

*CONCESSIONE BORDOLANO STOCCAGGIO***MONITORAGGIO DEI MOVIMENTI DEL SUOLO****(aggiornamento dati a Novembre 2016)**

	A. Guarcello	E. Cairo	C. Coti
Febbraio 2017	A. Mantegazzi		
DATA DI EMISSIONE	PREPARATO	VERIFICATO	APPROVATO

SOMMARIO

1. INTRODUZIONE.....	3
2. IL MONITORAGGIO SATELLITARE SAR.....	5
2.1 LA TECNICA PS (PSINSAR™).....	6
2.2 LA TECNICA SQUEESAR™.....	8
2.3 INDICI DI PRECISIONE.....	8
2.4 TIPOLOGIA DI ANALISI PS PROPOSTE.....	9
3. ANALISI DEL CAMPO DI BORDOLANO.....	12
3.1 CALIBRAZIONE DEL DATO REGIONAL CON GPS DI RIFERIMENTO.....	13
3.2 CALIBRAZIONE DEL DATO LOCAL CON IL DATO REGIONAL.....	20
3.3 ANALISI DELLE SERIE STORICHE DEI PUNTI SCOMPOSTI.....	27
4. CONCLUSIONI.....	37

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 deformazioni di lieve entità e limitate all'area del giacimento, monitorabili attraverso la tecnica dell'interferometria SAR. Per distinguerle da quelle naturali di sito e/o antropiche generate 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 2016 dei dati radar satellitari elaborati con Tecnica SqueeSAR™ sul campo Stogit di Bordolano. L'analisi interferometrica si è basata sull'elaborazione congiunta di immagini radar acquisite dai satelliti Radarsat-1 e Radarsat-2 nel periodo Ottobre 2003 – Novembre 2016, sia in geometria ascendente che discendente.

Durante il periodo monitorato il campo non era attivo allo stoccaggio. Tra il 2008 ed il 2013 è stata completata la ricostituzione del cushion gas, per un volume totale iniettato di 455 Msm³. Nel corso del 2016 sono stati eseguiti alcuni test di iniezione ed erogazione mirati alla verifica del corretto funzionamento degli impianti.

Per la calibrazione in termini assoluti del dato SAR è stato utilizzato il CGPS pubblico di Crema (Rete SPINN GNSS) riattivato a partire dal 1 luglio 2015. L'analisi evidenzia una velocità verticale media entro i limiti definiti dalla proiezione in superficie del giacimento pari a -0.18 mm/anno, coerente con quanto evidenziato dal CGPS di Crema (-0.24 mm/anno), ed in accordo con quanto rilevato nei report degli anni precedenti, evidenziando una sostanziale stabilità nell'area occupata dal giacimento. Le serie storiche dei punti selezionati all'interno dei limiti del giacimento non presentano alcuna correlazione con la curva di iniezione, e mostrano una sostanziale stabilità per l'intero periodo monitorato con oscillazioni di ampiezza contenuta entro 5 mm. Le serie storiche dei punti selezionati all'esterno dei limiti del campo evidenziano anch'esse una sostanziale stabilità, eccetto i punti a nord del campo, che presentano un lieve trend di abbassamento iniziato nel 2011. Lo specchio seguente riassume i risultati dell'analisi SAR condotta sul campo di Bordolano.

Variazioni Altimetriche +/- (mm/anno)

**Trend regionale
(valori CGPS Crema)**

- 0.24 mm/a

**Relative rispetto al
trend regionale**

~ (- 0.18 mm/a)

**Correlazione con la curva
di iniezione del campo**

**Ampiezza media
delle curve**

< 5 mm

**Correlazione (con curva
iniezione del campo)**

ASSENTE

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. Il software utilizzato nel corso delle ultime analisi presenta una innovativa procedura di stima e rimozione delle componenti atmosferiche: in precedenza potevano infatti essere sottostimati 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 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-W.

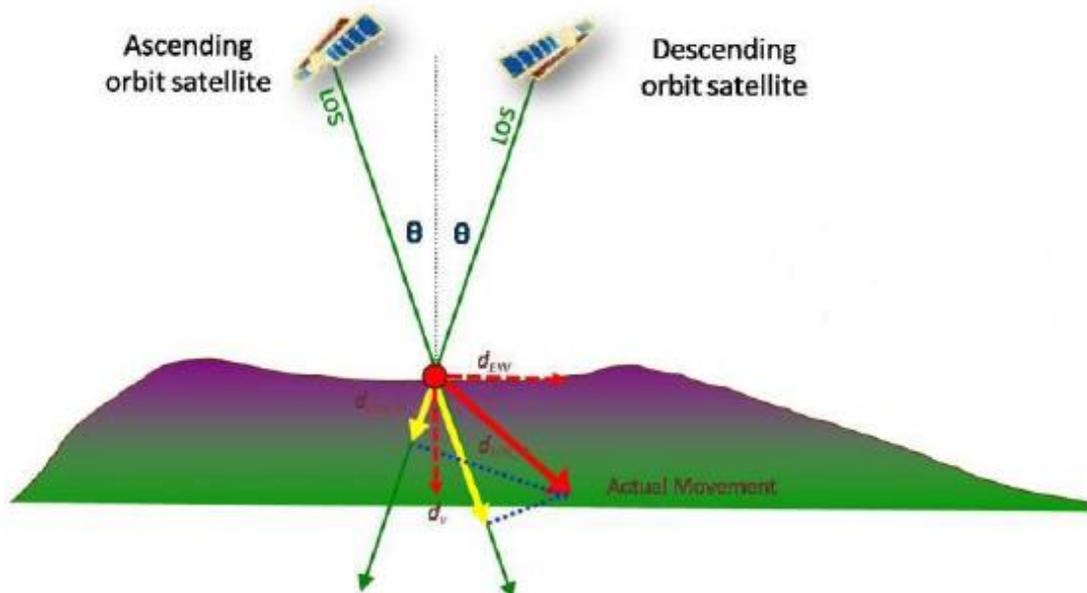


Fig. 1 – Scomposizione del moto dalle LOS ascendente e discendente alle componenti orizzontale est-ovest e verticale.

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 satelliti Radarsat-1 e Radarsat-2 dell’Agenzia Spaziale Canadese, che acquisiscono un’immagine ogni 24 giorni, mettendo a disposizione per l’analisi circa 14-15 immagini ogni anno per ciascuna geometria di acquisizione (ascendente e discendente).

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. Entrambi i satelliti lavorano in banda C, ma con lunghezza d’onda del segnale radar lievemente differente, tale da impedire l’utilizzo simultaneo di immagini acquisite da questi due satelliti nelle applicazioni interferometriche standard. A tal proposito, l’algoritmo SqueeSAR™ è stato implementato con la possibilità di effettuare elaborazioni congiunte (*stitching*) di dati acquisiti da satelliti diversi. I test effettuati hanno stimato un intervallo minimo di sovrapposizione temporale tra i due dataset (almeno 8 immagini), anche se l’elemento più importante per garantirne la qualità è rappresentato dal numero più elevato possibile di immagini a disposizione per ciascuno dei due dataset.

2.1 La Tecnica PS (PSInSAR™)

L’algoritmo di elaborazione di dati radar satellitari per l’individuazione e la stima dei moti di diffusori permanenti, denominato comunemente “Tecnica PS”, è stato brevettato in Italia nel 1999 (Brevetto

Italiano N. MI99A001154). La tecnica PSInSAR™ è uno strumento dalle caratteristiche uniche per l'analisi di deformazioni superficiali come fenomeni di subsidenza/uplift, frane, faglie sismiche e per la misurazione di spostamenti di singoli edifici.

Il punto di partenza per poter applicare la tecnica PSInSAR™ è 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 (Permanent 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.

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 deformazione (ovvero l'interpolazione lineare dello spostamento misurato nell'intero periodo di monitoraggio) e l'intera serie temporale di deformazione, 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), rispetto al quale sono riferite tutte le stime di movimento dei PS: le misure SAR sono pertanto sempre di tipo relativo. Negli ultimi anni è stata ulteriormente sviluppata la procedura per la selezione del PS di riferimento in fase di elaborazione, consentendo all'operatore di valutare più opzioni e scegliere così quella più consona all'applicazione.

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 di misura 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 Tecnica PS nell'ambito dei monitoraggi (Fig. 2). Le peculiarità della Tecnica PS, 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 complementarietà del suo utilizzo con tecniche ormai consolidate quali la livellazione geometrica e le misurazioni GPS.

