



STOGIT-GIAC

Concessione Bordolano Stoccaggio
Monitoraggio dei movimenti del suolo

Anno 2022

PAG 1 DI 46

CONCESSIONE BORDOLANO STOCCAGGIO

Ciclo di stoccaggio 2022-2023

MONITORAGGIO DEI MOVIMENTI DEL SUOLO

(aggiornamento dati a Novembre 2022)

Marzo 2023	G. Codegone	A. Mantegazzi	C. Coti
DATA DI EMISSIONE	PREPARATO	VERIFICATO	APPROVATO



SOMMARIO

1. INTRODUZIONE	3
2. IL MONITORAGGIO SATELLITARE SAR	6
2.1. LA TECNICA SQUEESAR™	8
2.2. INDICI DI PRECISIONE	9
2.3. TIPOLOGIA DI ANALISI PS PROPOSTE	10
3. ANALISI DEL CAMPO DI BORDOLANO	14
3.1. ANALISI DELLE VELOCITÀ MEDIE	15
3.1.1. ANALISI E CALIBRAZIONE DEL DATO INTEGRATO RADARSAT-SENTINEL.....	15
3.1.2. ANALISI E CALIBRAZIONE DEL DATO SENTINEL.....	29
3.2. ANALISI DELL'AMPIEZZA MEDIA DELLA STAGIONALITÀ	36
3.3. ANALISI DELLE SERIE STORICHE DEI PUNTI SCOMPOSTI	40
4. CONCLUSIONI	45



1. Introduzione

L'esercizio del giacimento di Bordolano (CR), attivato allo stoccaggio nel corso del 2016, prevede l'ottemperanza ad una serie di adempimenti e di prescrizioni contenute nei provvedimenti ministeriali di autorizzazione dell'attività. In particolare, i decreti di VIA (MATTM, 2009 e 2014) e il decreto di approvazione del programma lavori (MiSE-MATTM, 2011) prescrivono l'esecuzione di alcuni monitoraggi di natura geologica e dinamica per la verifica dei seguenti aspetti:

- gestione dei fluidi e misura delle pressioni di esercizio del giacimento;
- spostamenti dell'acquifero di fondo;
- analisi dei movimenti del suolo;
- analisi della microsismicità.

Questa relazione tecnica intende riscontrare in particolare le prescrizioni riguardanti le attività di monitoraggio dei movimenti del suolo, ossia:

- Punto A9) del decreto DVA-DEC-0001633 del 12.11.2009: *"Il monitoraggio della subsidenza, attraverso dati SAR e tecnica Permanent Scatterers, dovrà essere integrato periodicamente, anche ai fini delle calibrazione delle misure, con i dati dei CGPS rilevanti, sulla base di un programma concordato con ARPA Lombardia; i risultati delle analisi dovranno essere inviati con cadenza annuale a MATTM e ARPA Lombardia"*.
- Art. 1, comma 3, del decreto MiSE-MATTM del 28.12.2011: *"La documentazione prodotta in ottemperanza alle prescrizioni nn. A7), A8) e A9) del decreto del Ministero dell'ambiente 12 novembre 2009, n. 1633 dovranno essere inoltrate anche alla Divisione II – Sezione UNMIG di BOLOGNA e alla Divisione VII del Ministero dello sviluppo economico"*.

Lo stoccaggio di gas naturale in giacimenti terrigeni depletati può generare spostamenti di lieve entità e limitati all'area del giacimento, monitorabili attraverso la tecnica dell'interferometria SAR. Per poterli distinguere da quelli naturali di sito e/o antropici generati da altre attività (ad esempio l'emungimento di falde acquifere superficiali), è necessario che il monitoraggio dei movimenti del suolo sia esteso ad un'area sufficientemente ampia rispetto alla dimensione del giacimento. Lo scopo è quello di fornire informazioni sia sull'andamento temporale dei movimenti del suolo, sia sulla loro distribuzione spaziale entro l'area di interesse, mettendo in luce le possibili variazioni rispetto allo scenario deformativo di fondo ed eventuali deformazioni cumulate nel tempo.

La presente relazione ha come scopo l'aggiornamento a Novembre 2022 dei dati radar satellitari acquisiti ed elaborati con Tecnica SqueeSAR™ sul campo Stogit di Bordolano per il monitoraggio dei possibili movimenti del suolo connessi all'attività di stoccaggio di gas. L'analisi interferometrica si è basata sull'elaborazione congiunta delle immagini radar acquisite in geometria ascendente e discendente dai satelliti Radarsat-1, Radarsat-2 e Sentinel-1 nel periodo Ottobre 2003–Novembre 2022.



L'integrazione in un unico database dei dataset Radarsat e Sentinel permette di estendere il monitoraggio fino al 2003 (Radarsat) aumentando la frequenza temporale delle acquisizioni negli ultimi 7 anni (Sentinel). È stata inoltre eseguita l'analisi sul solo dataset Sentinel riferita al periodo Marzo 2015–Novembre 2022 ed il relativo confronto con il dataset integrato Radarsat-Sentinel; l'utilizzo del satellite Sentinel consente di aumentare la copertura areale del dato attraverso un aumento dei punti di misura.

L'esercizio allo stoccaggio del giacimento è stato avviato recentemente, pertanto per la gran parte del periodo monitorato il campo non era attivo allo stoccaggio. In particolare, tra il 2008 ed il 2013 è stata completata la ricostituzione del cushion gas per un volume totale iniettato di 455 Msm³, mentre nel corso del 2016 sono stati dapprima eseguiti alcuni test di iniezione/erogazione mirati alla verifica del corretto funzionamento degli impianti e solo nella seconda parte dell'anno sono stati iniettati i primi volumi di working gas. Attualmente il campo è attivo allo stoccaggio con graduale riempimento per raggiungere la condizione a regime.

Sia il dato integrato Radarsat-Sentinel sia il dato Sentinel sono stati calibrati in termini assoluti utilizzando rispettivamente il CGPS pubblico di Crema (appartenente alla Rete SPINN GNSS, che misura una velocità media di -0.18 mm/anno) ed il CGPS Stogit installato presso la sede operativa di Crema (che misura una velocità media pari a -0.00 mm/anno), analizzando la distribuzione dei valori di velocità media entro l'area di interesse (area della Concessione di Stoccaggio).

Successivamente è stato eseguito un confronto tra la curva del volume di gas movimentato del campo e le serie storiche di spostamento di alcuni punti rappresentativi posti all'interno e all'esterno del limite del giacimento, inteso come proiezione in superficie del contatto gas-acqua originario.

L'analisi integrata Radarsat-Sentinel, relativa all'intero periodo di indagine e principale riferimento per il monitoraggio SAR, evidenzia una velocità verticale media all'interno dei limiti del giacimento pari a +0.64 mm/anno, in linea con gli aggiornamenti precedenti. Le serie storiche dei punti selezionati all'interno dei limiti del giacimento mostrano una buona correlazione con la curva del volume di gas movimentato, registrando un leggero trend di innalzamento a partire dal periodo di iniezione del cushion gas e, a partire dal 2016, oscillazioni medie di 5-10 mm legate ai cicli di stoccaggio, in coerenza con quanto si osserva negli altri campi di stoccaggio gestiti da Stogit. Al contrario, le serie storiche dei punti selezionati all'esterno dei limiti del giacimento non mostrano correlazione con l'attività esercitata nel sito in esame.

L'analisi evidenzia che l'effetto in superficie dello stoccaggio tende ad esaurirsi in prossimità del limite del giacimento, ad eccezione dell'area immediatamente a sud-est in cui il sollevamento legato al graduale riempimento del giacimento diminuisce gradualmente di entità fino ad esaurirsi entro una distanza di circa 1.5 km dal limite del giacimento stesso. L'analisi delle velocità di sollevamento e le serie storiche dei punti evidenziano come, negli ultimi anni, questo leggero trend di sollevamento si stia riducendo con una tendenza alla stabilità in accordo con la graduale regimazione del campo: la continuità del monitoraggio nei prossimi anni fornirà maggiori indicazioni in merito all'evoluzione di questo trend.



STOGIT-GIAC

**Concessione Bordolano Stoccaggio
Monitoraggio dei movimenti del suolo**

Anno 2022

PAG 5 DI 46

Lo specchietto sottostante riassume i risultati dell'analisi SAR condotta sul campo di Bordolano:

Variazioni Altimetriche

Trend regionale
(valori CGPS Crema)

-0.18 mm/anno

Relative rispetto al
trend regionale

~ (+0.64 mm/anno)

Correlazione con il ciclo di stoccaggio

Ampiezza media
delle curve

5-10 mm

Correlazione (con curva
gas movimentato)

BUONA



2. Il monitoraggio satellitare SAR

L'interferometria differenziale SAR (Synthetic Aperture Radar) è uno strumento molto efficace per il monitoraggio ad alta precisione dei fenomeni di deformazione della superficie terrestre, basato sull'elaborazione di sequenze temporali d'immagini radar satellitari. Il radar ad apertura sintetica è un sensore attivo, montato a bordo di satelliti, che emette radiazioni elettromagnetiche e registra la potenza del segnale riflesso dalla superficie terrestre, calcolando il tempo intercorso fra emissione e ritorno del segnale stesso. L'immagine SAR è pertanto definita dai seguenti parametri:

- l'ampiezza, legata all'energia del segnale riflesso e rilevato dall'antenna del sensore: tutti gli impulsi emessi hanno la stessa energia, quelli riflessi presentano livelli di energia anche molto diversi. I metalli e gli oggetti solidi quali manufatti e rocce esposte, presentano una elevata capacità di riflessione e sono pertanto ben visibili in un'immagine radar, mentre il legno, i campi coltivati e le foreste hanno minore capacità riflettente e, conseguentemente, generano dati SAR di bassa ampiezza;
- la fase è determinata dal tempo di volo dell'impulso radar (cioè il tempo di propagazione tra antenna e terreno e viceversa) ed è perciò legata alla distanza sensore-bersaglio. Il tempo di volo è influenzato anche dal mezzo di propagazione dell'onda elettromagnetica, ovvero l'atmosfera: nubi, pioggia e nebbia influenzano la velocità di propagazione del segnale e introducono, di conseguenza, effetti sulla fase rilevata. Un'errata o comunque imprecisa stima e rimozione del contributo atmosferico può infatti sottostimare gli effetti di moto stagionali e non lineari in quanto parzialmente interpretati come componenti atmosferiche.

Questa tecnologia di telerilevamento sfrutta le acquisizioni disponibili su una stessa area di interesse in tempi successivi, generando una mappa di deformazione del suolo proveniente dalle immagini interferometriche acquisite, individuando così quei bersagli che mantengono inalterate nel tempo le proprie caratteristiche elettromagnetiche. Per ciascuno di essi, nell'intervallo di tempo analizzato, è possibile ricostruire la serie storica di spostamento con precisione sub-centimetrica.

Il radar, ad ogni acquisizione, misura la distanza sensore-bersaglio lungo la linea di vista del satellite (LOS), pertanto le deformazioni rilevate si riferiscono alla componente degli spostamenti superficiali proiettata lungo la LOS del satellite (positiva se si allontana dal satellite, negativa se si avvicina). La stessa area può però essere vista da orbite ascendenti e discendenti, e i dati delle due geometrie di acquisizione possono essere combinati per il calcolo delle componenti verticale ed orizzontale del moto (Fig. 1). È importante sottolineare che, a causa della scarsa sensibilità della geometria di acquisizione del sensore alla componente N-S del moto orizzontale, l'unica componente del moto orizzontale valutata è quella E-O.

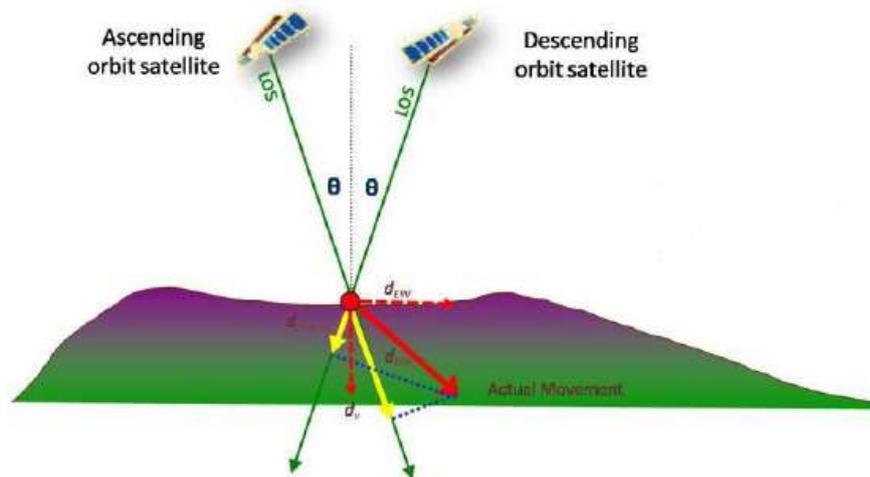


Fig. 1 Scomposizione del moto dalle LOS ascendente e discendente alle componenti orizzontale est-ovest e verticale.

Le immagini SAR vengono acquisite con una frequenza che dipende dal tempo di rivisitazione del satellite utilizzato. Per il monitoraggio del giacimento di Bordolano, Stogit utilizza i dati dei seguenti satelliti:

- Radarsat-1 e Radarsat-2 dell'Agencia Spaziale Canadese per il periodo 2003-2020, che consentono di monitorare il progresso con l'acquisizione di un'immagine ogni 24 giorni (circa 14-15 immagini disponibili ogni anno per ciascuna geometria di acquisizione). Il satellite Radarsat-1, lanciato nel 1995 e non più operativo da marzo 2013, è stato sostituito dal satellite Radarsat-2 (lanciato nel dicembre 2007), il quale rappresenta il prosieguo della missione Radarsat 1.
- Sentinel-1 dell'Agencia Spaziale Europea per il periodo 2015-2021, che acquisisce con un tempo di rivisitazione di 6 giorni (circa 60 immagini ogni anno per geometria).

Tutti i satelliti utilizzati acquisiscono in banda C, ma con lunghezza d'onda del segnale radar lievemente differente tale da impedire l'utilizzo simultaneo delle immagini acquisite dai tre satelliti nelle applicazioni interferometriche standard. Con la Tecnica SqueeSAR™ è possibile effettuare elaborazioni congiunte di dati acquisiti da satelliti diversi, applicando la procedura detta di "stitching". I test effettuati hanno evidenziato che la procedura necessita di un intervallo minimo di sovrapposizione temporale tra i dataset anche se l'elemento più importante per garantirne la qualità è rappresentato dal numero più elevato possibile di immagini a disposizione per ciascun dataset.

La nuova soluzione tecnica di "stitching" adottata consente l'integrazione dei dataset Radarsat e Sentinel acquisiti in modalità ascendente e discendente in un unico database relativo alle componenti verticale e orizzontale E-O del moto. La fusione in un unico database delle informazioni derivanti da entrambi i dataset permette da un lato di mantenere l'informazione storica che consente di estendere il monitoraggio dei giacimenti Stogit fino al 2003 (Radarsat), e dall'altro di aumentare la frequenza temporale delle nuove acquisizioni a partire dal 2015 (Sentinel fornisce una misura ogni 6 giorni). Grazie a questa nuova soluzione tecnica non è più necessario acquisire nuove immagini Radarsat, satellite destinato a non essere più operativo nei prossimi anni.



2.1. La Tecnica SqueeSAR™

La Tecnica SqueeSAR™ è la più avanzata tra le tecniche di interferometria differenziale SAR di tipo Persistent Scatterer Interferometry (PSI) e utilizza una procedura algoritmica proprietaria per misurare movimenti lenti del terreno e per l'analisi di deformazioni e/o spostamenti superficiali dovuti a frane, subsidenza/uplift, fenomeni vulcanici e sismici e spostamenti di singoli edifici.

Il punto di partenza per poter applicare tale metodologia è quello disporre di un elevato numero di immagini acquisite sulla stessa zona di interesse. Tale analisi consente l'individuazione di alcuni elementi al suolo denominati PS (Persistent Scatterers), che presentano una spiccata stabilità nei valori di ampiezza e un'elevata coerenza nella fase in tutte le acquisizioni che compongono il set di dati a disposizione. Si tratta di bersagli radar privilegiati (edifici, strutture metalliche, rocce affioranti, superfici non vegetate dure) che il satellite identifica sul territorio, le cui caratteristiche elettromagnetiche non variano sensibilmente nel tempo.

La tecnica SqueeSAR™ permette l'aumento della densità spaziale dei punti di misura relativi alle analisi interferometriche, anche laddove la densità dei PS risulta bassa (in aree non urbanizzate), cercando di ridurre l'impatto limitante della vegetazione. Lo scopo è l'estrazione di informazione in aree in cui i singoli bersagli non hanno sufficiente coerenza per poter divenire dei PS, ma esistono porzioni di terreno in cui bersagli radar adiacenti, pur non avendo sufficiente coerenza, hanno un comportamento omogeneo in termini di riflettività e di risposta agli impulsi elettromagnetici, costituendo così dei riflettori distribuiti (DS, Distributed Scatterer). Il concetto di DS deriva dal fatto che alcune porzioni di territorio vengono visualizzate sulle immagini SAR come un gruppo di pixel adiacenti con caratteristiche elettromagnetiche comuni che, se elaborati in modo congiunto, possono fornire una sorta di PS virtuale caratterizzato da un maggior rapporto segnale/rumore, ovvero maggior coerenza, sul quale poter eseguire misure di spostamento del tutto simili a quelle eseguite con tecnica PSI tradizionale.

