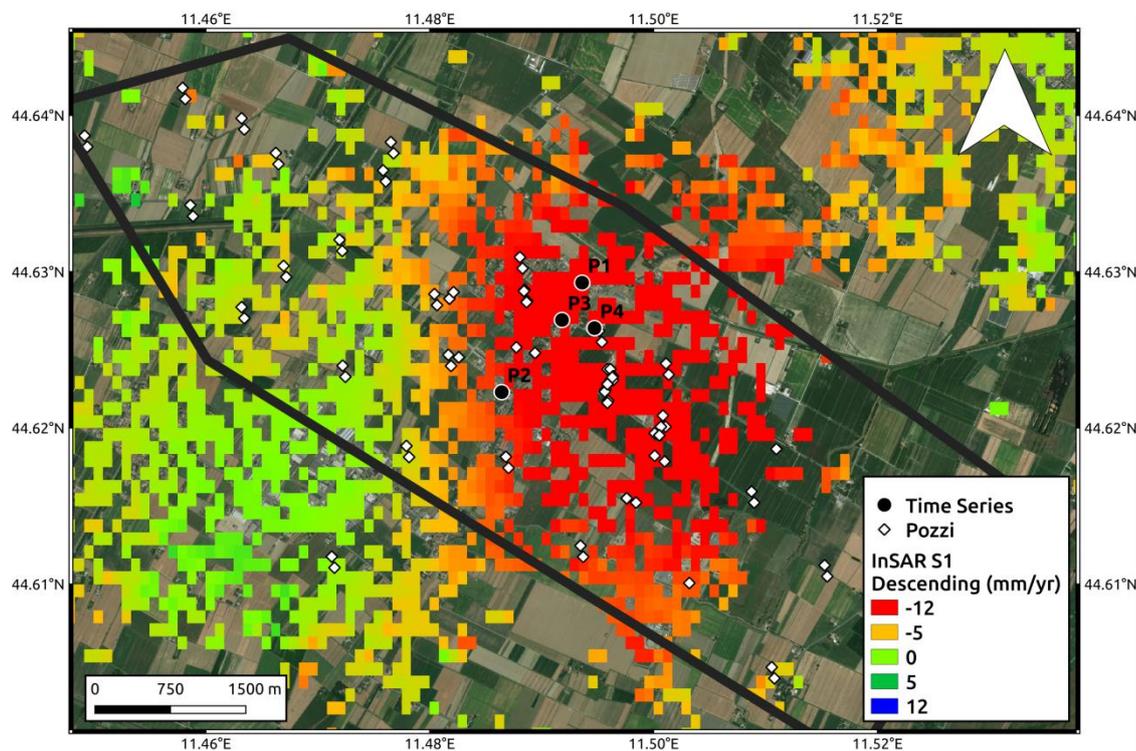


Figura 4: Mappa della velocità media di spostamento nell'area di Minerbio, dove si evidenziano i pozzi e i punti per i quali viene mostrato il confronto tra il dato elaborato dal concessionario e quello elaborato da INGV.

Tuttavia, trascurando lo shift rigido e piccole variabilità dovute alla scelta del punto di aggancio differente, i risultati ottenuti sono in accordo tra loro, mostrando differenze entro 1 mm/anno e oscillazioni di 25-30 mm correlate all'attività di stoccaggio (figure da 5 a 8).