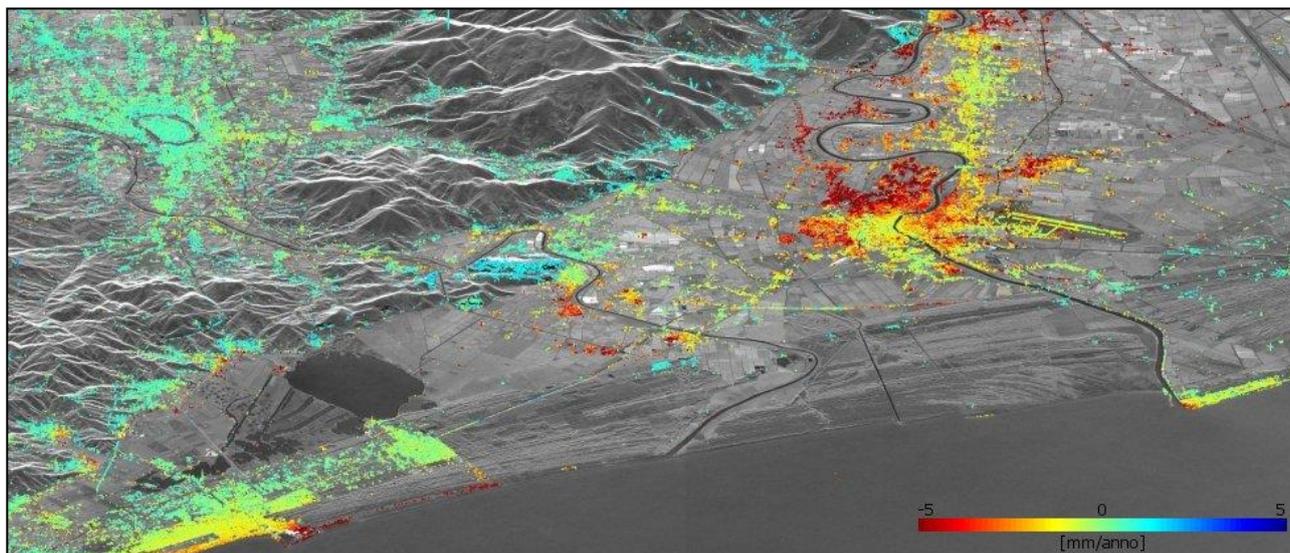


Fig. 2 – Esempi di subsidenza nell’area di Pisa. I punti colorati indicano le posizioni dei PS, ed il loro colore indica la velocità media di spostamento lungo la LOS misurata.

2.2 La Tecnica SqueeSAR™

La tecnica SqueeSAR™ rappresenta l’evoluzione della tecnica PSInSAR™. Tale tecnica 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. Scopo della tecnica SqueeSAR™ 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 PSInSAR™.

2.3 Indici di precisione

Le analisi PSInSAR™ e SqueeSAR™ 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/DS rispetto al punto di riferimento e dipende da diversi fattori, quali la distanza fisica tra il PS/DS 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).

2.4 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/DS è possibile ricavare il tasso di deformazione 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 Analisi Local

Le analisi svolte sul campo di Bordolano sono di due tipologie:

- *Analisi Local*, effettuata su un'area di dimensioni paragonabili a quella della Concessione di Stoccaggio, con griglia di campionamento di dimensioni 50x50 m.

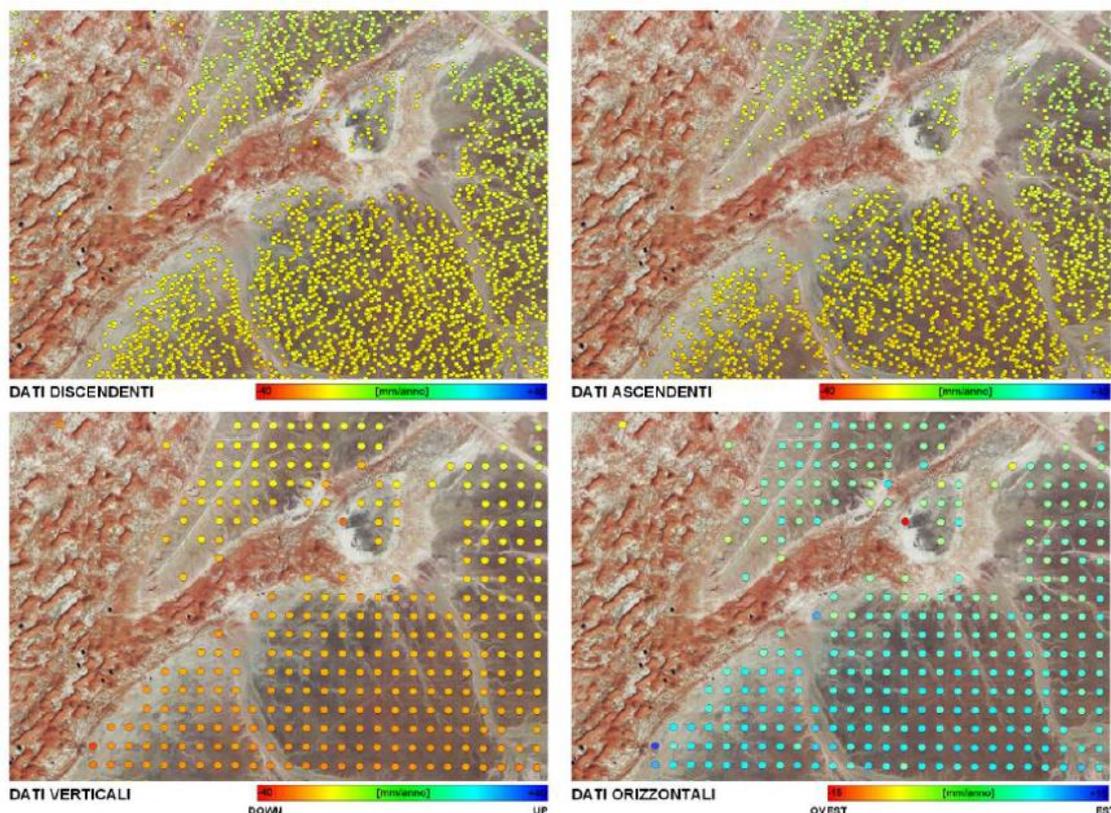


Fig. 3 – Trasformazione dei dati di spostamento dei PS/DS su griglia regolare. In alto i risultati ottenuti dai PS/DS, in basso gli stessi ricampionati su griglia regolare per la scomposizione del moto.

- *Analisi Regional*: effettuata su un'area molto più estesa che racchiude più Concessioni di Stoccaggio (Sergnano, Ripalta e Bordolano), con una griglia di campionamento di 100x100 m e per la quale è disponibile un GPS pubblico di riferimento grazie al quale è possibile calibrare in termini assoluti il dato SAR (GPS di Crema).

Le due tipologie di analisi, che originariamente distinguevano due diversi tipi di elaborazione, attualmente, grazie allo sviluppo del software di elaborazione, differiscono solo per l'estensione dell'area indagata e, in alcuni casi, per la posizione del punto di riferimento. In particolare, l'analisi Local è caratterizzata da elaborazioni aggiuntive di maggior dettaglio.

Calibrazione del dato SAR in termini assoluti

I valori ottenuti per ogni singolo PS/DS sono di tipo differenziale e vengono riferiti ad un punto di riferimento, selezionato in fase di processing fra quelli che evidenziano una maggiore stabilità nel tempo (PS/DS ad elevata coerenza di fase) ed al quale viene assegnata una velocità pari a zero. I valori di velocità forniti da tale tecnica sono pertanto relativi e non possono essere utilizzati come valori assoluti, ma possono essere integrati con dati provenienti da reti di stazioni GPS in continuo, che permettono di ottenere informazioni sulle tre componenti degli spostamenti assoluti rilevati in corrispondenza delle stazioni riceventi.

I dati delle analisi Regional vengono calibrati in termini assoluti utilizzando stazioni GPS pubbliche ubicate in aree esterne alla proiezione in superficie del limite del giacimento, considerate stabili e non influenzate dall'attività di stoccaggio (nel caso di Bordolano si utilizza il GPS di Crema). Una volta calibrato il dato Regional, è così possibile calibrare in termini assoluti anche i dati delle singole analisi Local contenute al suo interno.

Non sempre è però disponibile un GPS pubblico esterno per la calibrazione: in questi casi viene eseguita esclusivamente un'analisi Local e non è possibile effettuare la calibrazione in termini assoluti.

Analisi delle serie storiche

La sola analisi dei valori di velocità media non consente di rilevare la presenza di eventuali fenomeni di deformazione non lineari, che possono invece essere 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 attraverso la variazione altimetrica registrata da ogni singola immagine radar acquisita. Così, oltre alle variazioni altimetriche relative di quel punto rispetto al punto di riferimento, è possibile ottenere gli spostamenti mensili di quel determinato punto nell'intero periodo considerato.

Per individuare eventuali correlazioni tra le deformazioni del suolo e l'attività di stoccaggio, viene pertanto 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.