Avendo a disposizione sequenze di immagini sulla stessa zona e lungo la stessa orbita registrate in tempi successivi, è possibile mettere in evidenza l'evoluzione degli spostamenti nell'area con misure estremamente accurate (nell'ordine del millimetro), dalle quali è possibile ricavare stime di velocità. Per ogni singolo PS si ricavano la posizione (latitudine, longitudine, quota), il trend medio di spostamento (ovvero l'interpolazione lineare dello spostamento misurato nell'intero periodo di monitoraggio) e l'intera serie temporale di spostamento, misurati lungo la LOS per l'intero arco temporale in cui sono state acquisite le immagini.

I valori di velocità media per ciascuna geometria di acquisizione sono di tipo differenziale, ottenuti dopo avere determinato su base statistica un punto ad alta coerenza di fase, di coordinate note e supposto stabile (PS di riferimento con velocità pari a zero), rispetto al quale sono riferite tutte le stime di movimento dei PS: le misure SAR sono pertanto sempre di tipo relativo.

L'acquisizione di nuove immagini nel tempo consente di ottenere stime più precise di velocità e di quota dei PS; pertanto, ogni aggiornamento annuale implica il reprocessing dell'intero dataset e rappresenta

un'elaborazione indipendente. La variazione nella stima di quota può comportare una lieve variazione nella localizzazione geografica dei punti di misura rispetto al dato elaborato in precedenza. In alcuni casi è anche possibile osservare la scomparsa/comparsa di alcuni punti a causa di una modifica della loro risposta radar nelle nuove immagini del dataset (ad esempio un edificio demolito o una nuova costruzione).

L'elevata densità di punti di misura, soprattutto in corrispondenza di centri abitati (densità oltre 500 PS/km²), permette un'elevata applicabilità della tecnologia nell'ambito dei monitoraggi (Fig. 2). Le peculiarità della Tecnica PSI, quali la capacità di analisi di vaste aree in tempi brevi, la dimensione puntuale e quantitativa delle misure e la loro precisione, l'elevata densità spaziale di bersagli radar per i quali ottenere informazioni di spostamento e la possibilità di accedere ad un archivio storico con una notevole mole di dati, mettono in luce la complementarità del suo utilizzo con tecniche ormai consolidate quali la livellazione geometrica e le misurazioni GPS.

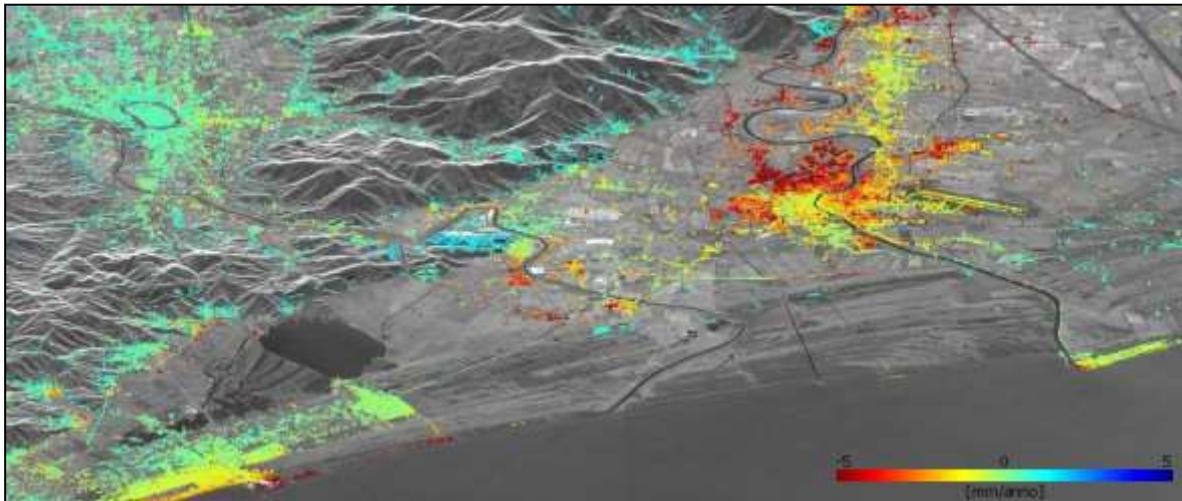


Fig. 2 Esempi di subsidenza nell'area di Pisa. I punti colorati indicano le posizioni dei PS, ed il loro colore indica la velocità media di spostamento lungo la LOS misurata.

2.2. Indici di precisione

Le analisi PSI sono caratterizzate da due indici di precisione importanti:

- la deviazione standard della velocità media;
- la coerenza temporale.

La deviazione standard (STD o σ) è un parametro utilizzato per quantificare il grado di precisione di un insieme di misure rispetto al loro valore medio. In questo caso, si riferisce alla velocità media dei PS rispetto al punto di riferimento e dipende da diversi fattori, quali la distanza fisica tra il PS ed il punto di riferimento (in genere aumenta allontanandosi da esso), dalla qualità del punto di misura (coerenza di fase) e dalla qualità della stima della componente atmosferica.

La coerenza temporale è un indice, compreso tra 0 e 1, che misura quanto bene la serie storica degli spostamenti segue un modello analitico. La scelta del modello deve tener conto del numero di immagini



elaborate, dell'intervallo temporale tra la prima e l'ultima acquisizione e di eventuali lacune nell'acquisizione. In fase di elaborazione i PS vengono selezionati mediante test statistici che determinano il livello minimo di coerenza temporale accettabile, eliminando tutte le serie che presentano coerenza troppo bassa per garantire un'interpretazione del risultato. Il valore assoluto di coerenza non assume però una valenza qualitativa a sua volta assoluta, bensì relativa alla combinazione dei fattori che determinano il tipo di modello utilizzato. Questo significa che una serie temporale con, ad esempio, una coerenza temporale pari a 0.5 generata con un certo set di dati, può risultare qualitativamente diversa da una serie temporale con la stessa coerenza, ma generata da un set di dati diverso (ad esempio contenente un numero diverso di immagini).

2.3. Tipologia di analisi PS proposte

Scomposizione del moto nelle componenti verticale e orizzontale

A seguito delle elaborazioni dei dati ascendenti e discendenti, per ciascun PS è possibile ricavare il tasso di spostamento medio nella componente verticale ed orizzontale del moto: il dato relativo alle due geometrie di acquisizione viene infatti scomposto al fine di ottenere i valori di velocità media nelle due componenti citate.

Data la diversa localizzazione dei bersagli radar osservabili da due diverse LOS, per poter combinare le misure ottenute è necessario il ricampionamento dei dati in singola geometria su una griglia spaziale comune, con conseguente perdita di risoluzione spaziale. Le misure ottenute dalla combinazione dei dati non sono quindi da riferire a specifici bersagli radar sul terreno, ma ad una griglia ordinata di PS fittizi ("pseudo-PS") posizionati al centro della cella di scomposizione (Fig. 3).

Informazioni sulle due componenti del moto sono quindi fornite per le sole celle contenenti punti di misura di entrambe le geometrie di acquisizione. Come per i dati in singola geometria, anche per i dati scomposti è fornito un valore di deviazione standard delle misure di velocità ottenute.

Analisi Regional e Local con calibrazione in termini assoluti della velocità media di spostamento

Le analisi eseguite sul campo di Bordolano sono di due tipologie che differiscono principalmente per l'estensione dell'area indagata e, in alcuni casi, per la posizione del punto di riferimento:

- *Analisi Regional*, effettuata su un'area molto estesa che racchiude più Concessioni di Stoccaggio (Bordolano, Ripalta e Sergnano), con una griglia di campionamento di 100x100 m, e all'interno della quale è disponibile un GPS pubblico di riferimento grazie al quale è possibile calibrare in termini assoluti il dato SAR (GPS di Crema).
- *Analisi Local*, effettuata su un'area di dimensioni paragonabili a quella della Concessione di Stoccaggio di Bordolano, con una griglia di campionamento di dimensioni 50x50 m, e caratterizzata da elaborazioni aggiuntive di maggior dettaglio.

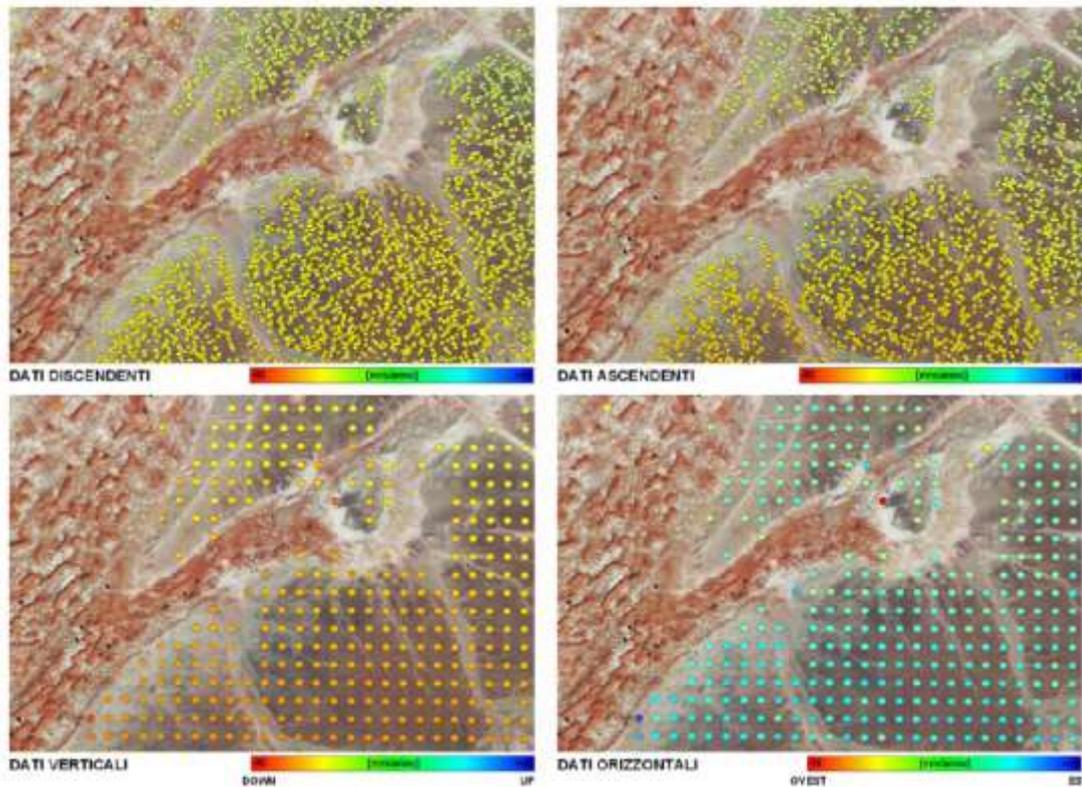


Fig. 3 Trasformazione dei dati di spostamento dei PS su griglia regolare. In alto i risultati ottenuti dai PS, in basso gli stessi ricampionati su griglia regolare per la scomposizione del moto.

I valori di velocità ottenuti per ogni singolo PS dei dataset Radarsat e Sentinel sono di tipo differenziale e vengono riferiti ad un punto di riferimento al quale viene assegnata una velocità pari a zero. I dati delle analisi Regional vengono calibrati in termini assoluti tramite l'integrazione con dati provenienti da stazioni GPS in continuo, che permettono di ottenere informazioni sulle tre componenti degli spostamenti assoluti rilevati in corrispondenza delle stazioni riceventi. Per la calibrazione, applicata sia al dataset integrato Radarsat-Sentinel sia al solo dato Sentinel, sono state utilizzate rispettivamente una stazione GPS pubblica ed una stazione CGPS di Stogit ubicate in aree esterne al giacimento, considerate stabili e non influenzate dall'attività di stoccaggio (nel caso di Bordolano si utilizzano i GPS di Crema). Una volta calibrato il dato Regional, è possibile calibrare in termini assoluti anche i dati delle singole analisi Local contenute al suo interno.

La distribuzione dei valori di velocità media entro l'area di interesse è stata analizzata con particolare attenzione rivolta alla componente verticale.

Analisi delle serie storiche

La sola analisi dei valori di velocità verticale media non consente di rilevare l'eventuale presenza di fenomeni di deformazione non lineari, come ad esempio i movimenti ciclici riconducibili all'attività di stoccaggio, che possono essere invece individuati analizzando le serie storiche di spostamento relative ad

ogni singolo PS. Le serie storiche rappresentano l'andamento nel tempo di un singolo punto scomposto in termini di variazione altimetrica registrata da ogni singola immagine radar acquisita (nel caso di Radarsat-1 e Radarsat-2 ogni 24 giorni, nel caso di Sentinel-1 ogni 6 giorni). È così possibile ottenere, oltre alle variazioni altimetriche relative per quel punto rispetto al punto di riferimento, anche gli spostamenti mensili di quel singolo punto nell'intero periodo considerato.

Oltre ai valori di velocità sono state pertanto scomposte anche le serie storiche di spostamento dei punti. Per ogni cella di risoluzione 50x50 m dell'analisi Local, si avrà quindi l'andamento della variazione altimetrica nel tempo e la velocità verticale media, già calcolata in mm/anno, ottenuta dalla retta di regressione lineare (si vedano ad esempio le Fig. 4 e Fig. 5).

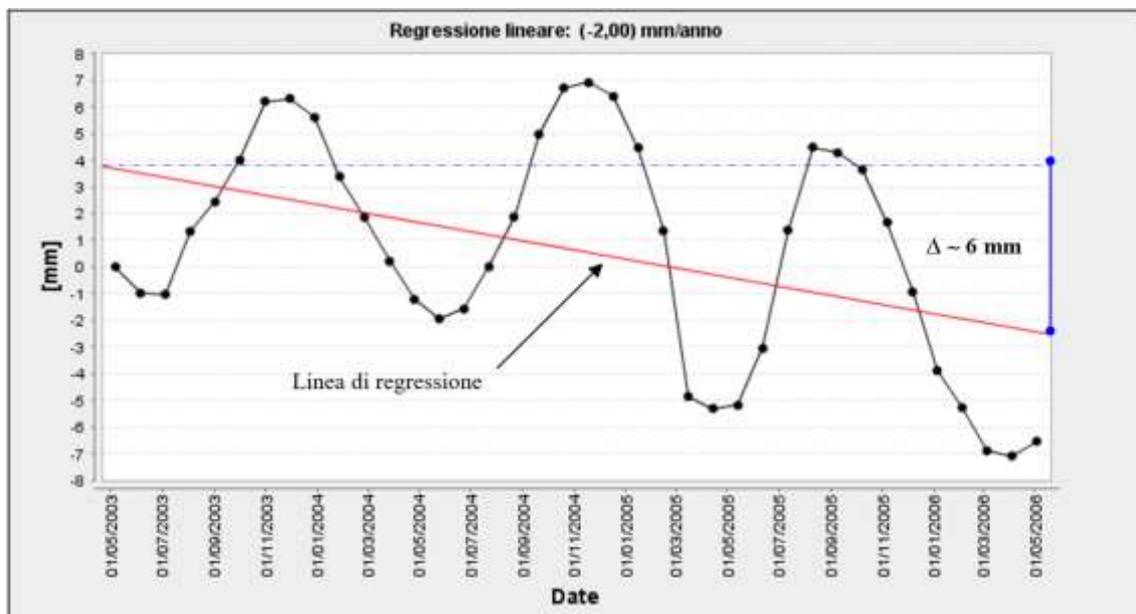


Fig. 4 Esempio di serie storica con valori di subsidenza di circa 2 mm/anno.

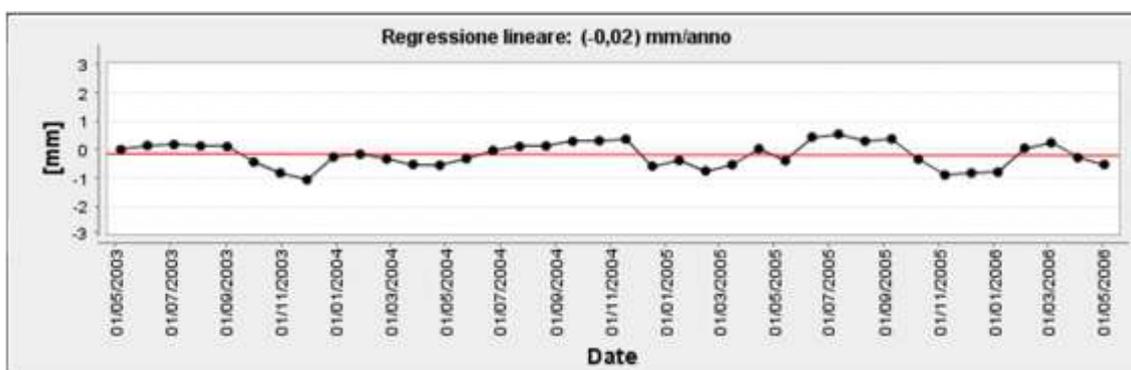


Fig. 5 Esempio di serie storica con valori di regressione lineare nulla.

Per individuare eventuali correlazioni tra gli spostamenti del suolo e l'attività di stoccaggio, viene eseguito un confronto tra la curva cumulativa di stoccaggio e le serie storiche di alcuni punti rappresentativi posti sia all'interno che all'esterno della proiezione in superficie dell'area originariamente mineralizzata.