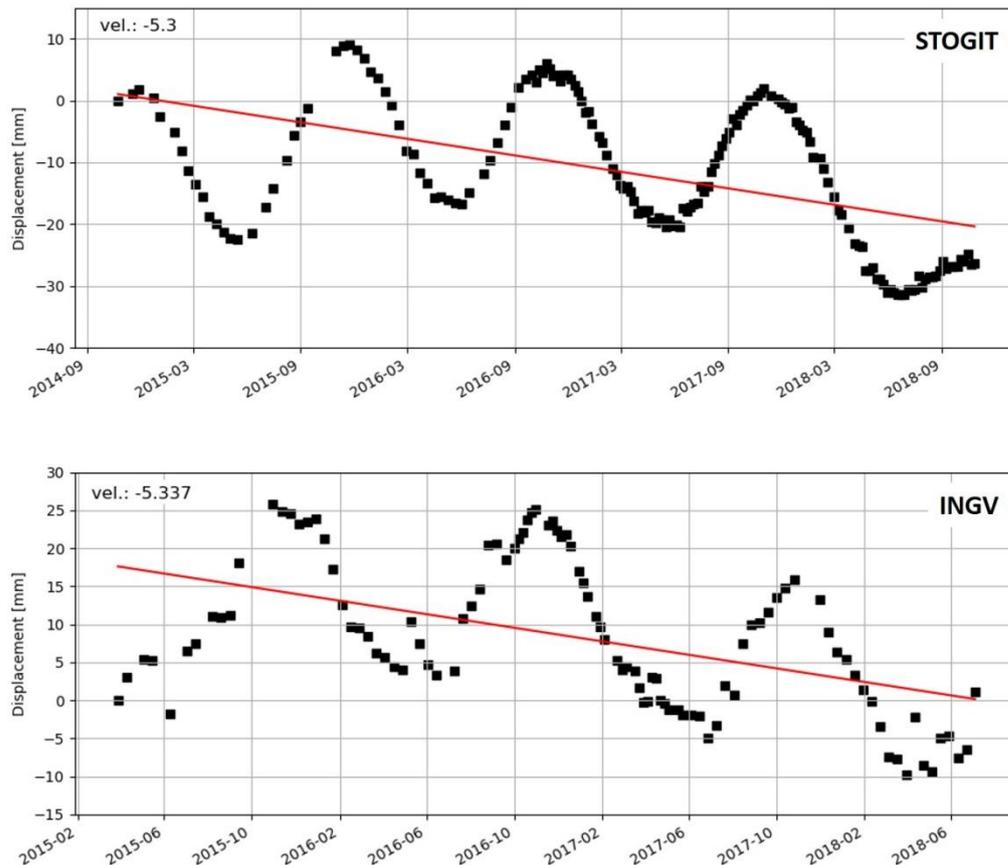


Figura 5: Confronto tra serie storiche di spostamento in geometria discendente elaborate dal concessionario e quello elaborato da INGV per il punto P1 in figura 4.

Nelle figure da 5 a 8, i valori utilizzati in ascisse e ordinate sono riportati su scale non perfettamente coincidenti. In ogni figura, in alto a sinistra, sono comunque riportati i valori ottenuti dalla retta di interpolazione (evidenziata in rosso nelle figure), che mostrano l'accordo tra i risultati ottenuti da Concessionario e INGV.

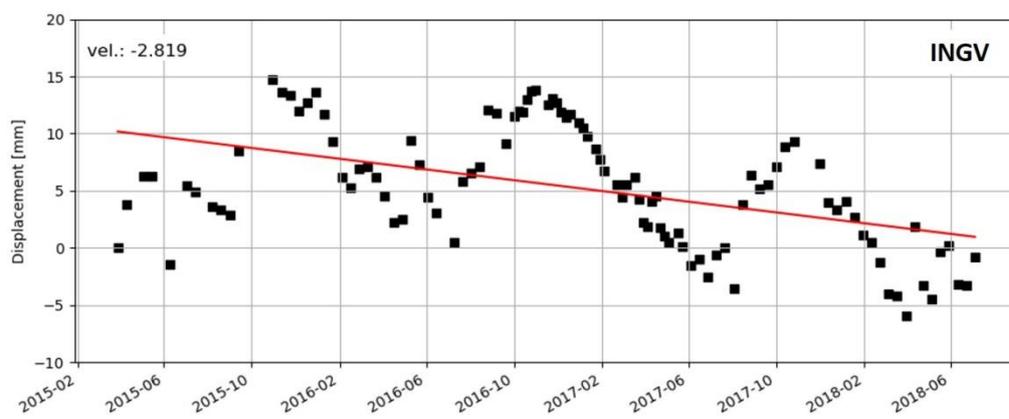
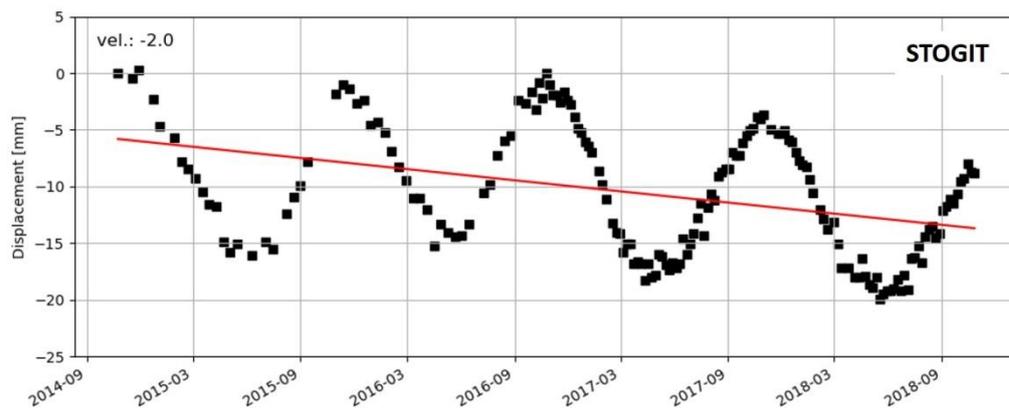