Per quanto riguarda il giacimento di Bordolano, che nel periodo monitorato non era ancora attivo allo stoccaggio del gas, il confronto è stato eseguito con la curva di iniezione del cushion gas, la cui ricostituzione è avvenuta tra il 2008 ed il 2013, e con i volumi movimentati nel 2016 per la verifica del corretto funzionamento degli impianti.

Ampiezza media della stagionalità

Al fine di evidenziare più facilmente la presenza di deformazioni cicliche riconducibili all'attività di stoccaggio, per ogni punto di misura individuato nelle analisi delle singole geometrie, così come per i dati scomposti, è fornito anche il valore di ampiezza media della stagionalità, calcolato sull'intera serie storica di deformazione.

Tale valore fornisce solo un'indicazione dell'ampiezza media nell'intero periodo considerato, pertanto consente solo di individuare i PS che presentano un'evidente oscillazione stagionale, in genere concentrati entro i limiti definiti dalla proiezione in superficie del giacimento.

Informazioni dettagliate sull'andamento delle deformazioni si possono ricavare esclusivamente dall'analisi delle singole serie storiche di deformazione.

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 ed un'analisi SqueeSAR™ di tipo Regional di circa 900 km² estesa ad un'area comprendente al suo interno le singole analisi Local di Ripalta, Sergnano e Bordolano (fig. 4).

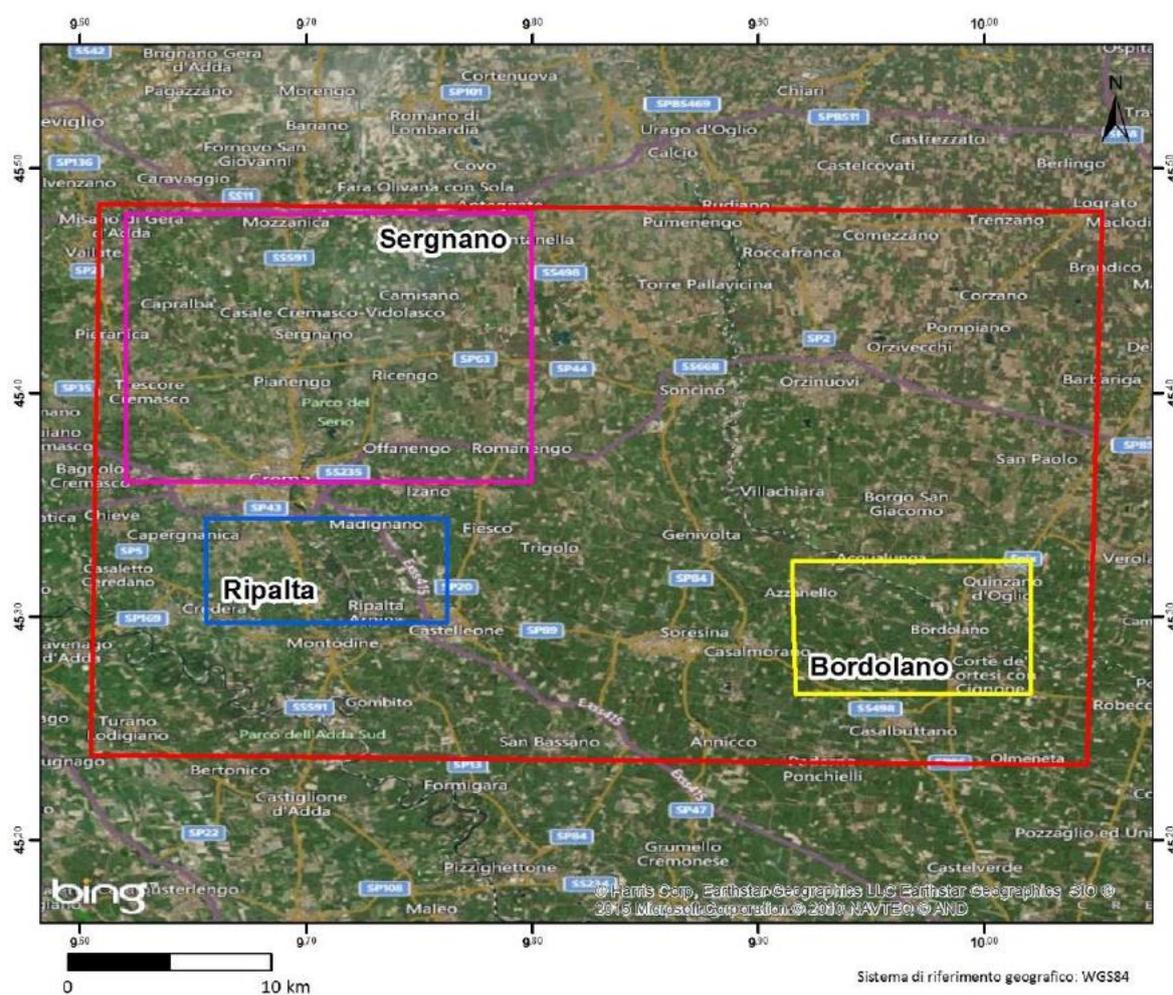


Fig. 4 – Estensione dell'area Regional di Crema rispetto alle tre aree Local di Ripalta, Sergnano e Bordolano.

L'analisi ha previsto l'elaborazione di due dataset di immagini acquisite dai satelliti Radarsat-1 e Radarsat-2, sia in geometria ascendente che discendente, nel periodo compreso tra Ottobre 2003 e Novembre 2016. In particolare, per l'elaborazione ascendente sono state processate le immagini Radarsat-1 disponibili fino alla dismissione del satellite (ultima immagine ascendente 26/03/2013) insieme ad ulteriori 55 immagini Radarsat-2, di cui 10 si sovrappongono al dataset Radarsat-1. Per l'elaborazione discendente sono state processate le immagini Radarsat-1 disponibili fino alla

dismissione del satellite (ultima immagine discendente 06/03/2013) insieme ad ulteriori 61 immagini Radarsat-2, di cui 10 si sovrappongono al dataset Radarsat-1.

L'ultima immagine disponibile in geometria ascendente è risultata quella del 24 ottobre 2016, mentre per la geometria discendente l'ultima immagine è stata acquisita il 28 ottobre 2016.

In Tabella 1 sono riportati i dettagli dei due dataset, con il numero totale di immagini elaborate.

	Geometria	Track Radarsat1/2	N° immagini	Periodo
Dataset 1	Ascendente	T147/66	178	09/10/2003-24/10/2016
Dataset 2	Discendente	T197/116	181	13/10/2003-28/10/2016

Tab. 1 – Dataset elaborati per il presente aggiornamento.

Allo scopo di studiare eventuali fenomeni di subsidenza/uplift correlabili all'attività di stoccaggio, durante l'analisi dei dati è stata analizzata soltanto la componente verticale della velocità dei PS.

3.1 Calibrazione del dato Regional con GPS di riferimento

Nella prima fase del lavoro, i valori di velocità verticale dei PS Regional sono stati calibrati con i valori di velocità verticale assoluti di una stazione CGPS pubblica di riferimento, esterna all'area del giacimento e sicuramente non influenzata dall'attività di stoccaggio.

A tale scopo, venivano acquistati da ERSAF (Ente Regionale per i Servizi all'Agricoltura e Foreste della Regione Lombardia) i dati relativi a due stazioni GNSS appartenenti alla rete presente sul territorio regionale lombardo, situate in prossimità di edifici pubblici nei centri urbani di Milano e Crema (CR). Tali stazioni 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.

Il GPS di Crema, utilizzato in questa relazione per la calibrazione del dato Regional, è installato con una monumentazione a palo presso il tetto dell'Istituto per Geometri "Pacioli", situato nella zona sud di Crema (Fig. 5-6). Di tale CGPS sono stati stimati i movimenti di lungo periodo, dal 14/05/2005 al 31/10/2016, ed i dati sono stati analizzati nell'ambito di una rete di riferimento costituita da 9 stazioni IGS/EPN.