Questo documento è di proprietà Stogit e i suoi contenuti hanno carattere di riservatezza.



Nel caso specifico di Bordolano, per la gran parte del periodo monitorato il campo non era ancora attivo allo stoccaggio. In particolare, tra il 2008 ed il 2013 è stata completata la ricostituzione del cushion gas per un volume totale iniettato di 455 Msm³, mentre nel corso del 2016 sono stati dapprima eseguiti alcuni test di iniezione/erogazione mirati alla verifica del corretto funzionamento degli impianti e solo nella seconda parte dell'anno sono stati iniettati i primi volumi di working gas. Attualmente il campo è attivo allo stoccaggio con graduale riempimento per raggiungere la condizione a regime.

La curva cumulativa del gas movimentato è stata ottenuta riportando, mese per mese, i volumi di gas iniettati ed erogati e calcolando la sommatoria cumulativa del bilancio dei volumi a fine mese (Fig. 6); in questo modo è stato possibile comparare analiticamente le misure di spostamento verticale dei punti e i volumi di gas erogati o immessi nel giacimento.

L'analisi comparata delle serie storiche di spostamento dei punti e della curva cumulativa del gas movimentato è un elemento molto utile per la caratterizzazione dello scenario deformativo di fondo degli anni precedenti l'avvio dello stoccaggio, per poter eseguire un confronto con il periodo da cui si opera lo stoccaggio del gas.

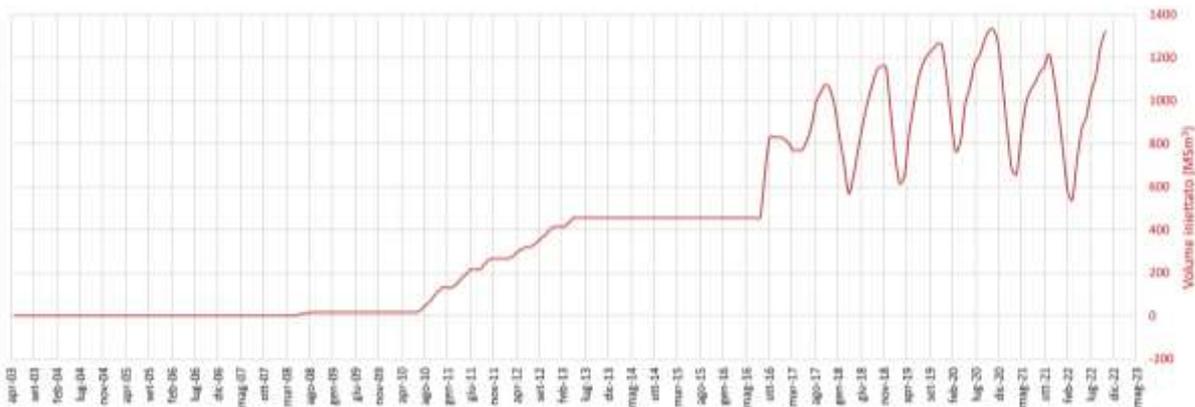


Fig. 6 Curva cumulativa del gas movimentato del campo di Bordolano (volumi in Milioni di Standard m³ o MSm³).

Analisi dell'ampiezza media della stagionalità

Al fine di evidenziare più facilmente la presenza di movimenti ciclici riconducibili all'attività di stoccaggio, per ogni punto di misura individuato nelle analisi in singola geometria, così come per il dato scomposto, è fornito anche il valore di ampiezza media della stagionalità, calcolato sull'intera serie storica di spostamento.

Tale valore fornisce un'indicazione dell'ampiezza media nell'intero periodo considerato, pertanto consente di individuare i PS che presentano un'evidente oscillazione stagionale, come ad esempio quelli ubicati entro i limiti dei giacimenti di stoccaggio o in aree caratterizzate da attività di prelievo di acqua dal sottosuolo. Informazioni dettagliate sull'andamento nel tempo dei movimenti del suolo si possono ricavare esclusivamente dall'analisi delle singole serie storiche di spostamento.

3. Analisi del campo di Bordolano

Per il monitoraggio del campo di Bordolano, Stogit effettua un'analisi SqueeSAR™ di tipo Local con estensione di circa 54 km² e di tipo Regional con estensione di circa 900 km² comprendente al suo interno le singole aree Local di Bordolano, Ripalta e Sergnano (Fig. 7).

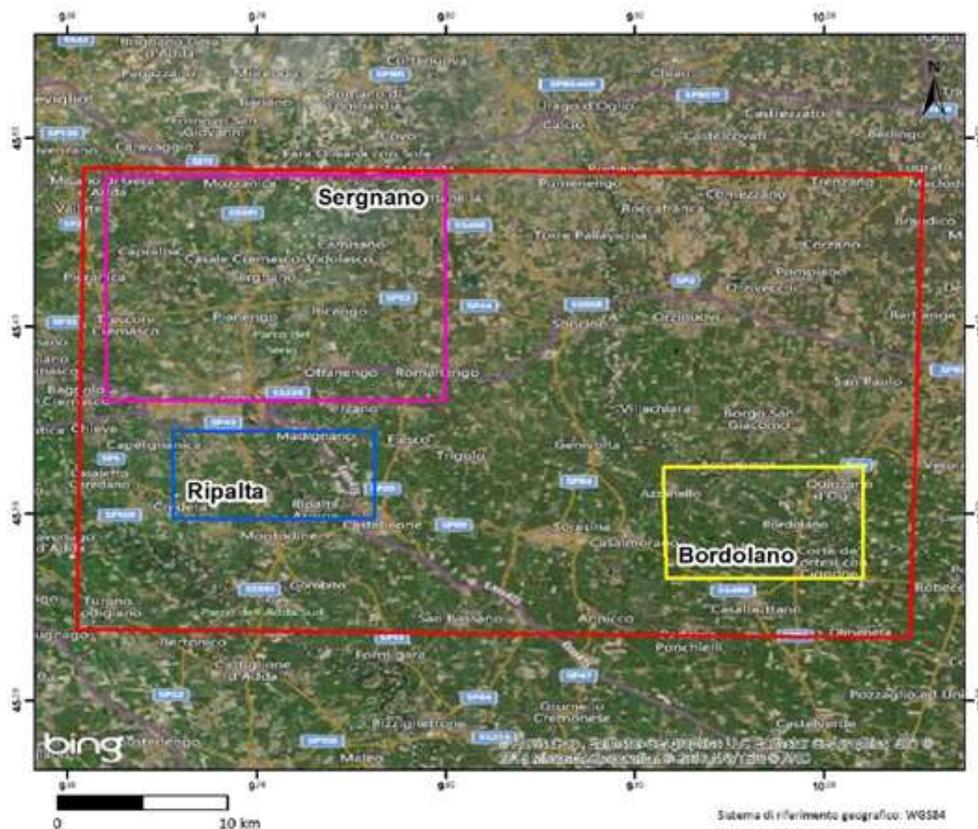


Fig. 7 Estensione dell'area Regional di Crema rispetto alle tre aree Local di Bordolano, Ripalta e Sergnano.

L'analisi ha previsto l'elaborazione di più dataset di immagini acquisite sia in geometria ascendente che discendente dai satelliti Radarsat-1 e Radarsat-2, nel periodo compreso tra Ottobre 2003 e Novembre 2020, e dal satellite Sentinel-1 nel periodo compreso tra Marzo 2015 e Novembre 2022.

Grazie all'utilizzo della nuova soluzione tecnica di "stitching" applicata ai dataset Radarsat e Sentinel, non è più necessario acquisire nuove immagini Radarsat, satellite che sarà destinato a non essere più operativo nei prossimi anni. In Tab. 1 è riportato il dettaglio dei dataset, con il numero totale di immagini elaborate ed i relativi periodi di acquisizione: essi si presentano ben strutturati e quindi affidabili per una corretta analisi e interpretazione dei risultati.



STOGIT-GIAC

**Concessione Bordolano Stoccaggio
Monitoraggio dei movimenti del suolo**

Anno 2022

PAG 15 DI 46

	Geometria	Track	N° immagini	Periodo
Radarsat 1-2	Ascendente	147-66	232	09/10/2003-27/10/2020
Radarsat 1-2	Discendente	197-116	241	13/10/2003-31/10/2020
Sentinel-1	Ascendente	15	371	23/03/2015-24/10/2022
Sentinel-1	Discendente	168	380	22/03/2015-23/10/2022

Tab. 1 Dataset elaborati per il presente aggiornamento.

Il dataset integrato Radarsat-Sentinel, relativo all'intero periodo di indagine, rappresenta il principale riferimento per l'analisi SAR condotta sul campo di Bordolano. Allo scopo di fornire un quadro completo dello scenario deformativo dell'area monitorata negli ultimi 7 anni, nel presente report vengono descritti anche i risultati dell'analisi del solo dato Sentinel, ed il relativo confronto con i risultati ottenuti con il dataset integrato. Sentinel fornisce infatti informazioni dettagliate in merito alla storia recente dell'area (ossia da quando è stato avviato lo stoccaggio), sia in termini di frequenza temporale delle acquisizioni che in termini di copertura areale del dato con un aumento dei punti di misura.

3.1. Analisi delle velocità medie

Di seguito vengono illustrati i risultati dell'analisi del dataset integrato Radarsat-Sentinel e del dataset Sentinel in termini di velocità media di spostamento dei PS, con particolare riferimento alla componente verticale. I valori di velocità verticale dei PS Regional sono stati calibrati con i valori di velocità verticale assoluti di una stazione GPS di riferimento, esterna all'area del giacimento e sicuramente non influenzata dalle attività di stoccaggio; a partire dai dati Regional calibrati, sono stati quindi calibrati anche i valori di velocità verticale dei PS Local.

3.1.1. Analisi e calibrazione del dato integrato Radarsat-Sentinel

Analisi del dato GPS

Per la calibrazione del dataset Regional integrato, viene utilizzata una stazione CGPS pubblica ubicata nel centro urbano di Crema.

Fino al 2013 i dati di tale stazione, appartenente alla rete di stazioni GNSS presente sul territorio regionale lombardo, venivano acquistati da ERSAF (Ente Regionale per i Servizi all'Agricoltura e Foreste della Regione Lombardia). Le stazioni CGPS pubbliche sono state formalmente spente il 31 ottobre 2013 ma, a seguito di un accordo tra Regione Piemonte e Regione Lombardia, sono state riattivate e conglobate all'interno della Rete SPINN GNSS (Servizio di Posizionamento Interregionale GNSS Piemonte-Lombardia) a partire dal 1 luglio 2015. Non essendo state effettuate manutenzioni o sostituzioni delle antenne GNSS, è stato possibile ottenere un set di dati coerente e in continuità col pregresso, pur essendo caratterizzato dalla mancanza di circa un anno e mezzo di dati.

La stazione CGPS pubblica di Crema è installata con monumentazione a palo presso il tetto dell'Istituto per Geometri "Pacioli" (Fig. 8). Per tale stazione sono stati stimati i movimenti di lungo periodo, dal 14/05/2005 al 31/10/2022, ed i dati sono stati analizzati nell'ambito di una rete di riferimento costituita da 9 stazioni IGS/EPN. Tale CGPS misura un valore medio di velocità assoluta pari a -0.18 mm/anno nella componente verticale (Fig. 9).



Fig. 8 Ubicazione del GPS pubblico di Crema e particolare dell'antenna.

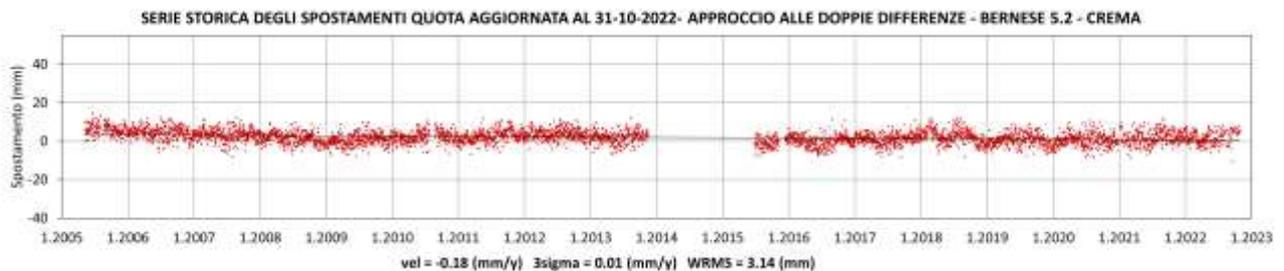


Fig. 9 Stima di velocità della componente verticale per il GPS pubblico di Crema.

Analisi e calibrazione del dato Regional con il GPS di riferimento

Il dato integrato Radarsat-Sentinel evidenzia, sia nella componente verticale che in quella orizzontale, la sostanziale stabilità dell'area Regional (Fig. 10 e Fig. 11) ad eccezione dell'estremità SO in cui sono presenti fenomeni di abbassamento che superano i -5 mm/anno.

Il valore medio di velocità verticale dei PS Regional ricadenti in un'area di raggio pari a circa 200 m nell'intorno del CGPS pubblico di Crema è pari a $+0.05$ mm/anno. Considerato che il CGPS di Crema misura un valore medio di velocità verticale assoluta di -0.18 mm/anno, la correzione da apportare ai valori scomposti Regional per riportarli sul piano assoluto rilevato dal CGPS risulta essere di -0.23 mm/anno (Fig. 12). Tale metodologia consente di calibrare il dato Regional (originariamente relativo al punto di riferimento utilizzato per la scomposizione) riportandolo su un piano assoluto.

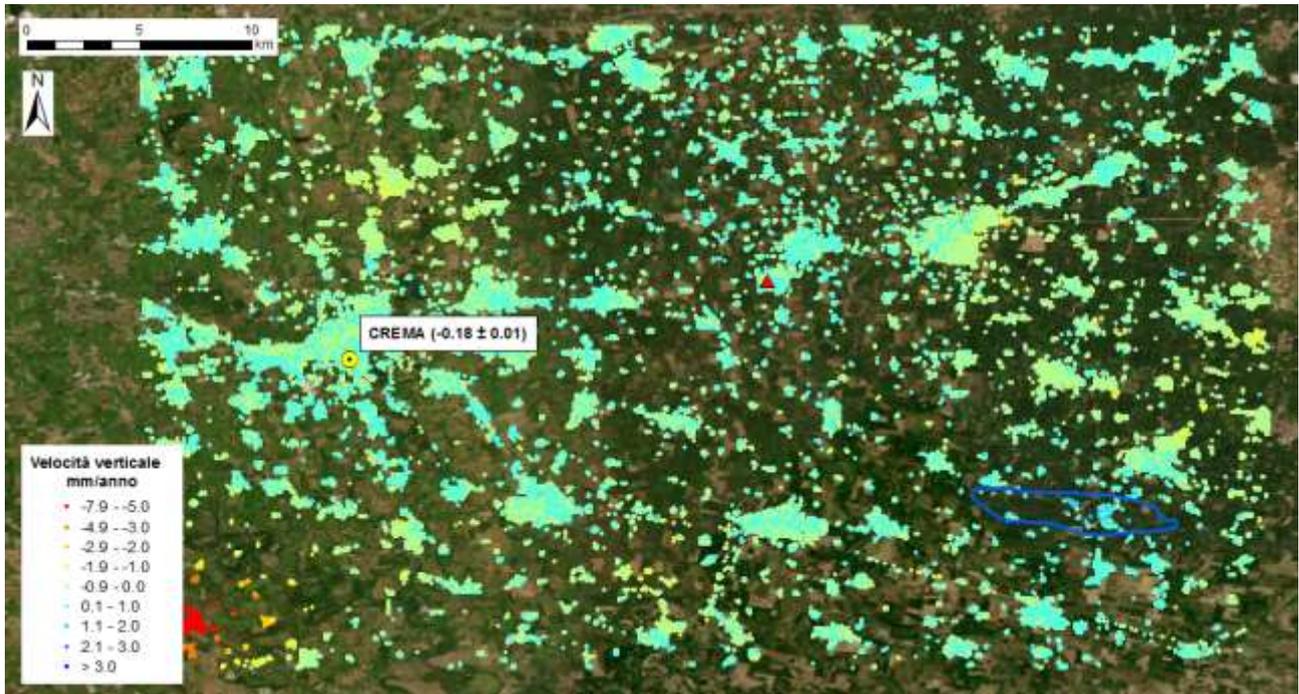


Fig. 10 Dati Regional scomposti secondo il vettore verticale prima della calibrazione. In evidenza il punto di riferimento utilizzato per la scomposizione del vettore velocità (triangolo rosso) e il CGPS pubblico di Crema (giallo). In blu la proiezione in superficie del giacimento.