Figura 6: Confronto tra serie storiche di spostamento in geometria discendente elaborate dal concessionario e quello elaborato da INGV per il punto P2 in figura 4.

E' importante rimarcare come l'analisi InSAR effettuata dall'INGV sia del tutto indipendente da quella della STOGIT e differente nella modalità di trattamento del dato. L'utilizzo di algoritmo e parametri di data processing differenti restituiscono tuttavia risultati e valori misurati coerenti tra loro validandone e rafforzandone l'affidabilità.

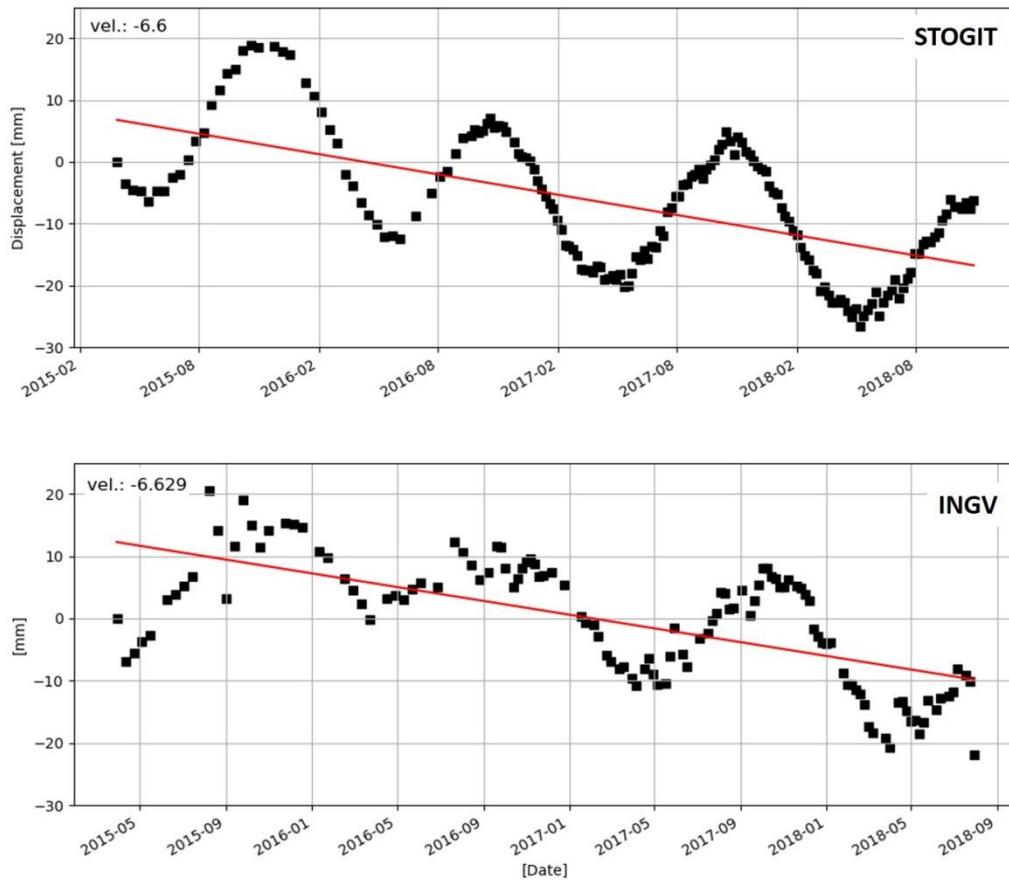


Figura 7: Confronto tra serie storiche di spostamento in geometria ascendente elaborate dal concessionario e quello elaborato da INGV per il punto P3 in figura 4.