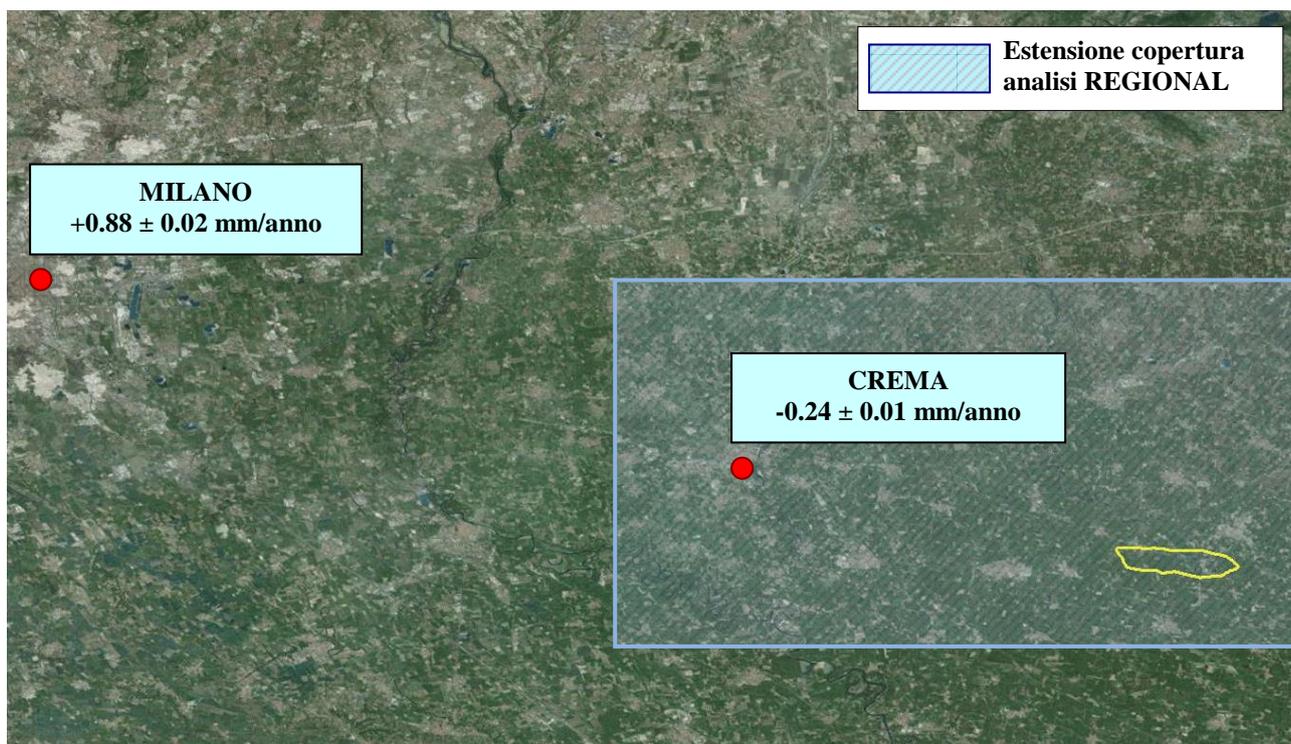


Fig. 5 – Ubicazione GPS Milano e Crema. Il rettangolo azzurro evidenzia l'estensione dell'analisi Regional che interessa il campo di Bordolano ed il GPS di Crema, i cui valori sono stati utilizzati per la calibrazione.

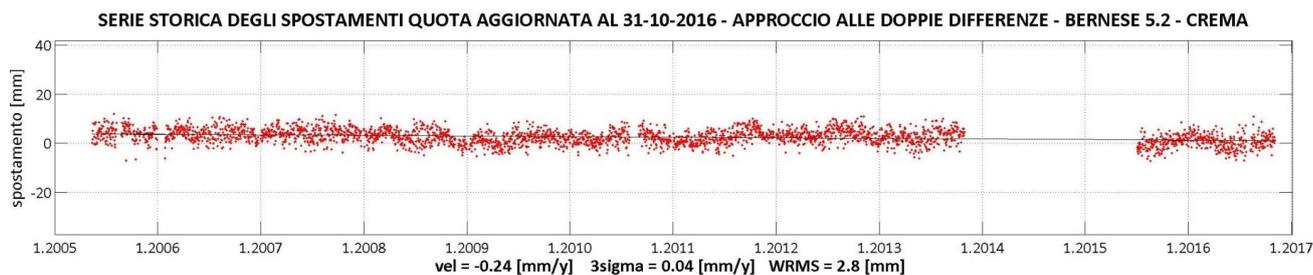


Fig. 6 – Ubicazione GPS di Crema, particolare dell'antenna e stima di velocità della componente verticale.

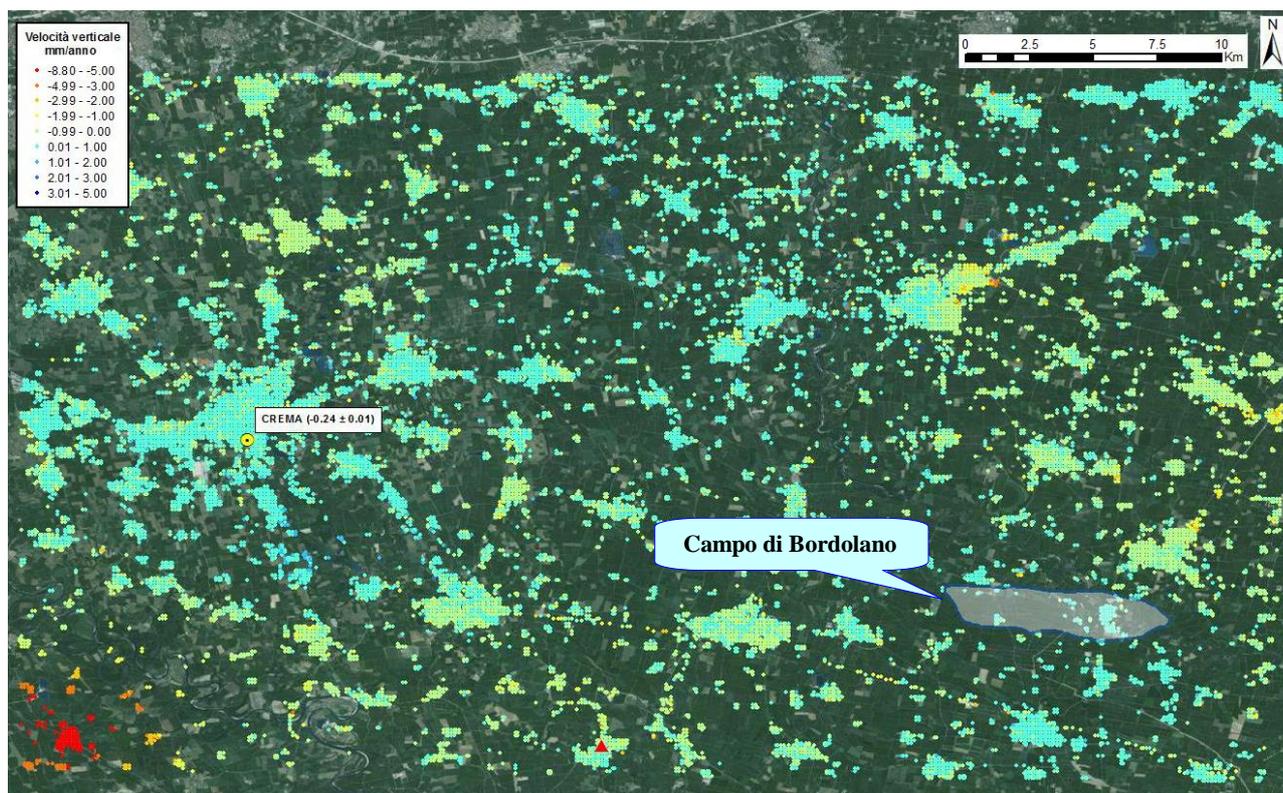


Fig. 7 – Dati dell’analisi Regional in scala di colori. I valori si riferiscono al solo vettore verticale risultato dalla scomposizione dei dati originali. Il triangolo rosso indica la posizione del punto di riferimento utilizzato per la scomposizione ed in giallo il GPS di Crema utilizzato per la calibrazione del dataset.

Il valore medio di velocità verticale dei PS Regional ricadenti in un’area avente raggio di circa 500 m nell’intorno del CGPS di Crema è pari a +0.28 mm/anno (fig. 8).

Considerato che il CGPS di Crema misura un valore medio di velocità assoluta di -0.24 mm/a nella componente verticale, la correzione da apportare ai valori scomposti Regional per riportarli al piano assoluto rilevato dal CGPS risulta essere di -0.52 mm/a. Tale metodologia, già elaborata nelle precedenti relazioni (eccetto per l’anno 2014, a causa della temporanea dismissione del CGPS di Crema), consente di calibrare il dato Regional (originariamente relativo al punto di riferimento utilizzato per la scomposizione) riportandolo ad un piano assoluto.

L’intera area di indagine Regional presenta una sostanziale stabilità, ad eccezione dell’estremità SW, caratterizzata da fenomeni di subsidenza che superano i -5 mm/anno. In corrispondenza dei giacimenti di Sergnano e Ripalta sono presenti i tipici fenomeni deformativi ciclici legati allo stoccaggio del gas naturale, ma tale ciclicità risulta assente in corrispondenza del giacimento di Bordolano, non ancora attivo allo stoccaggio nel periodo monitorato (fig. 12).