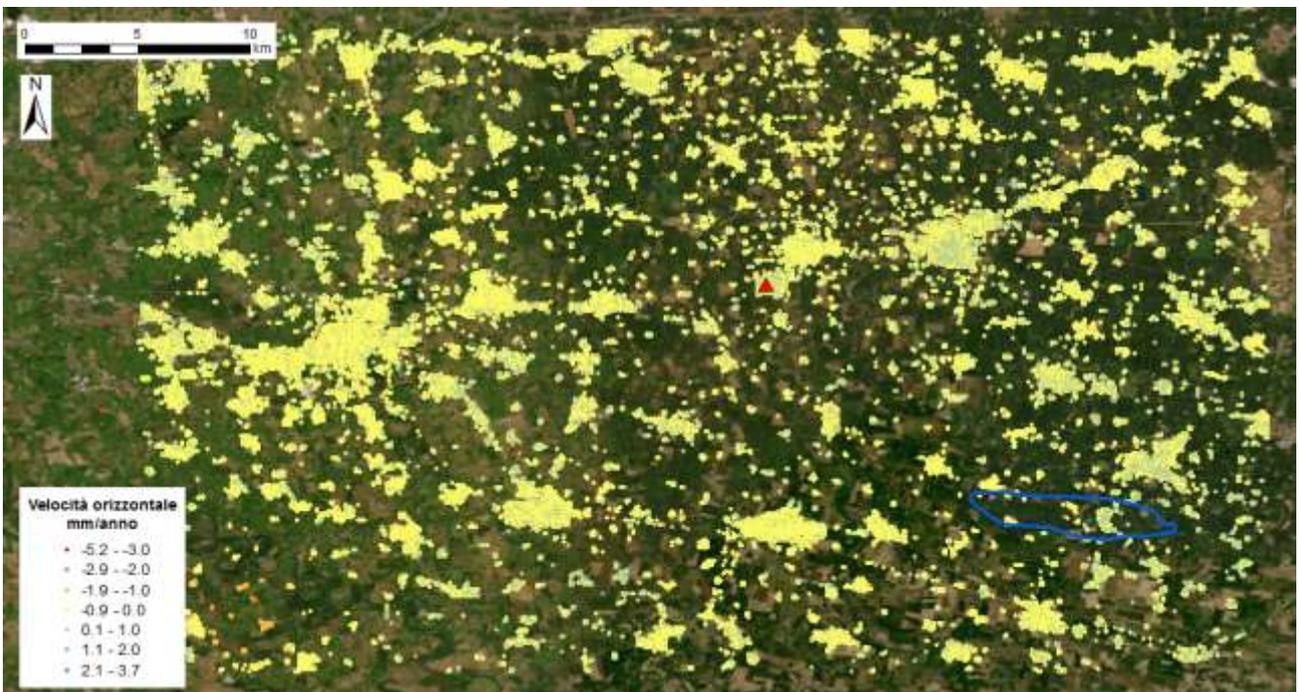


Fig. 11 Dati Regional scomposti secondo il vettore orizzontale. In evidenza il punto di riferimento utilizzato per la scomposizione del vettore velocità (triangolo rosso). In blu la proiezione in superficie del giacimento.



STOGIT-GIAC

Concessione Bordolano Stoccaggio Monitoraggio dei movimenti del suolo

Anno 2022

PAG 18 DI 46



Fig. 12 Punti scomposti dell'analisi Regional: in giallo i valori di velocità verticale originali e in rosa quelli calibrati.

L'analisi a scala regionale, eseguita considerando la media dei valori calibrati di velocità verticale dei PS Regional ubicati entro l'area definita dalla proiezione in superficie del limite del giacimento di Bordolano, ha evidenziato una velocità verticale media pari a $+0.64$ mm/anno. Il dato evidenzia un lieve sollevamento dell'area occupata dal giacimento di Bordolano dovuto al suo graduale riempimento, in accordo con quanto rilevato nei report degli anni precedenti. Tale effetto tende ad esaurirsi in prossimità del limite del giacimento. Solo nell'area immediatamente a sud-est del giacimento tale trend di sollevamento è ancora visibile e diminuisce gradualmente fino ad esaurirsi a una distanza di circa 1.5 km.

L'analisi evidenzia inoltre come il leggero trend di sollevamento cui è soggetta l'area del giacimento si stia gradualmente riducendo con una tendenza alla stabilità in accordo con la graduale regimazione del campo: la continuità del monitoraggio nei prossimi anni fornirà maggiori indicazioni in merito all'evoluzione di questo trend.

Il dataset di velocità verticale Regional calibrato con il CGPS di riferimento è riportato in Fig. 13.

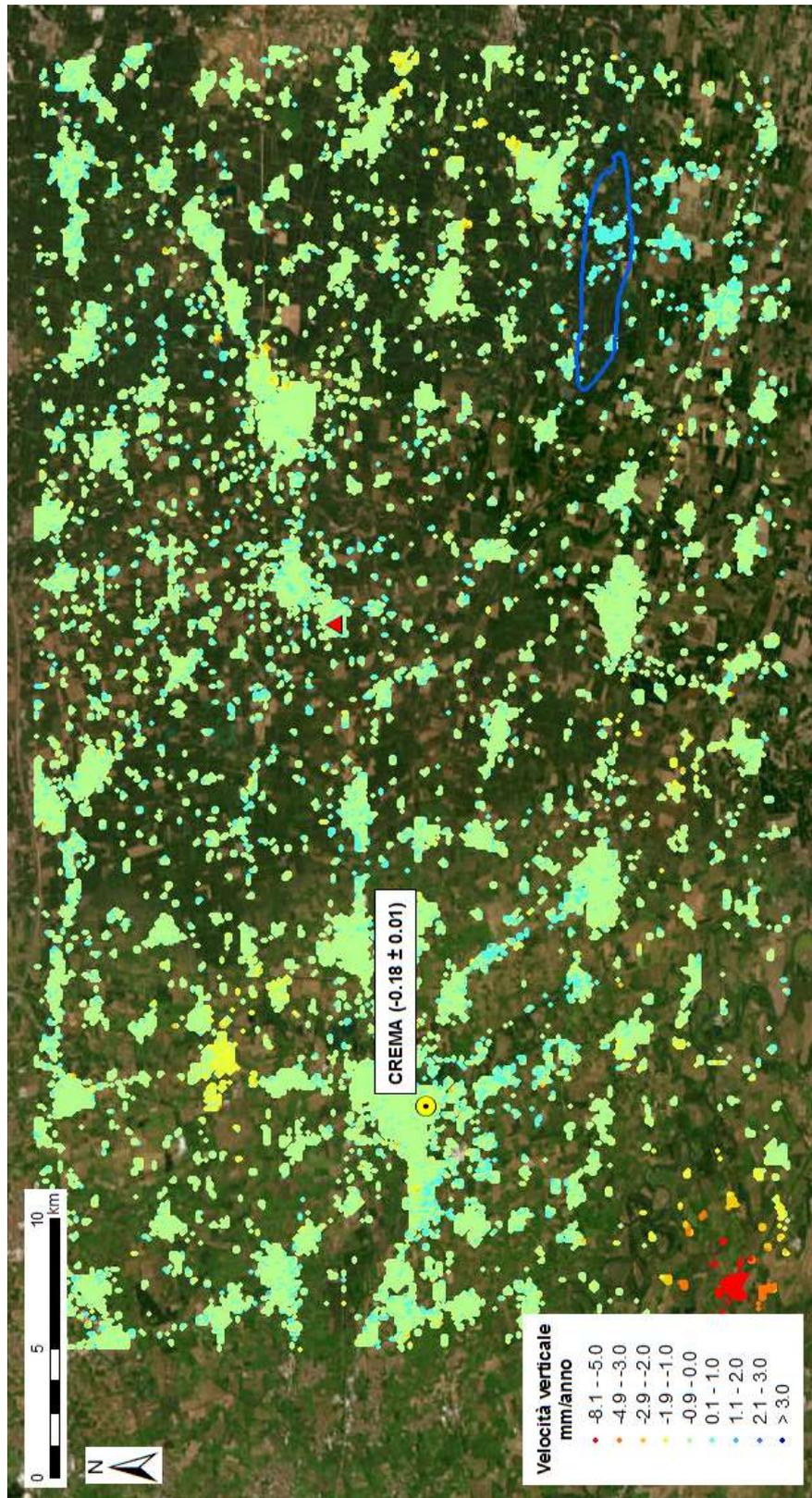


Fig. 13 Dati Regional scomposti secondo il vettore verticale e calibrati. In evidenza l'ubicazione del CGPS usato per la calibrazione e il punto di riferimento (triangolo rosso); in blu la proiezione in superficie del giacimento.



Analisi e calibrazione del dato Local con il dato Regional

Da Fig. 14 a Fig. 17 sono riportati i dati di velocità dell'analisi Local per i PS riconosciuti in modalità ascendente e discendente dai satelliti Radarsat (Ottobre 2003-Novembre 2020) e Sentinel (Marzo 2015-Novembre 2022), utilizzati per lo "stitching" tra i due dataset e l'elaborazione integrata Radarsat-Sentinel. Il punto di riferimento nei singoli dataset Radarsat e Sentinel, al quale è assegnata velocità pari a zero, è stato mantenuto distante dalla zona di influenza del giacimento, in modo da apprezzare in maniera oggettiva le eventuali anomalie deformative. Nel dato scomposto, il punto di riferimento del dataset integrato Radarsat-Sentinel è stato posizionato in corrispondenza di quello del dataset Sentinel.

Come si nota in Fig. 18, i valori di velocità verticale del dato integrato Radarsat-Sentinel evidenziano un leggero trend di innalzamento nell'area del giacimento in accordo con l'analisi a scala regionale.

I valori di velocità verticale dei PS Local presenti in ogni singola cella dell'analisi si possono correlare ai dati ottenuti dalla scomposizione dei dati dell'analisi Regional, che sono stati a loro volta calibrati con il dato del CGPS di Crema. Considerando il valore medio di velocità verticale dei punti dell'analisi Regional calibrati ricadenti in un'area di circa 200 m attorno al PS di riferimento dell'analisi Local (Fig. 19), è stato calcolato un valore di calibrazione pari a circa -0.35 mm/anno da sommare a tutti i PS dell'analisi Local in modo tale da riportarli al piano assoluto rilevato dal CGPS (Fig. 20).

L'analisi a scala locale, eseguita considerando la media dei valori calibrati di velocità verticale dei PS Local entro l'area definita dalla proiezione in superficie del limite del giacimento, ha evidenziato una velocità verticale media di +0.42 mm/anno (Fig. 21). Tale valore risulta altresì coerente con quanto misurato nel corso degli anni precedenti, a dimostrazione della qualità dei dati SAR e CGPS utilizzati.

L'osservazione delle velocità degli spostamenti orizzontali (Fig. 22) evidenzia una sostanziale stabilità dell'area, se analizzata sull'intero periodo.



Satellite info

Satellite	Wavelength	Satellite geometry	Sensor mode	Satellite track
RSAT	5.66 cm	ASCENDING	S3	147
RSAT2	5.55 cm	ASCENDING	S3	66

Acquisition geometry

Line of sight angle	θ : 31.64°	δ : 11.52°		
Line of sight versors	V: 0.851	N: -0.105	E: -0.514	



Fig. 14 Dataset Radarsat. Visualizzazione in scala di colori delle velocità dell'analisi Local per i PS riconosciuti in modalità ascendente. In evidenza il punto di riferimento (triangolo rosso) e la proiezione in superficie del giacimento. Sotto, i parametri dell'acquisizione e la rappresentazione grafica della configurazione utilizzata.



Satellite info

Satellite	Wavelength	Satellite geometry	Sensor mode	Satellite track
RSAT	5.66 cm	DESCENDING	S3	197
RSAT2	5.55 cm	DESCENDING	S3	116

Acquisition geometry

Line of sight angle	θ : 34.91°	δ : 10.52°		
Line of sight vectors	V: 0.82	N: -0.105	E: 0.563	



Fig. 15 Dataset Radarsat. Visualizzazione in scala di colori delle velocità del rilievo Local per i PS riconosciuti in modalità discendente. In evidenza il punto di riferimento (triangolo rosso) e la proiezione in superficie del giacimento. Sotto, i parametri dell'acquisizione e la rappresentazione grafica della configurazione utilizzata.



Satellite info

Satellite	Wavelength	Satellite geometry	Sensor mode	Satellite track
SNT	5.55 cm	ASCENDING	IW	15

Acquisition geometry

Line of sight angle	θ : 40.23°	δ : 10.4°		
Line of sight versors	V: 0.764	N: -0.117	E: -0.635	



Fig. 16 Dataset Sentinel. Visualizzazione in scala di colori delle velocità dell'analisi Local per i PS riconosciuti in modalità ascendente. In evidenza il punto di riferimento (triangolo rosso) e la proiezione in superficie del giacimento. Sotto, i parametri dell'acquisizione e la rappresentazione grafica della configurazione utilizzata.



Satellite info

Satellite	Wavelength	Satellite geometry	Sensor mode	Satellite track
SNT	5.55 cm	DESCENDING	IW	168

Acquisition geometry

Line of sight angle	θ : 41.31°	β : 9.08°		
Line of sight versors	V: 0.751	N: -0.104	E: 0.652	



Fig. 17 Dataset Sentinel. Visualizzazione in scala di colori delle velocità dell'analisi Local per i PS riconosciuti in modalità discendente. In evidenza il punto di riferimento (triangolo rosso) e la proiezione in superficie del giacimento. Sotto, i parametri dell'acquisizione e la rappresentazione grafica della configurazione utilizzata.



STOGIT-GIAC

Concessione Bordolano Stocaggio
Monitoraggio dei movimenti del suolo

Anno 2022

PAG 25 DI 46

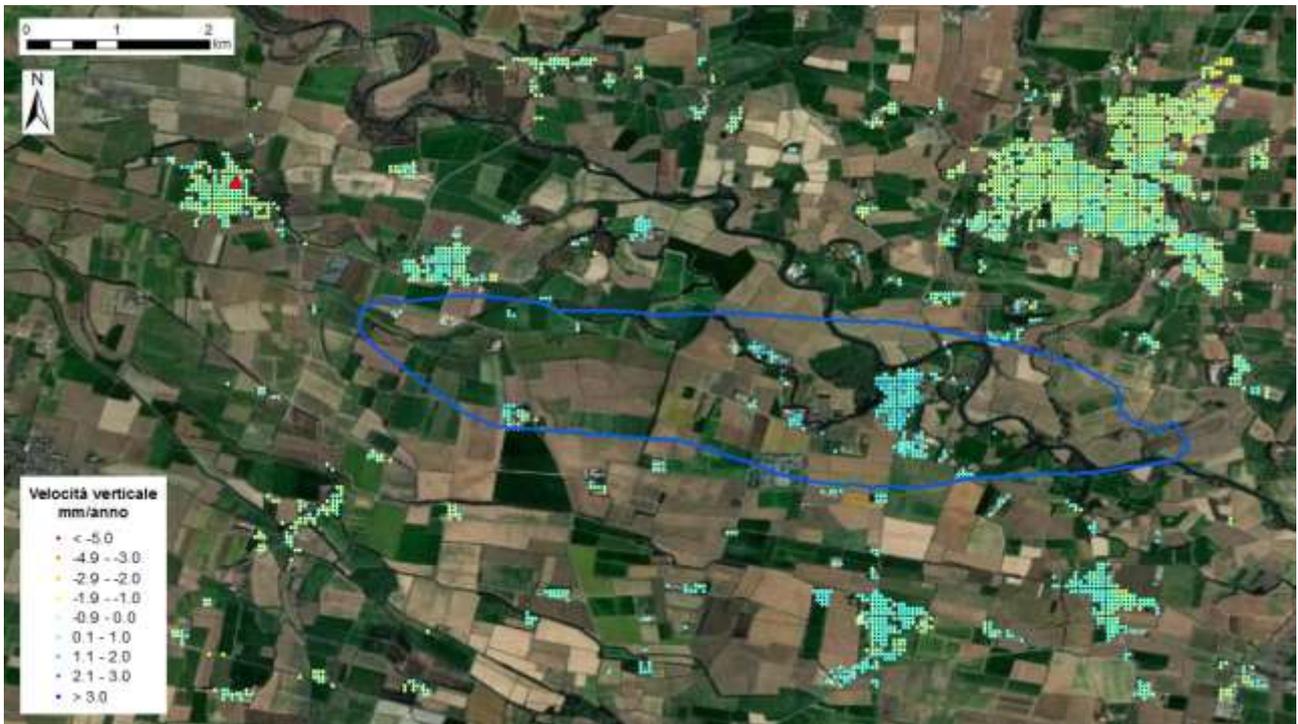


Fig. 18 Dati Local scomposti secondo il vettore verticale prima della calibrazione. In evidenza il punto di riferimento utilizzato per la scomposizione del vettore velocità (triangolo rosso) e la proiezione in superficie del giacimento.



Fig. 19 Visualizzazione del punto di riferimento dell'analisi Local (triangolo rosso) ed indicazione dei punti Regional più vicini con i rispettivi valori di velocità calibrati.



STOGIT-GIAC

Concessione Bordolano Stoccaggio
Monitoraggio dei movimenti del suolo

Anno 2022

PAG 26 DI 46



Fig. 20 Visualizzazione del punto di riferimento dell'analisi Local (triangolo rosso) ed indicazione dei valori di velocità verticale originali (in bianco) e calibrati (in verde).