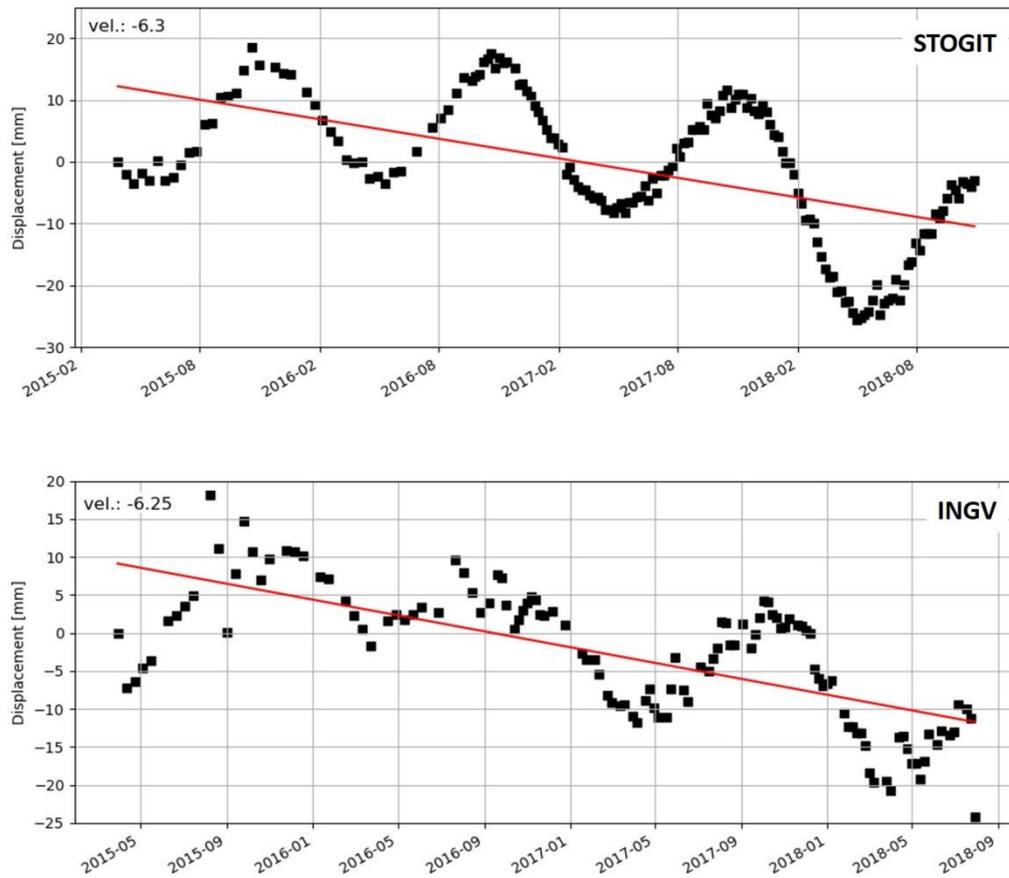


Figura 8: Confronto tra serie storiche di spostamento in geometria ascendente elaborate dal concessionario e quello elaborato da INGV per il punto P4 in figura 4.

3.5 Considerazioni relative a possibili modifiche nelle indicazioni contenute in ILG

Parte monitoraggio InSAR

La sperimentazione degli Indirizzi e Linee Guida per il monitoraggio delle deformazioni del suolo tramite tecniche interferometriche ha visto l'applicazione degli stessi ILG al sito di stoccaggio di gas naturale nel sito di Minerbio, in concessione a STOGIT S.p.A.

Pur non esplicitando in maniera restrittiva la performance del sistema di monitoraggio delle deformazioni del suolo tramite tecniche InSAR, come per esempio avviene per la rete sismica e quella geodetica, gli ILG suggeriscono chiari standard qualitativi e metodologici che il concessionario deve applicare affinché possa essere garantita affidabilità e ripetibilità dell'analisi stessa così come trasparenza nelle procedure seguite.

Come mostrato nelle sezioni precedenti, nel presente capitolo, sono riportate i risultati delle analisi eseguite con lo scopo di verificare l'applicazione degli ILG al monitoraggio delle deformazioni del suolo, nella loro interezza, validare i risultati ottenuti e presentati dal concessionario, valutare criticità presenti negli ILG stessi, eventualmente emersi dalla presente sperimentazione.