A nord di Bordolano è inoltre presente un’estesa area caratterizzata da un fenomeno deformativo a carattere stagionale nella componente verticale, che potrebbe essere connesso al prelievo di acqua dal sottosuolo e sicuramente non riconducibile all’attività di stoccaggio.



Fig. 8 – In giallo i punti dell’analisi Regional scomposti secondo il vettore verticale nell’immediato intorno del CGPS di Crema, con i relativi valori originali arrotondati ad una cifra decimale.



Fig. 9 – Dati Regional scomposti: in giallo i valori originali ed in rosa quelli corretti di -0.52 mm/anno, entrambi con arrotondamento ad una cifra decimale.

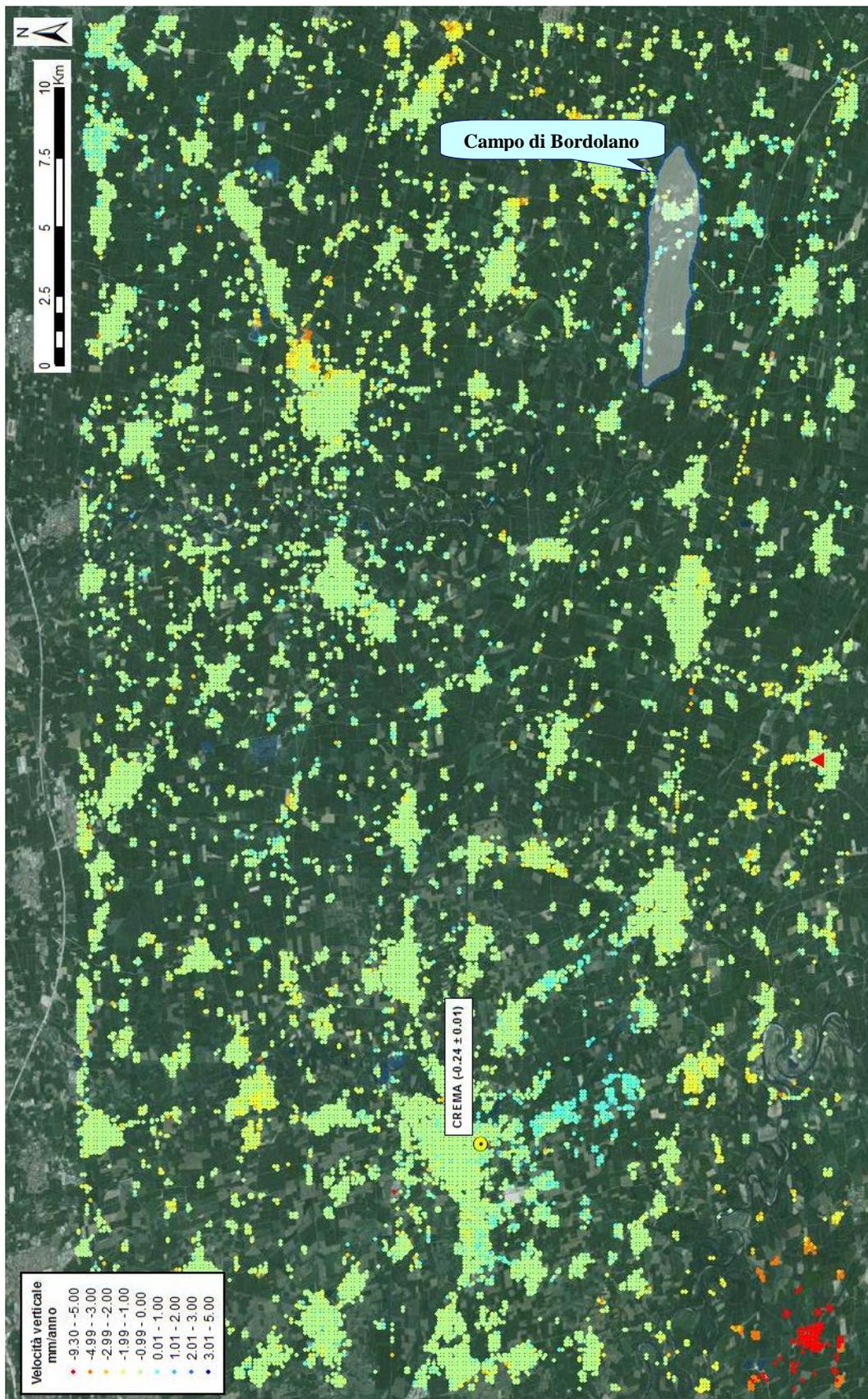


Fig. 10 – Dati Regional scomposti secondo il vettore verticale e calibrati. In evidenza l'ubicazione del CGPS di Crema utilizzato per la calibrazione, il punto di riferimento (triangolo rosso) ed i limiti del giacimento.

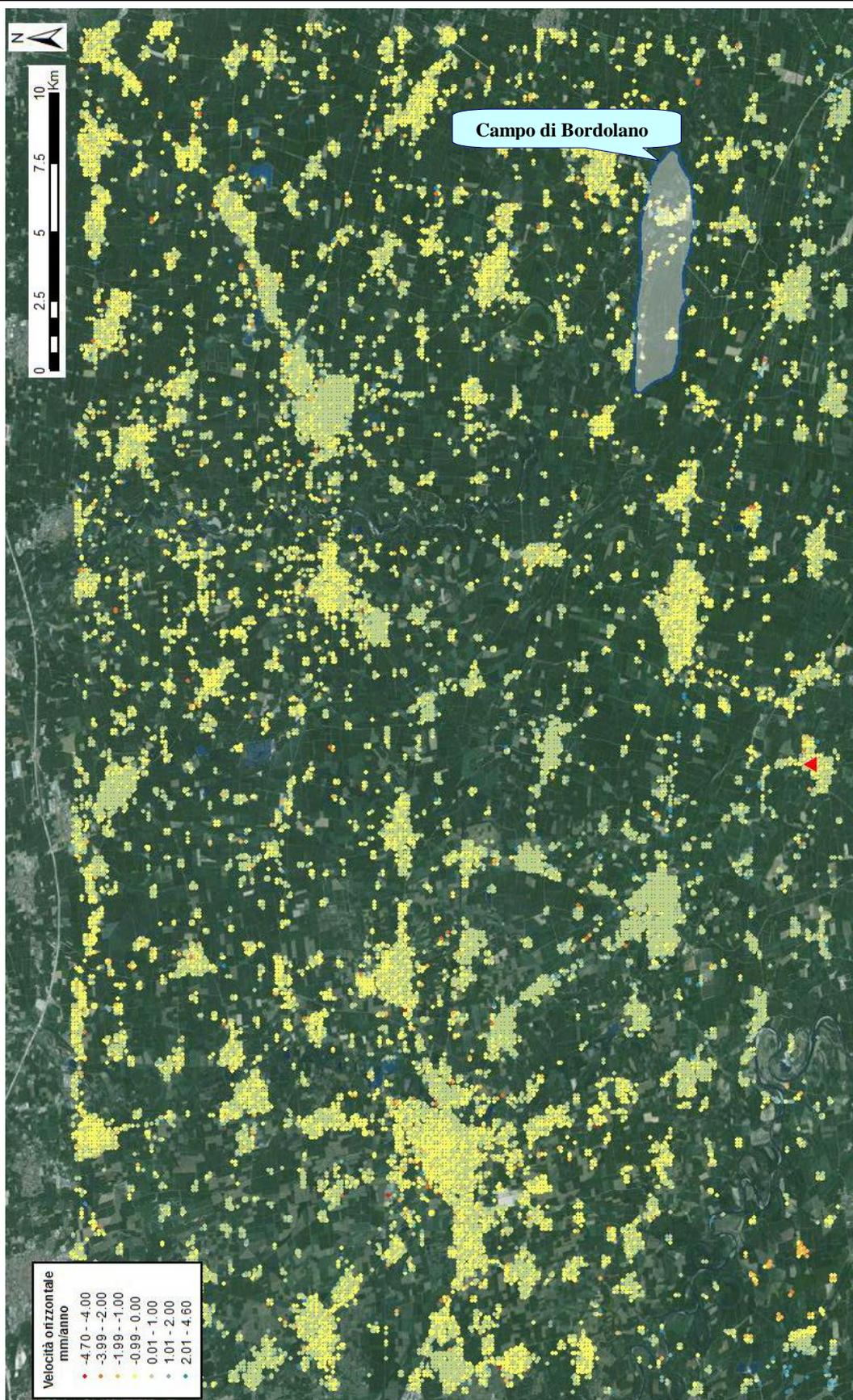


Fig. 11 – Dettaglio dei valori di velocità orizzontali dei punti scomposti del rilievo Regional, il triangolo rosso indica il punto di riferimento.