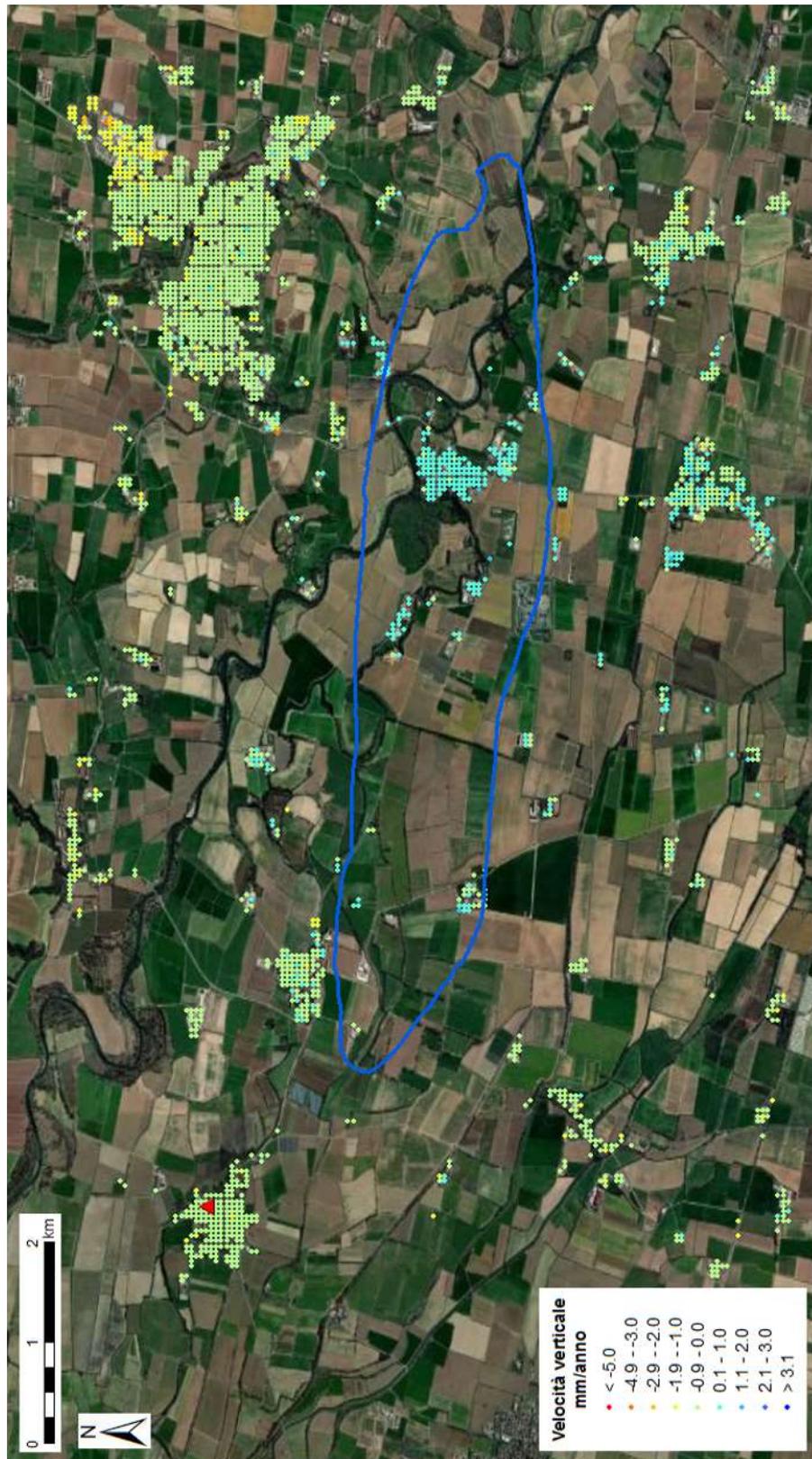


Fig. 21 Dati Local scomposti secondo il vettore verticale e calibrati. In evidenza il punto di riferimento utilizzato per la scomposizione del vettore velocità (triangolo rosso) e la proiezione in superficie del giacimento.

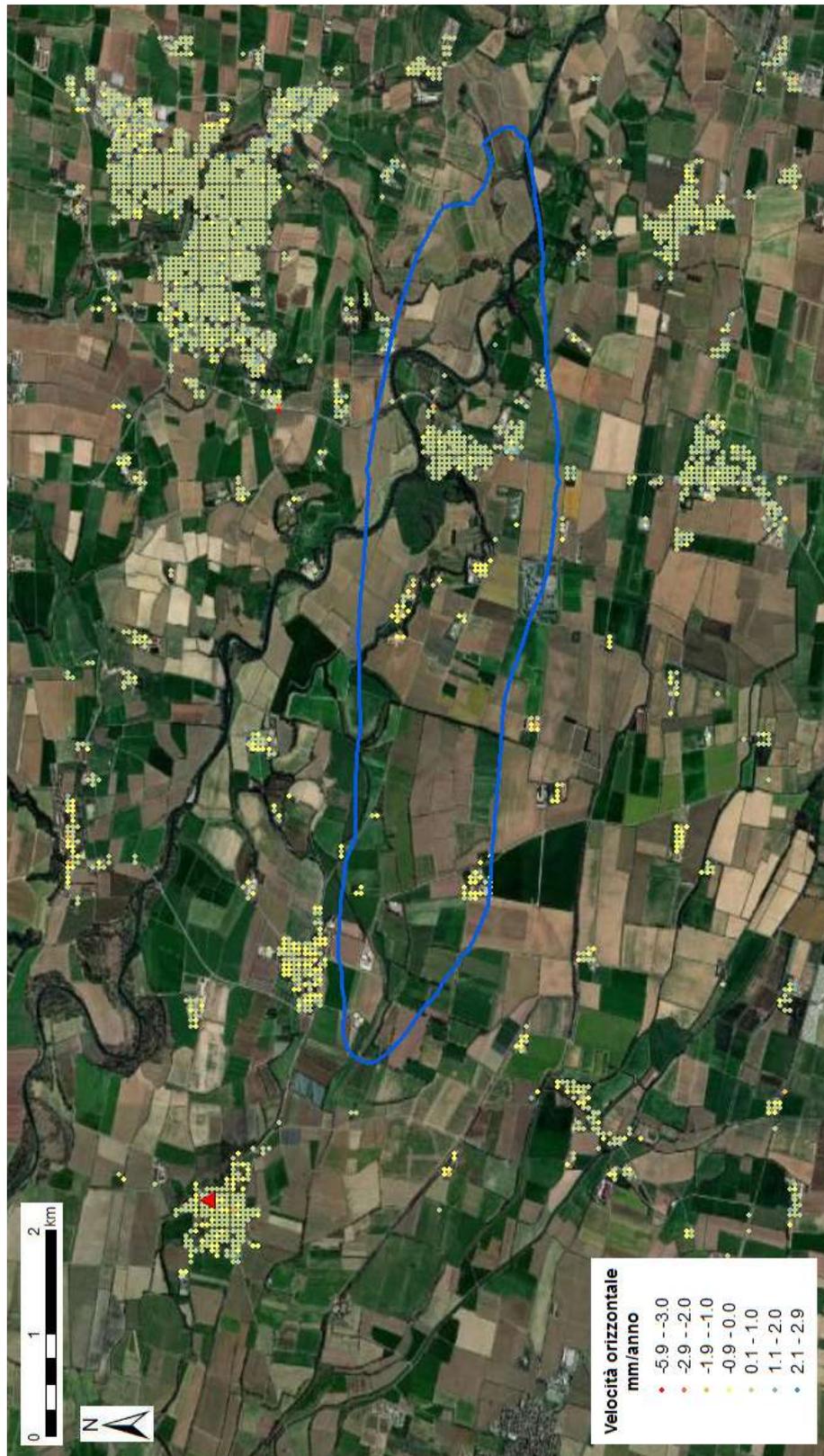


Fig. 22 Dati Local scomposti secondo il vettore orizzontale. In evidenza il punto di riferimento utilizzato per la scomposizione del vettore velocità (triangolo rosso) e la proiezione in superficie del giacimento.

3.1.2. Analisi e calibrazione del dato Sentinel

Analisi del dato GPS

Ai fini della calibrazione del dataset Regional Sentinel, viene utilizzata la stazione di monitoraggio GPS in continuo installata nel 2014 presso la Sede operativa Stogit di Crema. La stazione si trova ad una distanza di circa 700 m dalla stazione GPS pubblica di Crema utilizzata per la calibrazione del dato integrato Radarsat-Sentinel ma copre un intervallo temporale confrontabile con quello del dato Sentinel.

Il CGPS Stogit di Crema è installato con monumentazione a palo presso il tetto della sede operativa Stogit (Fig. 23). Per tale CGPS sono stati stimati i movimenti di lungo periodo, dal 07/12/2014 al 31/10/2022, ed i dati sono stati analizzati nell'ambito di una rete di riferimento costituita da 9 stazioni IGS/EPN. Il CGPS Stogit di Crema misura un valore medio di velocità assoluta pari a -0.00 mm/anno nella componente verticale (Fig. 24).



Fig. 23 Ubicazione del GPS Stogit di Crema e particolare dell'antenna.



Fig. 24 Stima di velocità della componente verticale per il GPS Stogit di Crema.

Analisi e calibrazione del dato Regional con il GPS di riferimento

In accordo con quanto misurato con il dataset integrato, la distribuzione dei valori di velocità ottenuta con il solo dato Sentinel conferma la sostanziale stabilità dell'area Regional ed i fenomeni di abbassamento

Questo documento è di proprietà Stogit e i suoi contenuti hanno carattere di riservatezza.



che superano i -5 mm/anno dell'estremità SO dell'area (Fig. 25 e Fig. 26). Dal momento che l'analisi Sentinel fornisce informazioni dettagliate sul periodo in cui il campo è stato avviato allo stoccaggio (2016-2020), come da aspettative, risulta più evidente il lieve sollevamento nell'area del giacimento dovuto al suo graduale riempimento, stimato nell'ordine di circa 1 mm/anno.

Il valore medio di velocità verticale dei PS Regional ricadenti in un'area di raggio pari a circa 200 m nell'intorno del CGPS Stogit di Crema è pari a +0.06 mm/anno. Considerato che il CGPS misura un valore medio di velocità verticale assoluta di -0.00 mm/anno, la correzione da apportare ai valori scomposti Regional per riportarli al piano assoluto rilevato dal CGPS risulta essere pari a -0.06 mm/anno (Fig. 27).

L'analisi a scala regionale, effettuata considerando la media dei valori calibrati di velocità verticale dei PS Regional ubicati entro l'area definita dalla proiezione in superficie del limite del giacimento di Bordolano, evidenzia una velocità verticale media pari a +0.94 mm/anno. Il dato conferma il lieve sollevamento dell'area occupata dal giacimento di Bordolano dovuto al suo graduale riempimento.

In accordo con quanto evidenziato dal dataset integrato, tale effetto tende ad esaurirsi in prossimità del limite del giacimento e a ridursi nel tempo con una tendenza alla stabilità; solo nell'area immediatamente a sud-est del giacimento tale trend di sollevamento è ancora visibile e diminuisce gradualmente fino ad esaurirsi a una distanza di circa 1.5 km.

Il dataset di velocità verticale Regional calibrato con il CGPS di riferimento è riportato in Fig. 28.

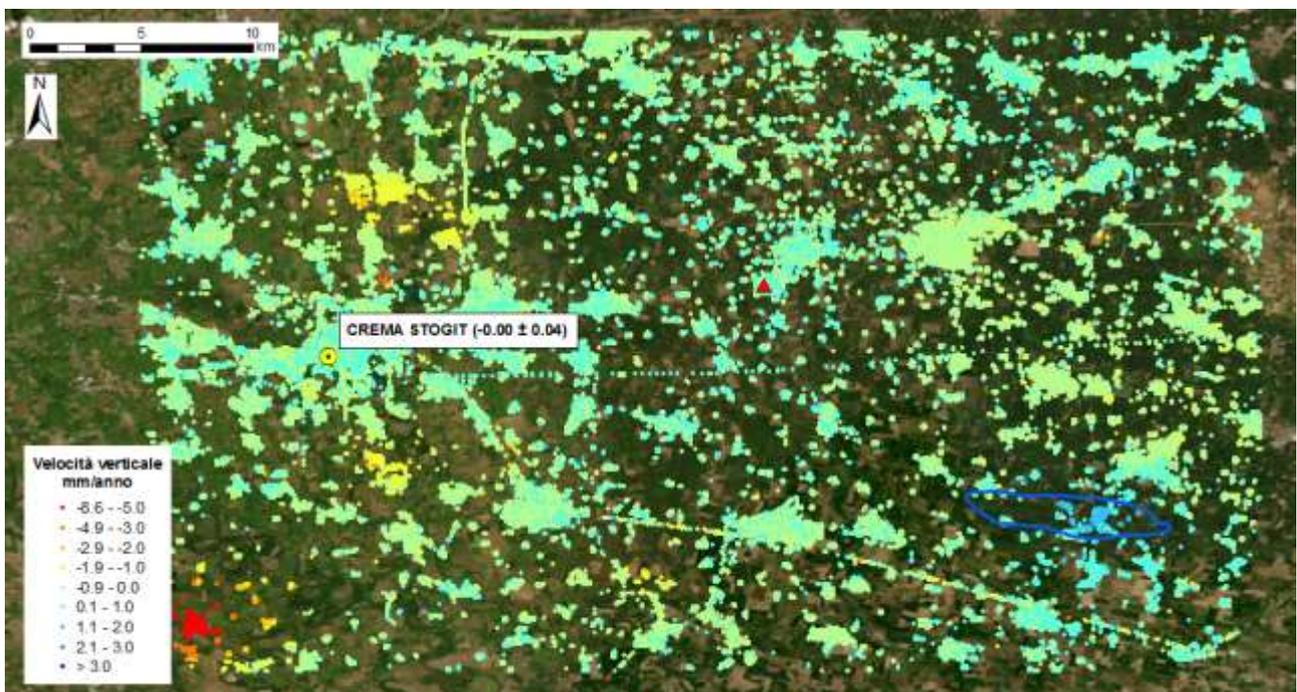


Fig. 25 Dati Regional scomposti secondo il vettore verticale prima della calibrazione. In evidenza il punto di riferimento utilizzato per la scomposizione del vettore velocità (triangolo rosso) e il CGPS Stogit di Crema (giallo); in blu la proiezione in superficie del giacimento.

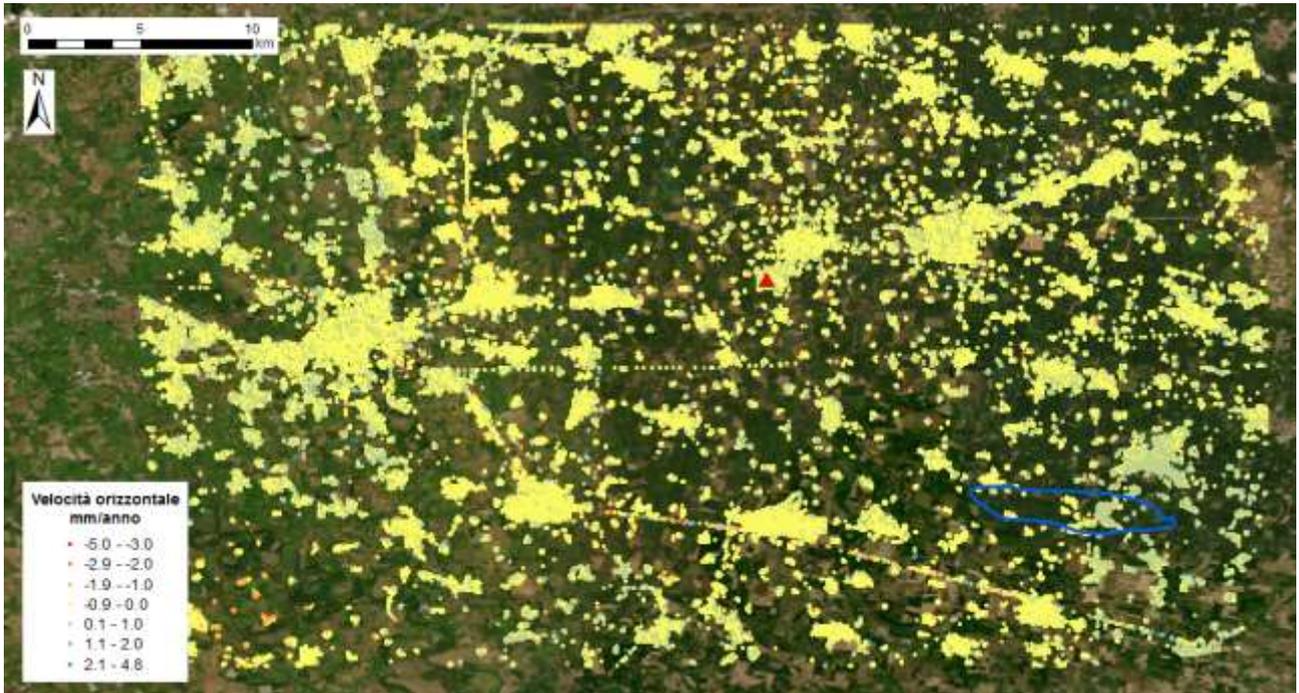


Fig. 26 Dati Regional scomposti secondo il vettore orizzontale. In evidenza il punto di riferimento utilizzato per la scomposizione del vettore velocità (triangolo rosso); in blu la proiezione in superficie del giacimento.



Fig. 27 Punti scomposti dell'analisi Regional: in giallo i valori di velocità verticale originali e in rosa quelli calibrati.