Di seguito vengono analizzate e validate punto per punto le specifiche tecniche del sistema di monitoraggio InSAR, utilizzando le indicazioni presenti nel Cap. 6 degli ILG:

- *“per l'area interessata dal monitoraggio deve essere fornito un quadro delle deformazioni superficiali rilevate attraverso l'utilizzo di misure InSAR effettuate su dati di archivio acquisiti possibilmente negli ultimi 15-20 anni, e comunque relativi almeno agli ultimi 10 anni, con accuratezze dell'ordine di 5 - 10 mm (per le misure InSAR in LOS) e di circa 1 - 2 mm/anno per le stime dei ratei di deformazione. Tali attività possono eventualmente beneficiare di banche dati di misure interferometriche già disponibili, come ad esempio nel caso di quelle ottenute grazie al Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale o alle iniziative effettuate dalle singole regioni. In ogni caso, però, le accuratezze delle misure interferometriche rese disponibili devono essere in linea con quanto sopra specificato;”*

STOGIT S.p.A. ha effettuato il monitoraggio InSAR utilizzando dati di archivio in banda C. L'analisi interferometrica copre il periodo Ottobre 2003 - Novembre 2018 e raggiunge le accuratezze richieste

- *“il monitoraggio dei fenomeni deformativi del suolo deve essere aggiornato mediante successive misure InSAR con cadenza indicativa da 3 a 12 mesi (consigliata 6 mesi, ma è da valutare alla luce della disponibilità dei dati SAR e della caratterizzazione geologica,*

strutturale e sismotettonica del sito) e per almeno 3 anni successivi alla fine delle attività di coltivazione, stoccaggio o reiniezione nel sottosuolo. La suddetta cadenza va opportunamente ridotta (intensificazione delle misure) in presenza di variazioni rilevate rispetto al quadro deformativo di background, in accordo con quanto indicato nel Capitolo 9. L'aggiornamento delle misure InSAR può essere effettuato sfruttando i dati SAR acquisiti dai sensori attualmente disponibili, quali RADARSAT-2, COSMO-SkyMed e TerraSAR-X, caratterizzati da una politica di acquisizione "on-demand"; in tal caso, in aggiunta alle misure InSAR, deve essere disponibile anche l'archivio dei dati grezzi SAR (anche denominati Level 0) o delle immagini SAR (generate a piena risoluzione spaziale e spesso definite immagini SLC, acronimo di Single Look Complex) che sono state utilizzate per il calcolo delle misure InSAR. A partire dal 2015 si raccomanda, però, l'uso dei dati SAR collezionati dai sistemi europei Sentinel-1, che consentiranno di acquisire in breve tempo ed in uno scenario "free and open access" un vasto archivio di dati SAR relativi all'intero territorio italiano;"

Sono state utilizzate immagini SAR dei sensori Radarsat-1 e 2 e del sensore Sentinel1a e 1b. L'analisi interferometrica si è basata sull'elaborazione congiunta delle immagini radar aggiornate acquisite in geometria ascendente e discendente. Possibilità e non l'obbligatorietà dell'utilizzo di missioni spaziali commerciali, così come l'utilizzo di sensori in banda X quali COSMO-SkyMed e TerraSAR-X appare corretta, in quanto tali dati possono risultare di difficile elaborazione e poco affidabili in contesti altamente vegetati, caratterizzati da una rapida perdita di coerenza temporale dei pixel.

- *“le misure InSAR aggiornate devono prevedere l'utilizzo di dati SAR acquisiti da orbite ascendenti e discendenti, in modo tale da poter ricostruire le componenti verticale ed orizzontale (E-W) delle deformazioni del suolo rilevate. Nel caso in cui siano disponibili dati SAR collezionati da una sola orbita di acquisizione, si dovrà far riferimento alla componente degli spostamenti proiettata rispetto al LOS del radar. Le misure InSAR devono essere generate con formati standard e attraverso metodologie note o in uso presso la comunità scientifica, per le quali devono essere indicate le accuratezze stimate (dipendenti dall'estensione temporale delle sequenze di immagini SAR analizzate e dalle loro caratteristiche); inoltre, le misure InSAR devono essere prodotte con un campionamento compreso tra 30 e 100 m, ottenuto a valle di opportune operazioni di mediatura spaziale”;*

L'analisi interferometrica si è basata sull'elaborazione mediante l'utilizzo di tecniche di elaborazione del dato basate sull'approccio dei Persistent Scatterers (PS), con Tecnica PSP-IFSAR™, applicate a immagini in geometria ascendente e discendente con una risoluzione spaziale entro l'intervallo richiesto.