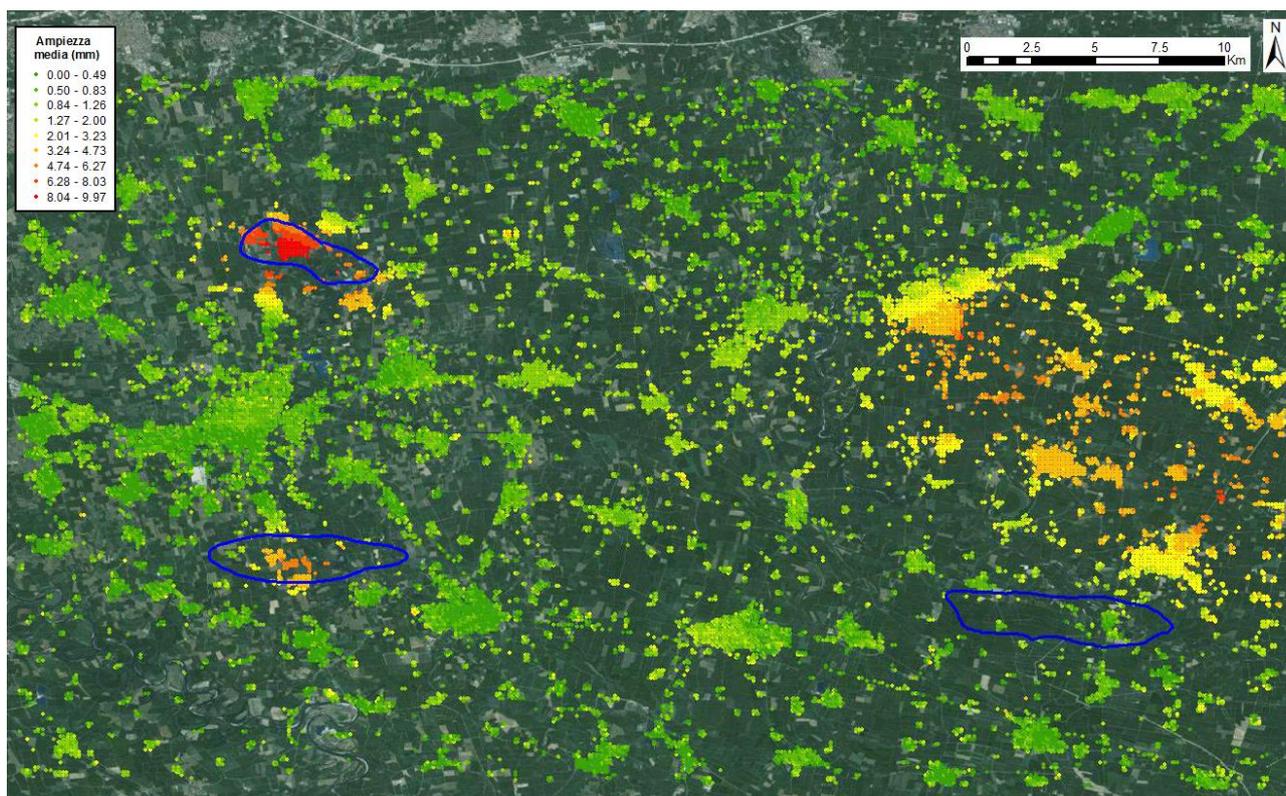
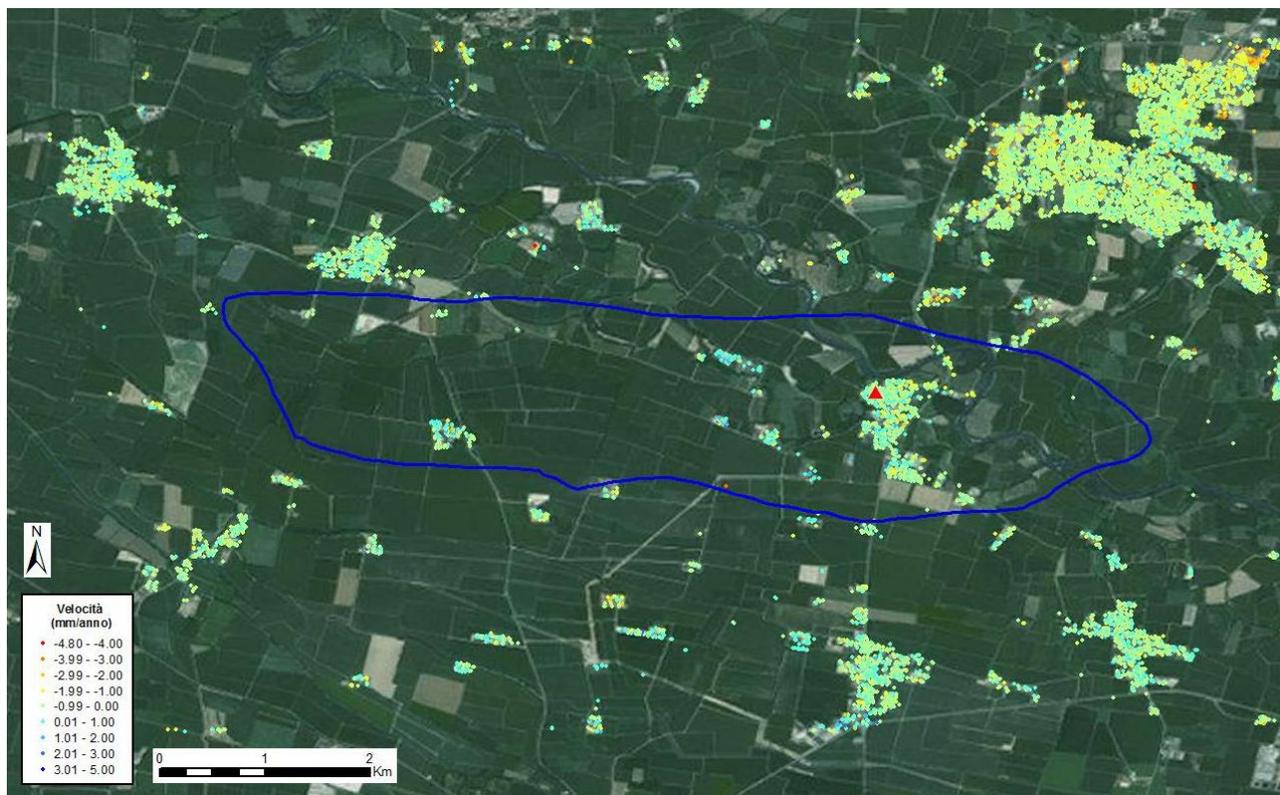


Fig. 12 – Dettaglio dei valori di ampiezza media della stagionalità per la componente verticale del rilievo Regional ed in blu le proiezioni in superficie dei giacimenti di Sergnano (a NW), Ripalta (a SW) e Bordolano (a SE).

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, ha permesso di evidenziare le variazioni altimetriche medie dell’area del giacimento rispetto al trend regionale individuato dalla stazione GPS.

L’analisi evidenzia una velocità verticale media all’interno dei limiti del giacimento di Bordolano pari a -0.18 mm/anno, coerente con quanto evidenziato dal CGPS di Crema. Il dato risulta in accordo con quanto rilevato nei report degli anni precedenti, confermando la sostanziale stabilità dell’area occupata dal giacimento di Bordolano, non ancora attivo allo stoccaggio del gas durante il periodo monitorato.