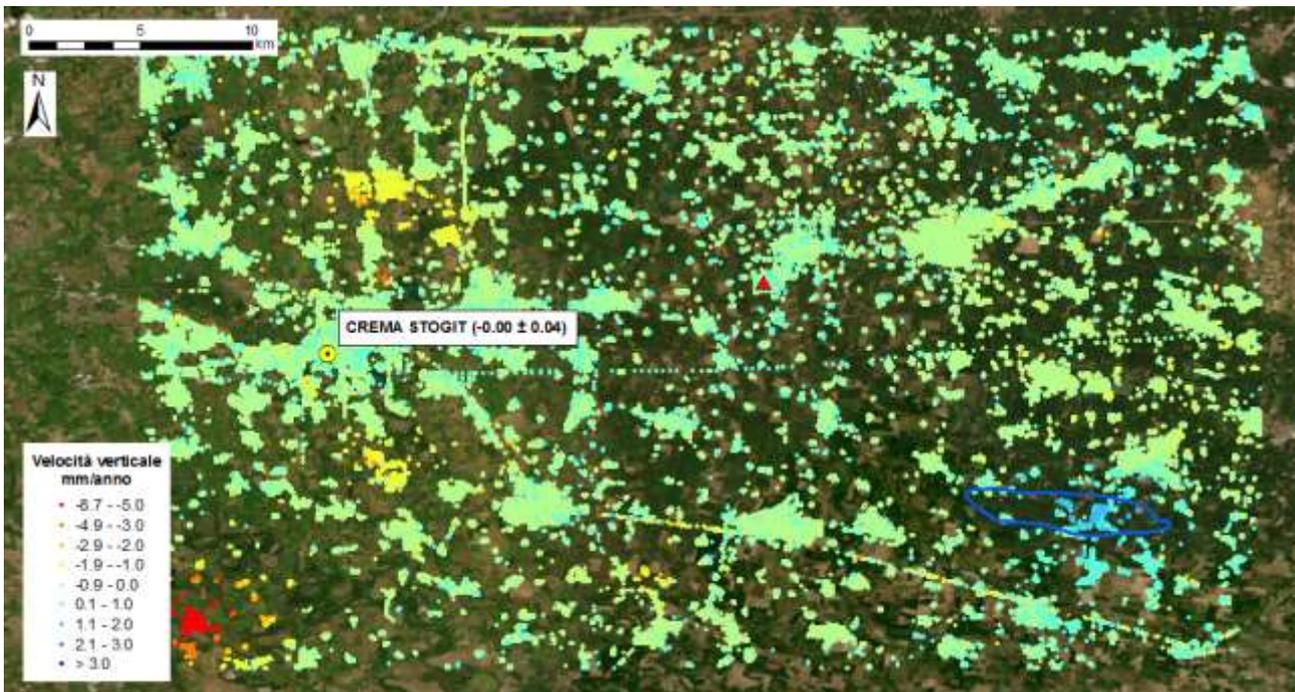


Fig. 28 *Dati Regional scomposti secondo il vettore verticale e calibrati. In evidenza l'ubicazione del CGPS usato per la calibrazione e il punto di riferimento (triangolo rosso); in blu la proiezione in superficie del giacimento.*

Analisi e calibrazione del dato Local con il dato Regional

Il punto di riferimento utilizzato per la scomposizione del moto, al quale è assegnata velocità pari a zero, è stato mantenuto distante dalla zona di influenza del giacimento e coincide con il punto di riferimento dell'analisi integrata Radarsat-Sentinel, per eseguire un più preciso confronto tra le misure ottenute.

Come si nota in Fig. 29, i valori di velocità verticale dell'area studiata evidenziano un leggero trend di innalzamento dell'area del giacimento. Il valore medio di velocità verticale dei punti dell'analisi Regional calibrati ricadenti in un'area di circa 200 m attorno al PS di riferimento dell'analisi Local (punto supposto per convenzione con velocità pari a zero), risulta essere di circa -0.26 mm/anno (Fig. 30). Per effettuare l'integrazione tra le due analisi, tale valore medio di velocità è stato sommato a tutti i PS dell'analisi Local, in modo da riportarli ad un piano assoluto (Fig. 31).

L'analisi a scala locale, eseguita considerando la media dei valori calibrati di velocità verticale dei PS Local ricadenti entro il limite del giacimento, evidenzia una velocità verticale media di +0.62 mm/anno, confermando la leggera tendenza all'innalzamento per i punti ubicati entro l'area del giacimento (Fig. 32).

Il resto dell'area di analisi risulta caratterizzato da una generale stabilità e l'effetto delle attività di stoccaggio risulta esaurirsi in prossimità del limite del giacimento, ad eccezione dell'area immediatamente a sud-est del campo, a conferma di quanto evidenziato dall'analisi integrata Radarsat-Sentinel.

Le velocità degli spostamenti orizzontali (Fig. 33) evidenziano una sostanziale stabilità dell'area.



Fig. 29 Dati Local scomposti secondo il vettore verticale prima della calibrazione. In evidenza il punto di riferimento utilizzato per la scomposizione del vettore velocità (triangolo rosso) e la proiezione in superficie del giacimento.



Fig. 30 Visualizzazione del punto di riferimento dell'analisi Local (triangolo rosso) ed indicazione dei punti Regional più vicini con i rispettivi valori di velocità calibrati.



Fig. 31 Visualizzazione del punto di riferimento dell'analisi Local (triangolo rosso) ed indicazione dei valori di velocità verticale originali (in bianco) e calibrati (in verde).

I valori di velocità media calcolati con il dataset integrato Radarsat-Sentinel e con il solo dataset Sentinel, seppur riferiti a periodi temporali diversi, forniscono risultati coerenti. Le differenze tra i valori medi di velocità misurati sono dovute al diverso intervallo temporale analizzato. In accordo con quanto misurato con il dataset integrato Radarsat-Sentinel, la distribuzione dei valori di velocità verticale ottenuta con il dato Sentinel conferma il leggero sollevamento per i punti ubicati nell'area del giacimento.

L'analisi Sentinel fornisce informazioni dettagliate in merito alla storia recente dell'area (ultimi 7 anni), ossia da quando è stato avviato lo stoccaggio. L'analisi integrata Radarsat-Sentinel fornisce invece un valore di velocità media calcolato su un intervallo di tempo più ampio (2003-2022) che comprende anche tutto il periodo in cui lo stoccaggio non era ancora stato avviato, e permette quindi di analizzare lo scenario deformativo di fondo prima dell'avvio delle attività.

Inoltre, Sentinel fornisce informazioni su infrastrutture di recente costruzione che non sono visibili nel dataset Radarsat perché presenti solo negli ultimi anni del periodo monitorato, come ad esempio la centrale di stoccaggio. L'analisi del solo dataset Sentinel permette quindi di aumentare non solo la frequenza temporale delle acquisizioni ma anche la copertura areale del dato con un aumento dei punti di misura.

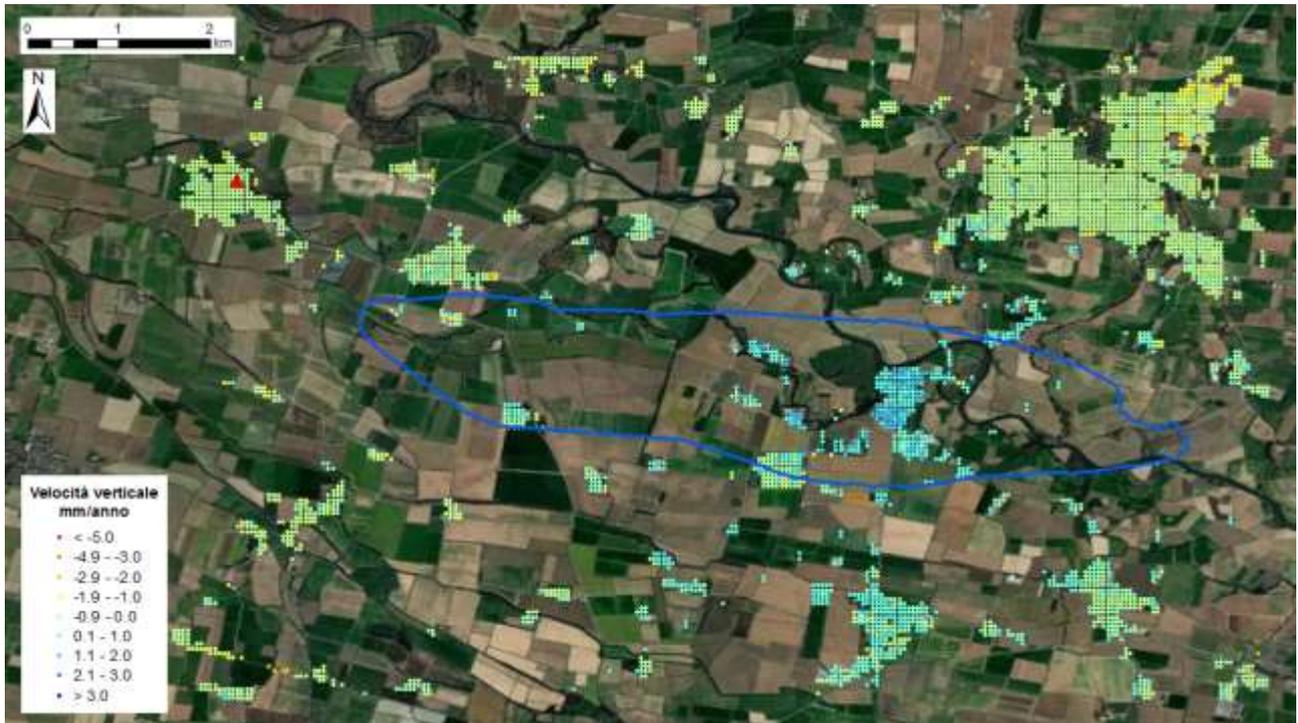


Fig. 32 Dati Local scomposti secondo il vettore verticale e calibrati. In evidenza il punto di riferimento utilizzato per la scomposizione del vettore velocità (triangolo rosso) e la proiezione in superficie del giacimento.

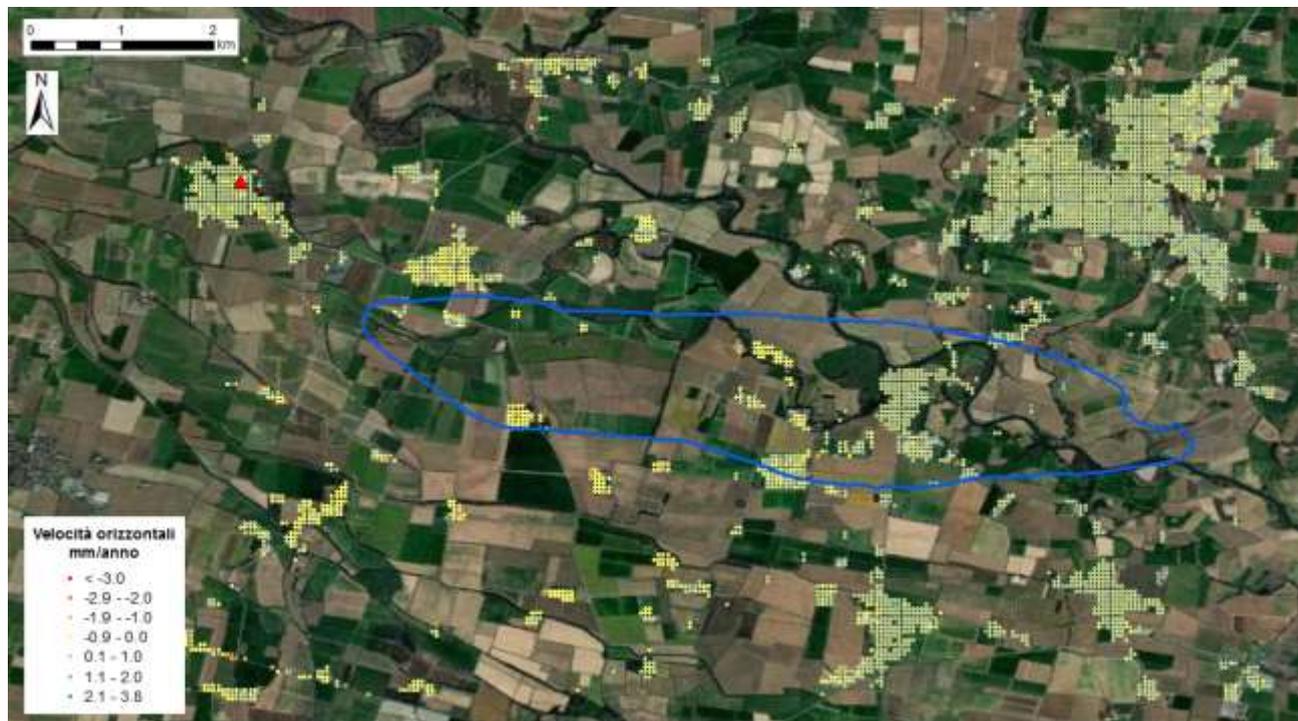


Fig. 33 Dati Local scomposti secondo il vettore orizzontale. In evidenza il punto di riferimento utilizzato per la scomposizione del vettore velocità (triangolo rosso) e la proiezione in superficie del giacimento.

3.2. Analisi dell'ampiezza media della stagionalità

Di seguito vengono illustrati i risultati dell'analisi dell'ampiezza media della stagionalità, che permette di evidenziare fenomeni di spostamento non lineari che non sono apprezzabili dalla sola analisi della velocità media, come ad esempio gli effetti in superficie dell'attività di stoccaggio o dell'emungimento delle falde acquifere superficiali. Le mappe di ampiezza media della stagionalità evidenziano che, considerando entità e distribuzione spaziale degli spostamenti, i risultati dell'analisi integrata Radarsat-Sentinel e del dato Sentinel risultano coerenti.

Dall'analisi del dato a scala regionale (Fig. 34 e Fig. 35) si nota che in corrispondenza del giacimento di Bordolano i tipici fenomeni deformativi ciclici legati allo stoccaggio del gas, riconoscibili in corrispondenza dei giacimenti di Sergnano e Ripalta, risultano lievemente apprezzabili con il solo dataset Sentinel. Questo è dovuto al fatto che l'attività di stoccaggio in giacimento è stata avviata solo recentemente e pertanto il campo non è stato attivo per gran parte del periodo monitorato con il dataset integrato Radarsat-Sentinel. Inoltre, a nord-est di Bordolano è presente un'estesa area caratterizzata da un fenomeno deformativo a carattere stagionale nella componente verticale sicuramente non riconducibile all'attività di stoccaggio e probabilmente connesso al prelievo di acqua dal sottosuolo. A titolo di esempio si riportano in Fig. 36 le serie storiche di spostamento, a partire dal periodo in cui è iniziato lo stoccaggio, di due punti ubicati in quest'area, caratterizzata da oscillazioni cicliche di ampiezza compresa tra 5 e 10 mm e periodicità stagionale, in opposizione di fase rispetto alla curva di stoccaggio.

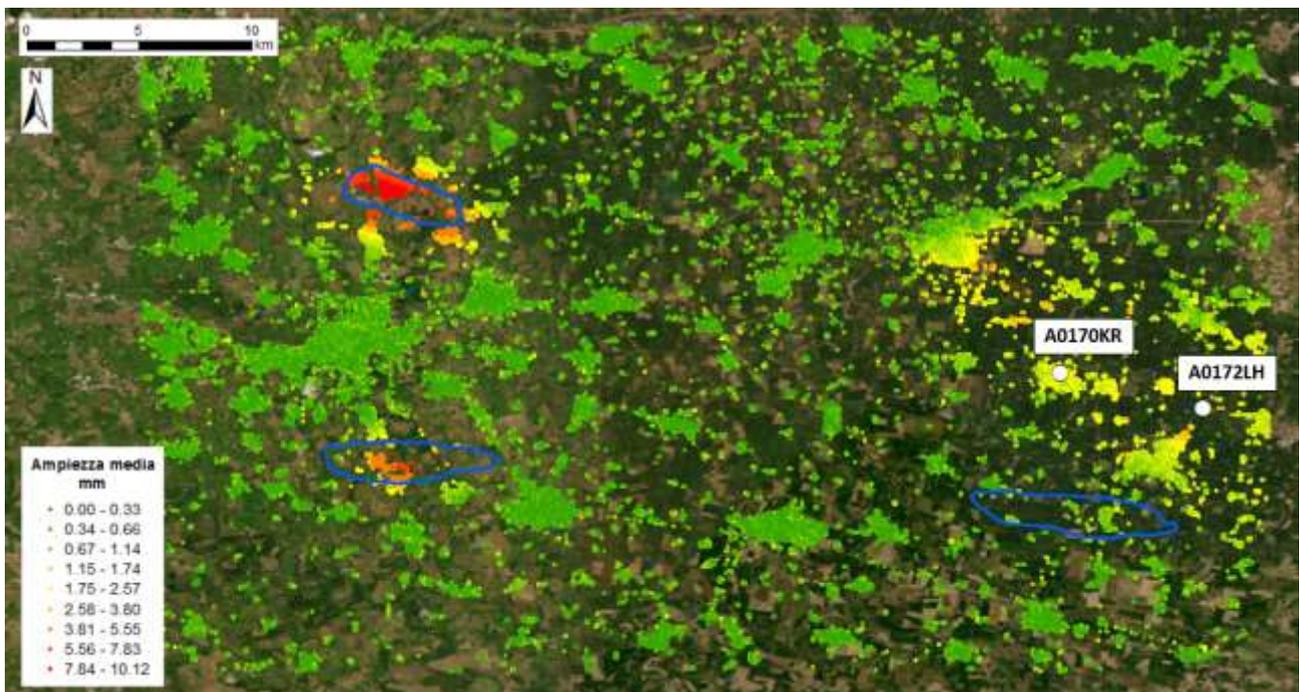


Fig. 34 Dataset integrato. Valori di ampiezza media della stagionalità per la componente verticale del rilievo Regional; in blu la proiezione in superficie dei giacimenti di Sergnano (a NO), Ripalta (a SO) e Bordolano (a SE).