- *“i valori di deformazione ottenuti grazie alle misure InSAR vanno integrati/complementati con quelli forniti da una rete GPS in continuo, preesistente o di nuova realizzazione, le cui caratteristiche vanno adeguate o definite a valle del progetto della rete di monitoraggio delle deformazioni del suolo da parte della SPM (cfr. Capitolo 9). Le informazioni ottenute grazie a tale rete locale GPS, opportunamente inquadrata nel sistema di riferimento internazionale (attualmente ITRF2008), devono permettere di:*
 - *rendere le misure InSAR indipendenti dalla “zona di riferimento” scelta per la loro analisi e rappresentazione,*
 - *rilevare (e correggere) eventuali artefatti che possono essere presenti nelle misure InSAR;*
 - *effettuare eventuali modellazioni 3D del campo di deformazione relativo al dominio di rilevazione.”*

Il Concessionario completa le misure InSAR con misure GPS, in particolare, di una sola stazione, anche se i prodotti GPS e InSAR (in termini di velocità e spostamento del suolo) non vengono integrati formalmente. Questa integrazione potrebbe essere esplicitata con lo scopo di disporre di un prodotto SAR calibrato con il dato GPS, anche attraverso l'utilizzo di dati GPS a terra eventualmente disponibili, anche fuori dall'area di concessione. Tale integrazione minimizzerebbe anche l'eventuale presenza di errori orbitali o artefatti atmosferici potenzialmente presenti.

Gli ILG prevedono *“...rendere le misure InSAR indipendenti dalla “zona di riferimento” scelta per la loro analisi e rappresentazione.”* In questo caso il concessionario avrebbe potuto espandere ulteriormente l'area di interesse sulla quale elaborare i dati SAR per non dover *“agganciare”* il riferimento SAR ad un punto troppo vicino alla concessione e quindi potenzialmente, affetto dalla stessa deformazione provocata dall'attività che si vuole monitorare.

A valle dell'analisi delle velocità medie e delle serie storiche, è tuttavia evidente che le aree esterne alla concessione non siano affette da deformazioni del suolo indotte dalle attività di stoccaggio. Pur non essendo evidenti errori orbitali, l'elaborazione di un'area più grande avrebbe, comunque, permesso di valutare ed eventualmente rimuovere gli stessi o ulteriori artefatti che possono essere presenti all'interno del prodotto finale SAR, come prima descritto.

Per quel che riguarda la modellazione, il concessionario non ha sviluppato *“...eventuali modellazioni 3D del campo di deformazione relativo al dominio di rilevazione.”* Nonostante le stesse linee guida non impongano tale modellazioni, la parametrizzazione del reservoir e lo sviluppo di modello con il quale simulare i volume iniettati ed estratti nel serbatoio potrebbe fornire un ulteriore strumento utile a discriminare il contributo delle attività di stoccaggio sulle deformazioni de suolo, rispetto ai normali cicli deformativi stagionali evidenti dai dati mostrati, sotto forma di maggiore ampiezza delle oscillazioni stagionali.

- *“i risultati complessivi delle rilevazioni delle deformazioni del suolo dovranno essere illustrati e analizzati in rapporti periodici, con cadenza indicativa da 3 a 12 mesi (consigliata 6 mesi). Tali rapporti dovranno, per il periodo analizzato:*
 - *descrivere lo stato di funzionamento del sistema di monitoraggio,*
 - *fornire informazioni sia sull’andamento temporale delle deformazioni del suolo, sia sulla loro distribuzione spaziale,*
 - *evidenziare eventuali variazioni rispetto allo scenario deformativo di background; in questo ultimo caso, i rapporti saranno predisposti con la tempistica indicata nel Capitolo 9.”*

La reportistica fornita da STOGIT risulta completa circa la descrizione temporale e spaziale dei fenomeni deformativi osservati, anche in riferimento allo scenario di background.

In conclusione, non sono emerse particolari criticità nell'applicabilità degli ILG, relativamente agli standard qualitativi e metodologici richiesti al Concessionario, per il monitoraggio delle deformazioni del suolo.

Un suggerimento, per un eventuale aggiornamento degli ILG, riguarda l’intervallo suggerito per l'aggiornamento della reportistica.

Un intervallo di sei mesi potrebbe apparire eccessivamente restrittivo per le metodologie InSAR, i cui dati, come pure quelli GPS, mostrano evidenti ciclicità stagionali quasi coincidenti con la ciclicità di iniezione ed estrazione di gas dal giacimento.

L’intervallo annuale, in casi come questo, dovrebbe risultare sufficiente.