3.2 Calibrazione del dato Local con il dato Regional



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 :	33.72°	δ :	11.54°		
Line of sight versors	V:	0.832	N:	-0.111	E:	-0.544

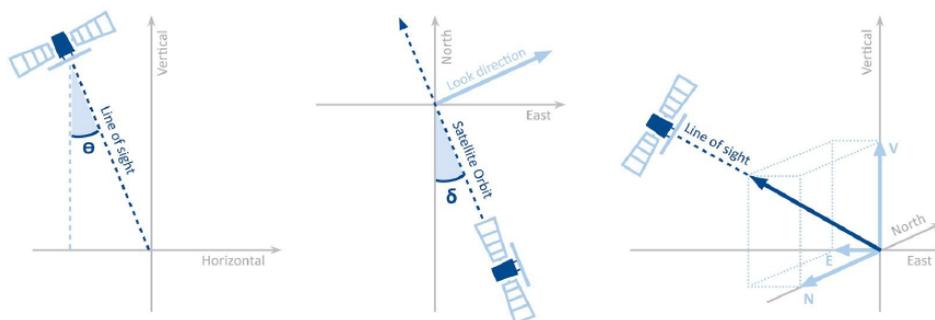
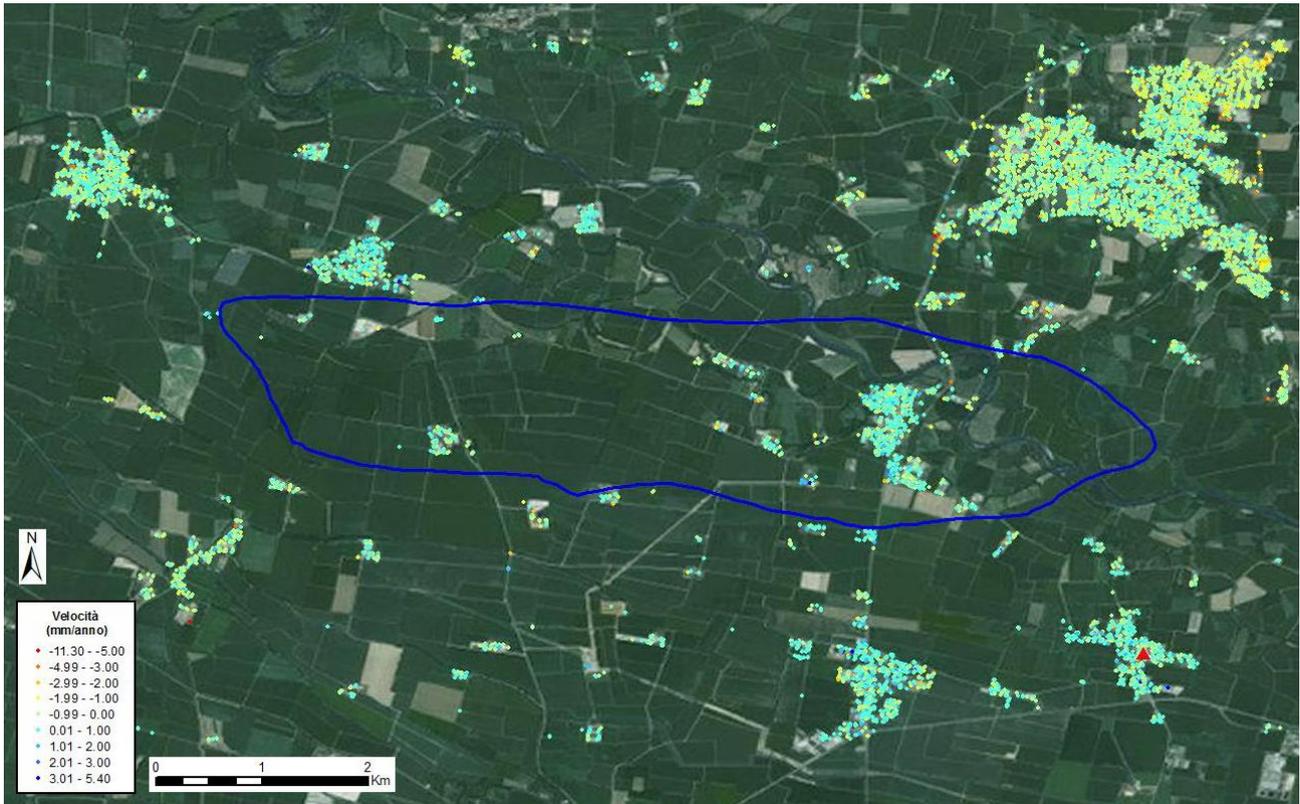


Fig. 13 – Visualizzazione in scala di colori delle velocità dell'analisi Local per i PS riconosciuti in modalità ascendente. Sotto, i parametri dell'acquisizione e la rappresentazione grafica della configurazione utilizzata.



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 : 32.41°	δ : 10.55°		
Line of sight versors	V: 0.844	N: -0.098	E: 0.527	

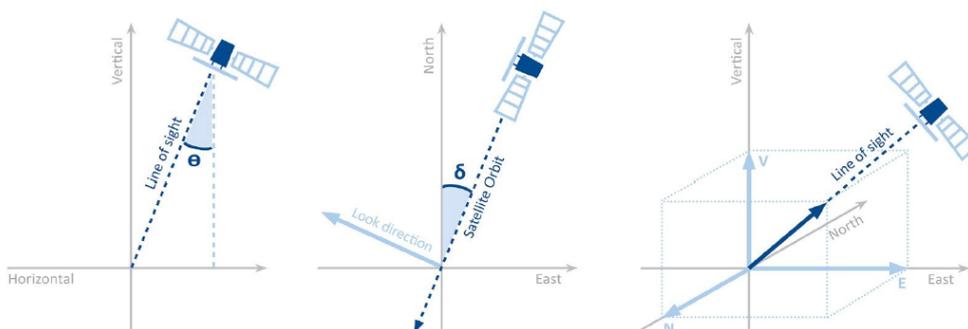


Fig. 14 – Visualizzazione in scala di colori delle velocità del rilievo Local per i PS riconosciuti in modalità discendente. Sotto, i parametri dell'acquisizione e la rappresentazione grafica della configurazione utilizzata.

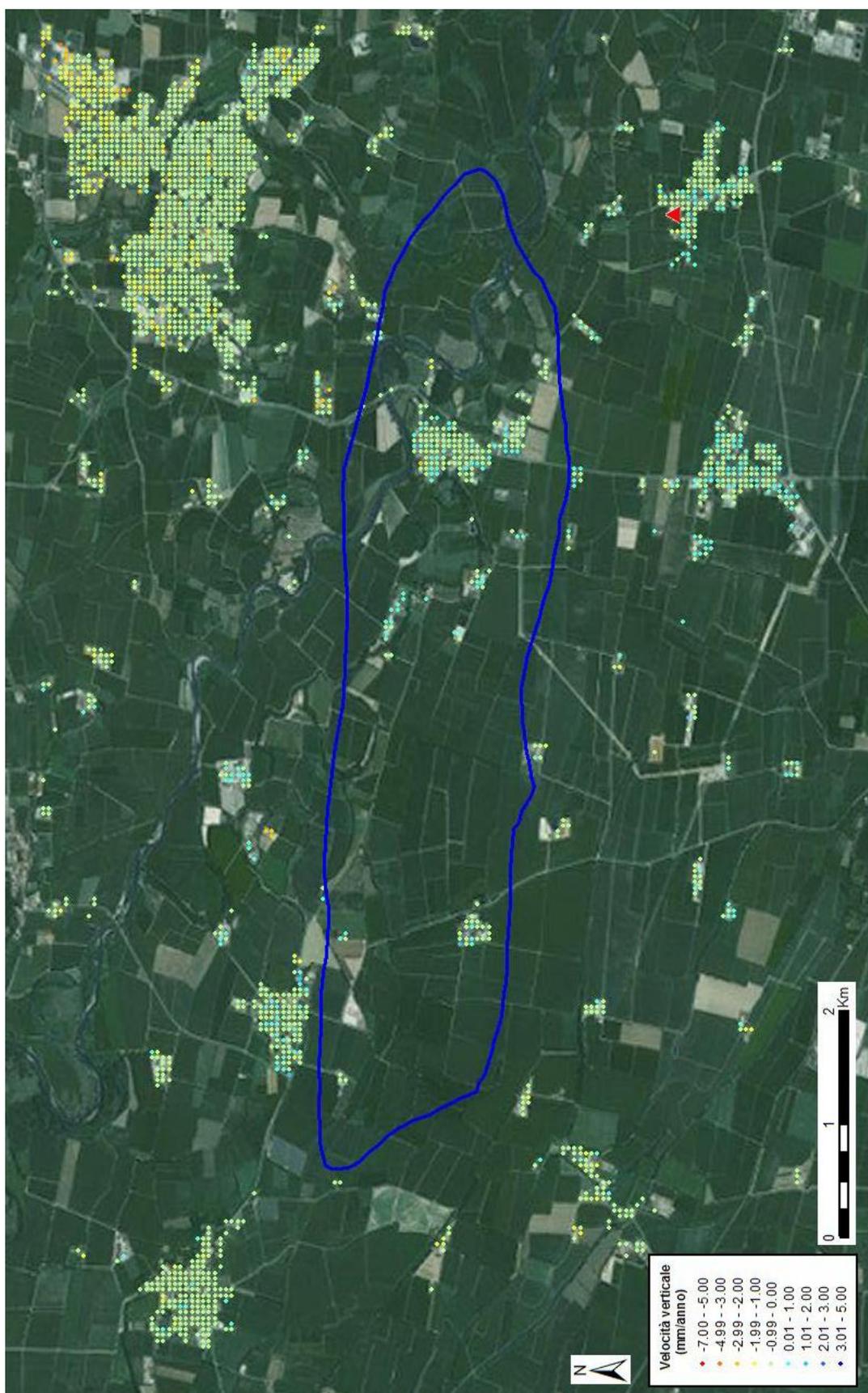


Fig. 15 – Visualizzazione in scala di colori delle velocità verticali dei punti scomposti dell’analisi Local, così come registrati dal satellite prima della calibrazione.