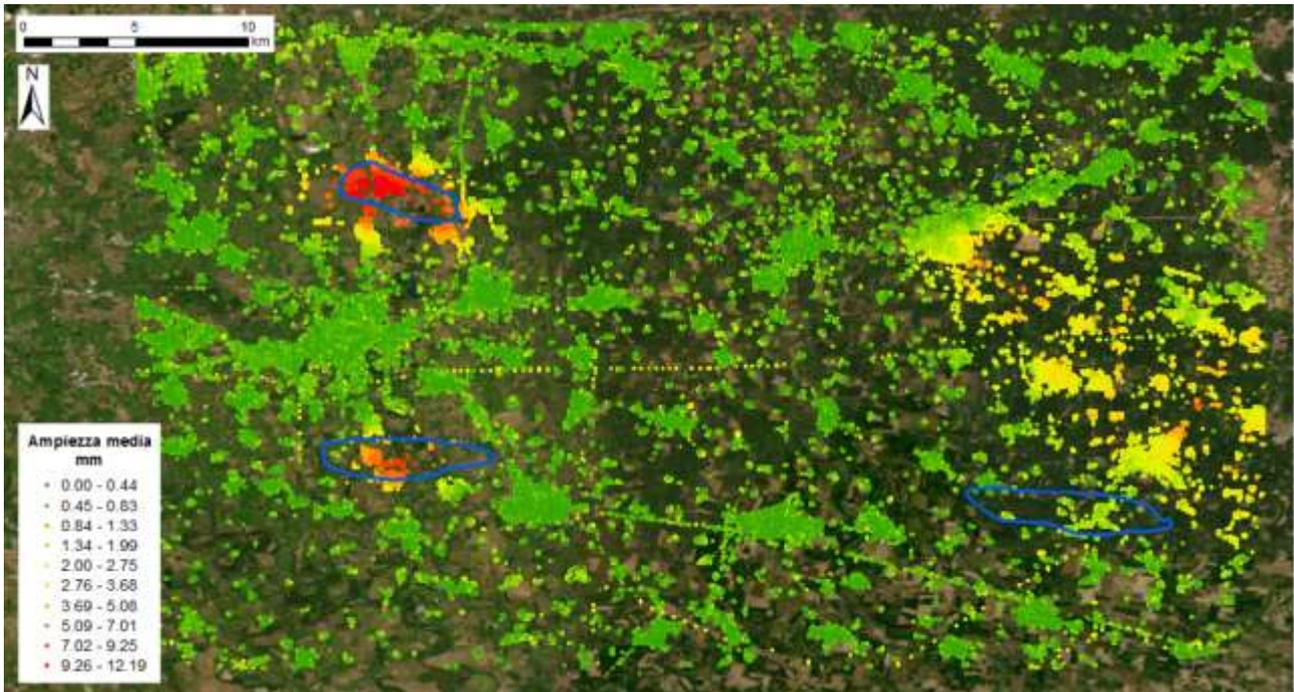


Fig. 35 Dataset Sentinel. Valori di ampiezza media della stagionalità per la componente verticale del rilievo Regional; in blu la proiezione in superficie dei giacimenti di Serignano (a NO), Ripalta (a SO) e Bordolano (a SE).

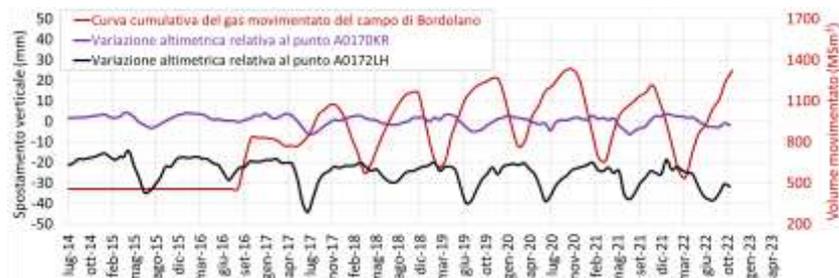


Fig. 36 Confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche di due punti nell'area a nord del campo di Bordolano e la curva del gas movimentato del giacimento (ubicazione in Fig. 35).

Anche con l'analisi a scala locale, considerando entità e distribuzione spaziale degli spostamenti, i risultati del dato integrato (Fig. 37-38) e del dato Sentinel risultano coerenti (Fig. 39-40). La distribuzione dei valori di ampiezza media della stagionalità per la componente verticale dei PS Local del dataset integrato non evidenzia la presenza di fenomeni deformativi ciclici apprezzabili nell'area del giacimento in quanto il dataset Radarsat fornisce informazioni su un intervallo di tempo ampio (2003-2020) che ricopre anche il periodo in cui lo stoccaggio non era ancora stato avviato (2003-2016). Con il dato Sentinel invece, come da aspettative, nella componente verticale del moto i fenomeni ciclici legati all'attività di stoccaggio nell'area del giacimento risultano più apprezzabili. I valori di ampiezza media della stagionalità per la componente verticale dei PS Local mostrano in entrambi i dataset la presenza di deformazioni cicliche nell'area a nord-est di Bordolano, come già evidenziato dall'analisi a scala regionale, legate ad un fenomeno deformativo sicuramente non riconducibile all'attività di stoccaggio gas. La distribuzione dei valori di ampiezza media

della stagionalità per la componente orizzontale dei PS Local non evidenzia la presenza di fenomeni deformativi ciclici apprezzabili nell'area del giacimento per nessuno dei due dataset analizzati.

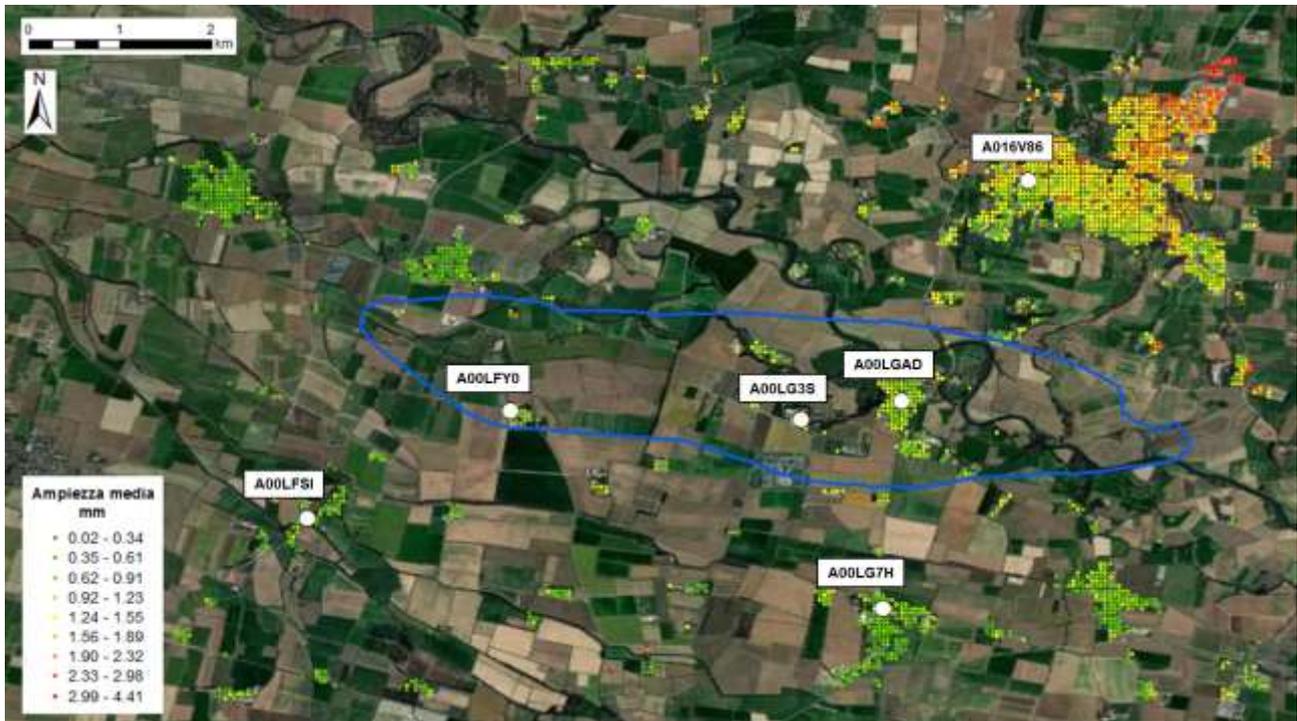


Fig. 37 Dataset integrato. Valori medi di ampiezza della stagionalità calcolati per la componente verticale dei PS Local. In figura è visualizzata anche l'ubicazione dei 6 punti scelti per l'analisi delle serie storiche rispetto alla proiezione in superficie del giacimento (si veda Cap. 3.3).

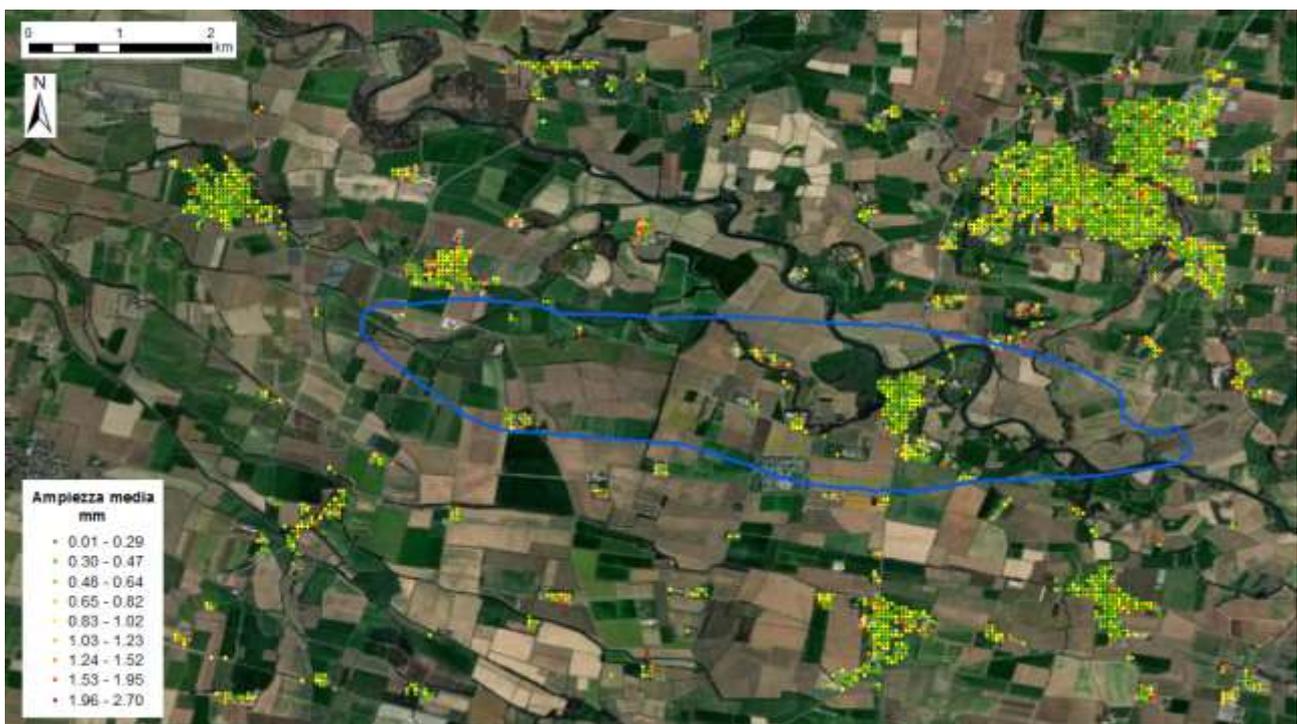


Fig. 38 Dataset integrato. Valori medi di ampiezza della stagionalità calcolati per la componente orizzontale dei PS Local; in blu la proiezione in superficie del giacimento.



Fig. 39 Dataset Sentinel. Valori medi di ampiezza della stagionalità calcolati per la componente verticale dei PS Local. In figura è visualizzata anche l'ubicazione dei 6 punti scelti per l'analisi delle serie storiche rispetto alla proiezione in superficie del giacimento (si veda Cap. 3.3).

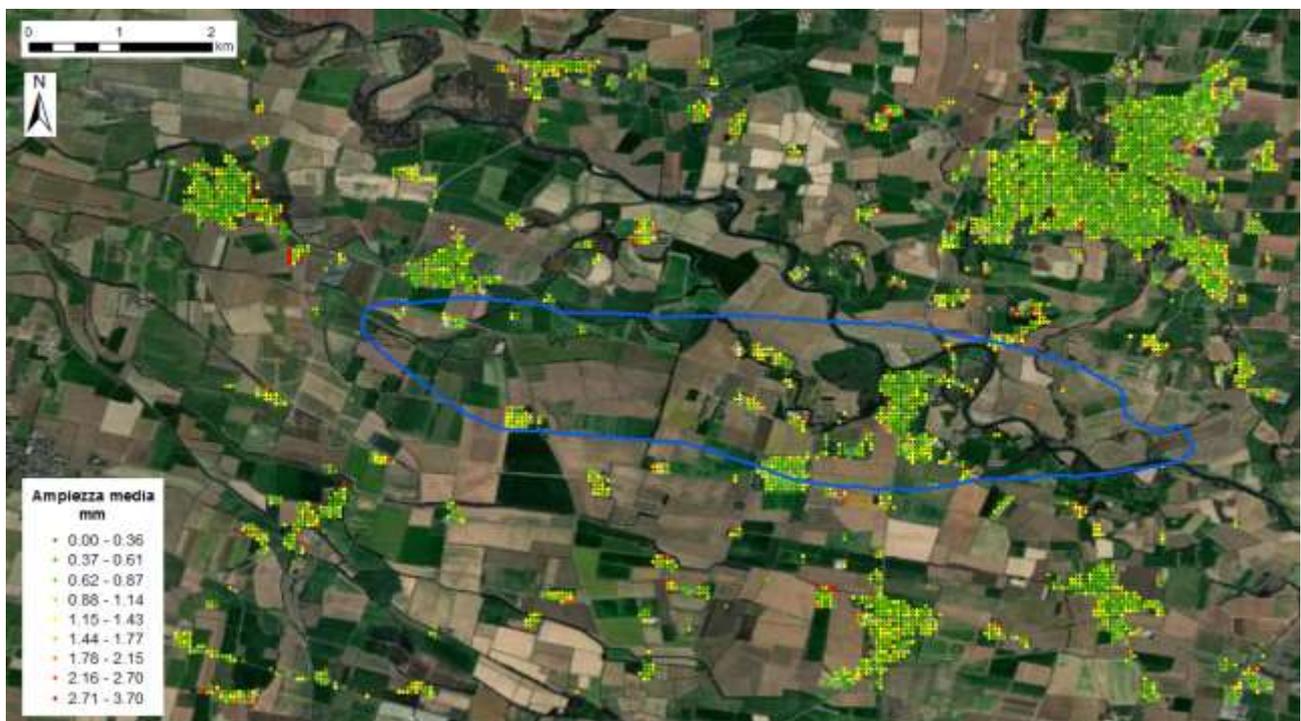


Fig. 40 Dataset Sentinel. Valori medi di ampiezza della stagionalità calcolati per la componente orizzontale dei PS Local; in blu la proiezione in superficie del giacimento.



3.3. Analisi delle serie storiche dei punti scomposti

Come già detto, nel caso specifico di Bordolano, l'analisi delle serie storiche è un elemento molto utile per la caratterizzazione dello scenario deformativo di fondo degli anni precedenti l'avvio dello stoccaggio, e permette di eseguire un confronto con la curva dei volumi movimentati nel campo nel periodo da cui si opera lo stoccaggio del gas.

Per l'analisi di correlazione con la curva del volume di gas movimentato del campo di Bordolano, sono stati selezionati 6 punti per entrambi i dataset Local, ottenuti sempre da griglia regolare con risoluzione 50x50 metri, la cui ubicazione è riportata in Fig. 37 e Fig. 39. Dei 6 punti individuati, 3 ricadono entro l'area del giacimento in corrispondenza del top strutturale, mentre gli altri 3 punti sono ubicati all'esterno del limite del giacimento.

Le serie storiche da analizzare sono state scelte sulla base degli "indici di precisione" definiti nel Par. 2.2. Sono stati scelti punti affidabili con bassi valori di deviazione standard e buona coerenza temporale, andando ad analizzare, ove possibile, PS ubicati nella stessa posizione di quelli scelti nei report precedenti. Nelle figure seguenti (da Fig. 41 a Fig. 46) è mostrato l'andamento delle serie storiche scomposte dei 6 punti scelti del dataset integrato Radarsat-Sentinel (in azzurro) e del solo dataset Sentinel (in nero), ed il relativo confronto con la curva cumulativa del volume di gas movimentato del campo di Bordolano (in rosso) ottenuta riportando, mese per mese, i volumi di gas iniettati ed erogati e calcolando la sommatoria cumulativa del bilancio dei volumi a fine mese. In questo modo è stato possibile comparare analiticamente le misure di spostamento verticale dei punti e i volumi di gas erogati o immessi nel giacimento.

In particolare, si nota come le serie storiche relative alle due tipologie di analisi si sovrappongono in termini di ampiezza e periodicità delle oscillazioni a partire dal periodo di acquisizione di Sentinel.

Punti interni

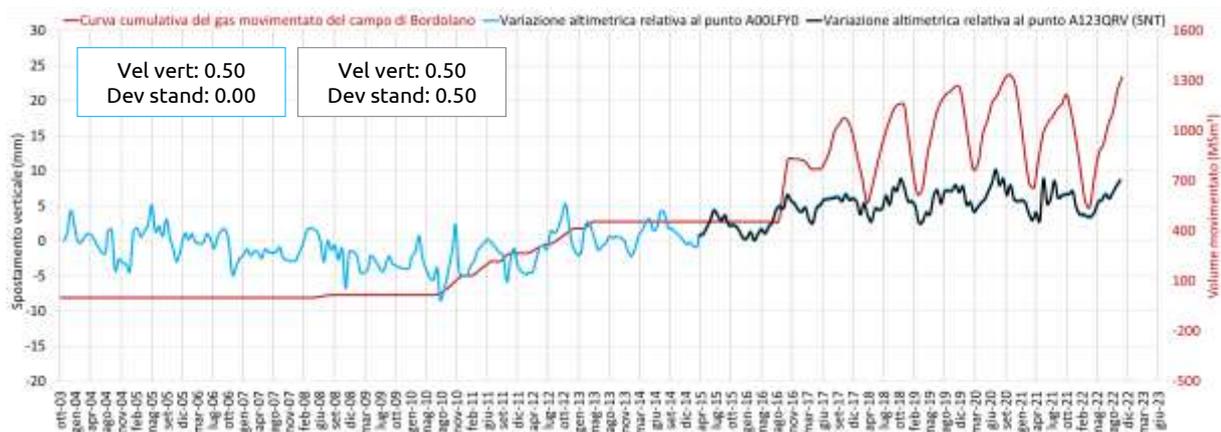


Fig. 41 Confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche dei punti scomposti A00LFY0 (Radarsat-Sentinel) e A123QRV (Sentinel), e la curva cumulativa di stoccaggio del giacimento di Bordolano.



STOGIT-GIAC

Concessione Bordolano Stoccaggio Monitoraggio dei movimenti del suolo

Anno 2022

PAG 41 DI 46

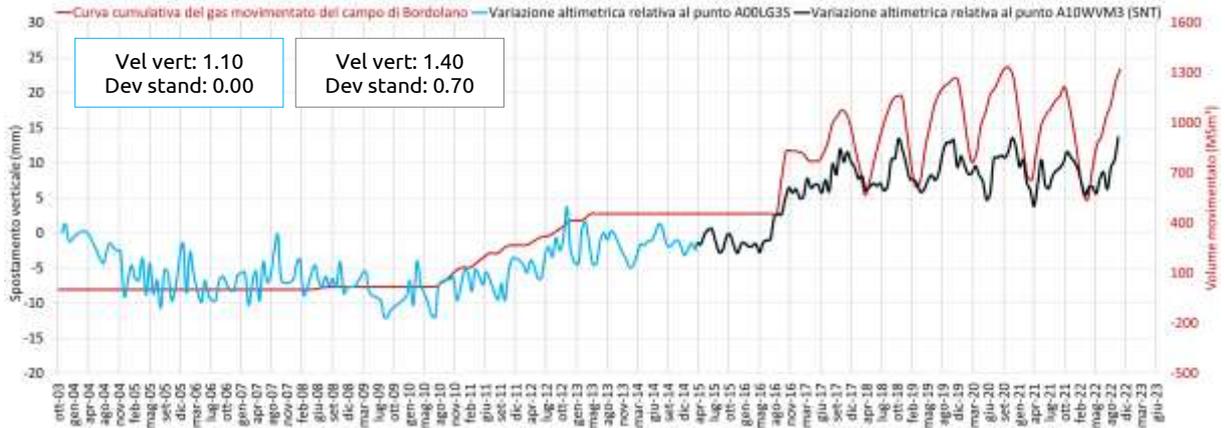


Fig. 42 Confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche dei punti scomposti A00LG3S (Radarsat-Sentinel) e A10WVM3 (Sentinel), e la curva cumulativa di stoccaggio del giacimento di Bordolano.

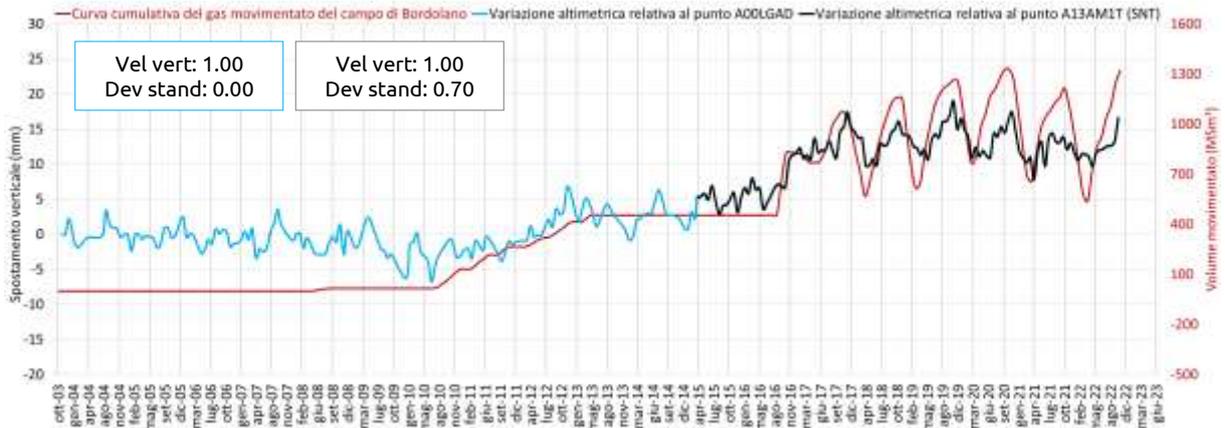


Fig. 43 Confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche dei punti scomposti A00LGAD (Radarsat-Sentinel) e A13AM1T (Sentinel), e la curva cumulativa di stoccaggio del giacimento di Bordolano.

Punti esterni



Fig. 44 Confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche dei punti scomposti A00LFSI (Radarsat-Sentinel) e A0NTC7Y (Sentinel), e la curva cumulativa di stoccaggio del giacimento di Bordolano.



STOGIT-GIAC

Concessione Bordolano Stocaggio Monitoraggio dei movimenti del suolo

Anno 2022

PAG 42 DI 46



Fig. 45 Confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche dei punti scomposti A016V86 (Radarsat-Sentinel) e A1WGUPP (Sentinel), e la curva cumulativa di stoccaggio del giacimento di Bordolano.



Fig. 46 Confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche dei punti scomposti A00LG7H (Radarsat-Sentinel) e A0BW07X (Sentinel), e la curva cumulativa di stoccaggio del giacimento di Bordolano.

I punti scelti all'interno dei limiti del giacimento mostrano una buona correlazione con la curva del gas movimentato da quando è attivo lo stoccaggio, in coerenza con quanto si osserva negli altri campi di stoccaggio gestiti da Stogit, e registrano un lieve trend di innalzamento a partire dal periodo di iniezione del cushion gas (Fig. 47 e 48). I due punti interni ubicati in corrispondenza del culmine strutturale del giacimento registrano le oscillazioni legate ai cicli di stoccaggio con ampiezze di 5-10 mm, meno evidenti per il punto interno A00LFY0/A123QRV ubicato nel settore occidentale in una zona marginale molto vicino al limite del giacimento.

I punti esterni non mostrano alcuna correlazione con le attività di stoccaggio ed evidenziano una generale stabilità (Fig. 49 e 50). Solo il punto A00LG7H/A0BW07X ubicato nell'area immediatamente a sud-est del giacimento presenta, in misura molto attenuata, un lieve trend di sollevamento a partire dal 2012-2013.

Le serie storiche dei punti evidenziano come, negli ultimi anni, il leggero trend di sollevamento cui è soggetta l'area del giacimento si stia riducendo con una tendenza alla stabilità in accordo con la graduale regimazione del campo.



Fig. 47 Dataset integrato. Confronto tra la curva cumulativa di stoccaggio e le serie storiche dei punti scelti interni.



Fig. 48 Dataset Sentinel. Confronto tra la curva cumulativa di stoccaggio e le serie storiche dei punti scelti interni.



Fig. 49 Dataset integrato. Confronto tra la curva cumulativa di stoccaggio e le serie storiche dei punti scelti esterni.



STOGIT-GIAC

Concessione Bordolano Stoccaggio Monitoraggio dei movimenti del suolo

Anno 2022

PAG 44 DI 46



Fig. 50 Dataset Sentinel. Confronto tra la curva cumulativa di stoccaggio e le serie storiche dei punti scelti esterni.



4. Conclusioni

La nuova soluzione tecnica di “stitching” con integrazione dei dataset Radarsat e Sentinel acquisiti in modalità ascendente e discendente permette la fusione delle informazioni derivanti da entrambi i dataset, mantenendo da un lato l’informazione storica che consente di estendere il monitoraggio dei giacimenti Stogit fino al 2003 (Radarsat), e aumentando dall’altro lato la frequenza temporale delle nuove acquisizioni a partire dal 2015 (Sentinel). Il dataset integrato Radarsat-Sentinel, relativo all’intero periodo di indagine, rappresenta pertanto il principale riferimento per l’analisi SAR condotta sul campo di Bordolano. Il dataset Sentinel fornisce informazioni dettagliate in merito alla storia recente dell’area (ultimi 7 anni), ossia da quando è stato avviato lo stoccaggio, non solo in termini di frequenza temporale delle acquisizioni ma anche in termini di copertura areale del dato con un aumento dei punti di misura.

Analisi Regionale

L’analisi a scala regionale evidenzia una sostanziale stabilità ed è contrassegnata da spostamenti nell’ordine di pochi mm/anno, ad eccezione dell’estremità sud-ovest dell’area di indagine, molto distante dal sito di stoccaggio di Bordolano, caratterizzata da fenomeni di subsidenza che superano i -5 mm/anno. Il valore medio di velocità verticale calcolato considerando i soli punti situati entro i limiti definiti dalla proiezione in superficie del giacimento di Bordolano risulta pari a +0.64 mm/anno, in linea con gli aggiornamenti precedenti.

Analisi Local

L’analisi a scala locale effettuata sull’area occupata dal giacimento di Bordolano evidenzia valori medi di velocità verticale di +0.42 mm/anno, confermando il trend di leggero innalzamento per i punti ubicati entro l’area del giacimento. L’osservazione delle velocità degli spostamenti orizzontali evidenzia una sostanziale stabilità dell’area, se analizzata sull’intero periodo.

Analisi delle serie storiche

I punti scelti all’interno dei limiti del giacimento mostrano una buona correlazione con la curva del gas movimentato da quando è attivo lo stoccaggio, in accordo con quanto si osserva negli altri campi di stoccaggio gestiti da Stogit, e registrano un lieve trend di innalzamento a partire dal periodo di iniezione del cushion gas. I due punti interni ubicati in corrispondenza del culmine strutturale registrano le oscillazioni legate ai cicli di stoccaggio con ampiezze di 5-10 mm, meno evidenti per il punto interno ubicato nel settore occidentale in una zona marginale e molto vicino al limite del giacimento.

Al contrario, i punti esterni non mostrano alcuna correlazione ed evidenziano una generale stabilità. Solo il punto ubicato nell’area immediatamente a sud-est del giacimento presenta, in misura molto attenuata, un leggero trend di sollevamento. Le serie storiche dei punti evidenziano come, negli ultimi anni, il leggero



STOGIT-GIAC

**Concessione Bordolano Stoccaggio
Monitoraggio dei movimenti del suolo**

Anno 2022

PAG 46 DI 46

trend di sollevamento cui è soggetta l'area del giacimento si stia riducendo con una tendenza alla stabilità in accordo con la graduale regimazione del campo. La continuità del monitoraggio nei prossimi anni fornirà maggiori indicazioni in merito all'evoluzione di questo trend.

Confronto con il dato Sentinel

Le analisi eseguite con il dato integrato Radarsat-Sentinel e con il solo dataset Sentinel, sebbene riferite a periodi temporali differenti, hanno fornito risultati coerenti sia in termini di valori di velocità media e loro distribuzione entro l'area di interesse, sia per quanto riguarda la distribuzione dell'ampiezza media della stagionalità. L'analisi evidenzia che l'effetto in superficie dello stoccaggio tende ad esaurirsi in prossimità del limite del giacimento, ad eccezione dell'area immediatamente a sud-est in cui il sollevamento legato al graduale riempimento del giacimento diminuisce gradualmente di entità fino ad esaurirsi entro una distanza di circa 1.5 km dal limite del giacimento stesso.

I risultati conseguiti risultano perfettamente in linea con quanto evidenziato nei report precedenti e confermano pertanto l'idoneità tecnica e le condizioni di sicurezza nell'esercizio del giacimento.

La Fig. 51 riassume i risultati dell'analisi SAR condotta sul campo di Bordolano.

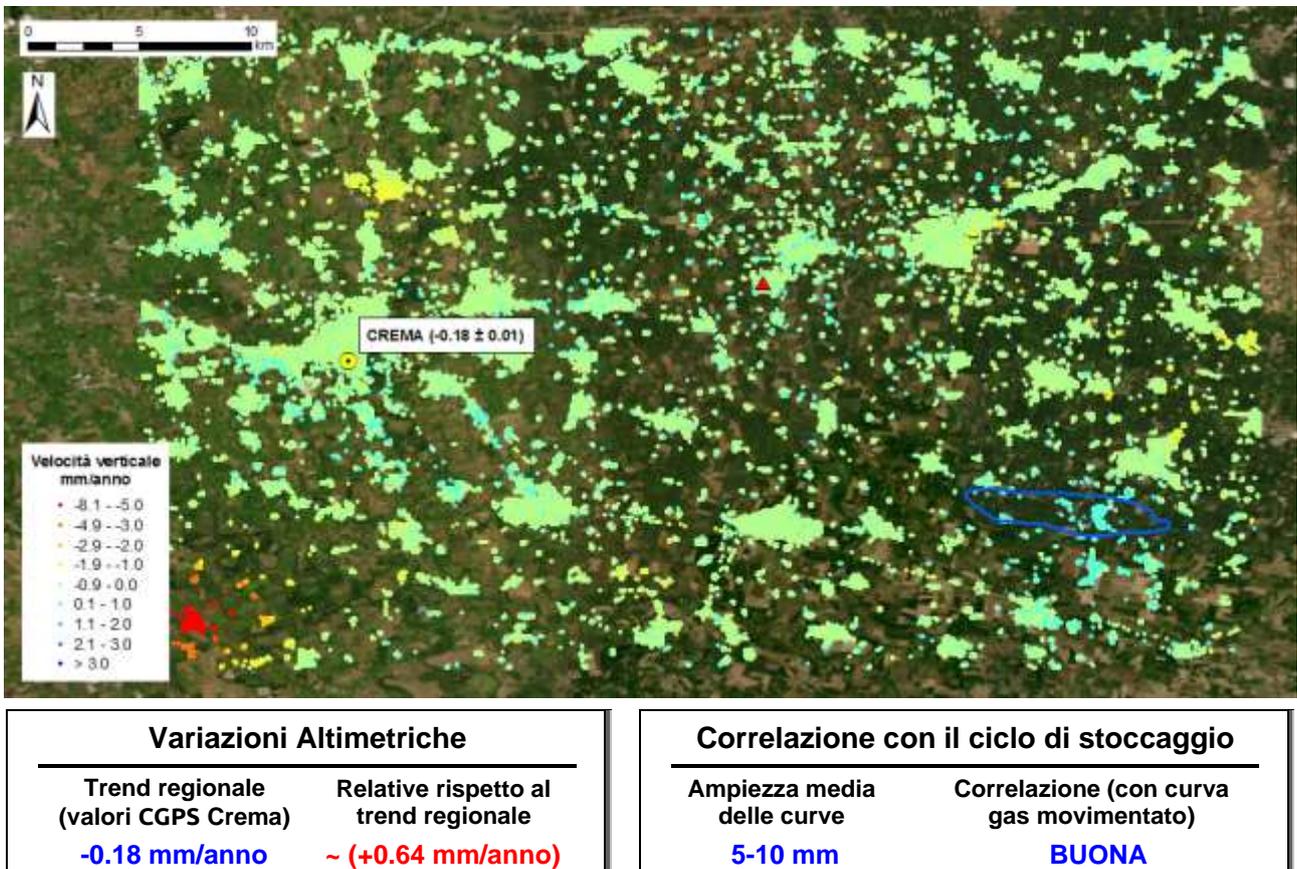


Fig. 51 In alto i dati Regional scomposti secondo il vettore verticale e calibrati, con ubicazione del CGPS di Crema, del punto di riferimento (triangolo rosso) e il limite del giacimento di Bordolano. In basso i risultati dell'analisi SAR.