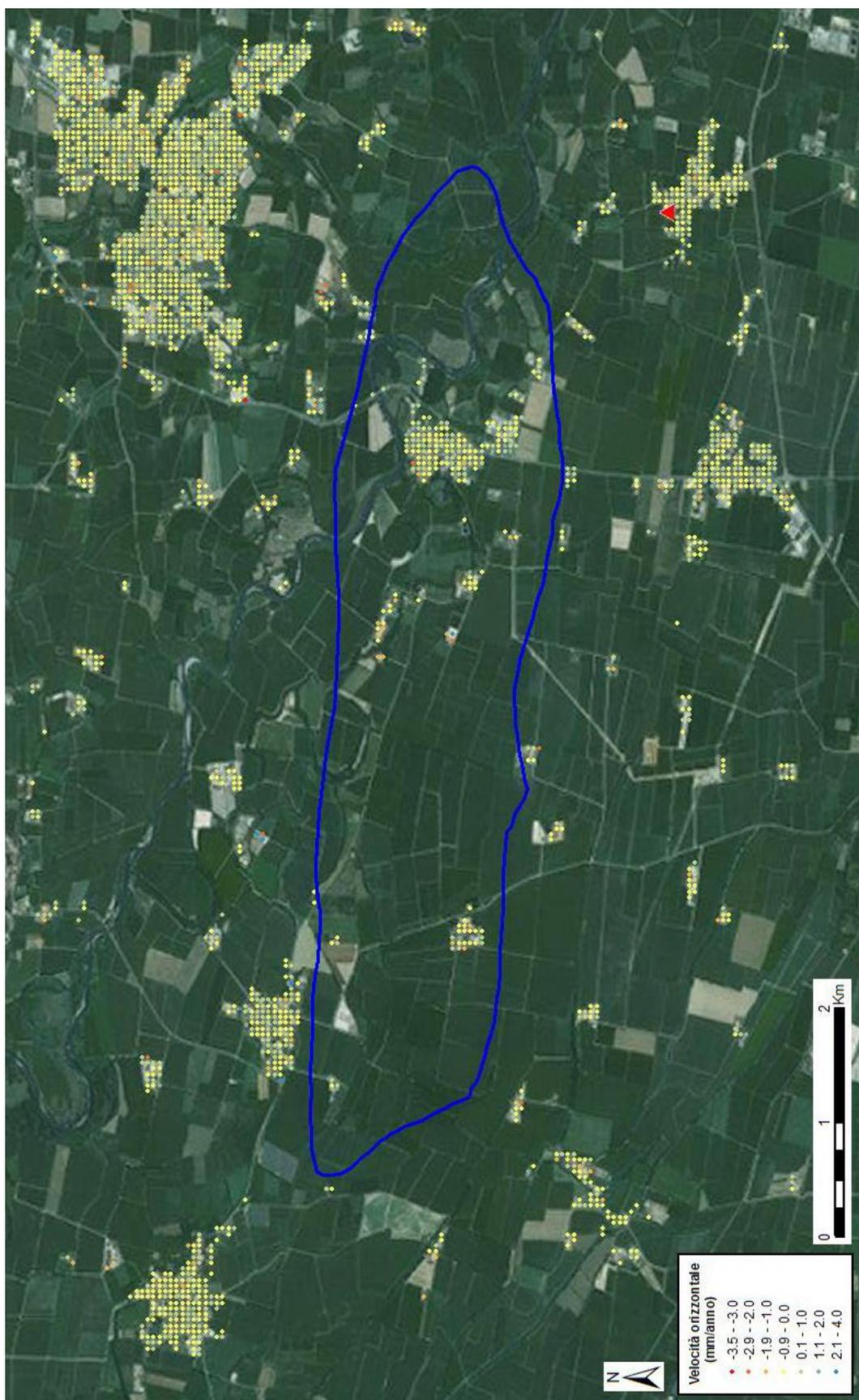


Fig. 16 – Visualizzazione in scala di colori delle velocità orizzontali dei punti scomposti dell’analisi Local.

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. Per ottenere un'uniformità di valori si è deciso di integrare le due differenti analisi, considerando attendibile il dataset dello studio Regional calibrato per mezzo del valore del CGPS di Crema.

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 uguale a zero), risulta essere di circa -0.16 mm/anno (fig. 17). 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.

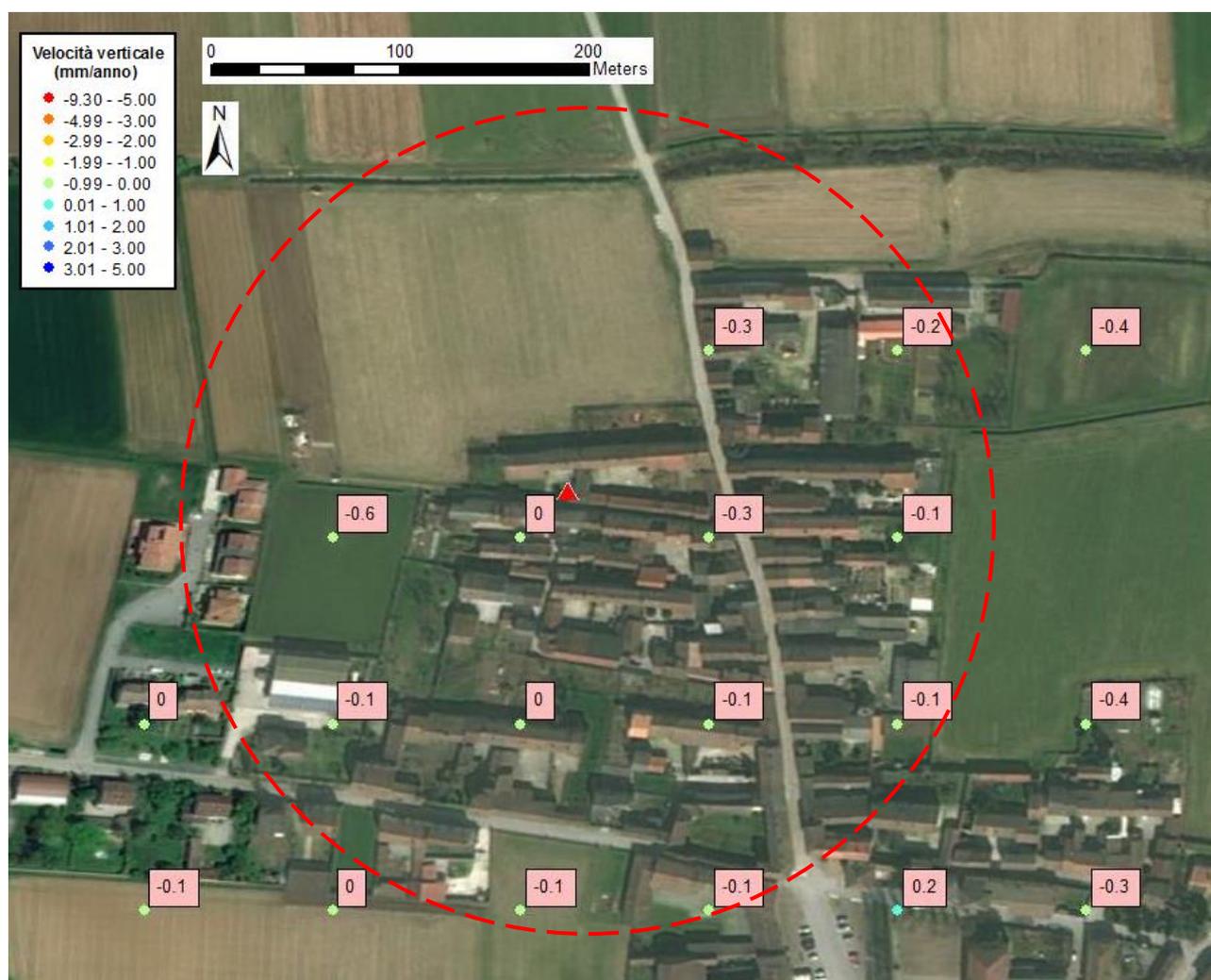


Fig. 17 – Visualizzazione del punto di riferimento utilizzato per la scomposizione Local (triangolo rosso) ed indicazione dei punti Regional più vicini con i rispettivi valori di velocità calibrati ed arrotondati ad una cifra decimale. L'area per la quale è stata calcolata la media delle velocità verticali è delimitata da un cerchio avente un raggio di circa 200 metri.



Fig. 18 – Dati Local scomposti: in bianco i valori originali ed in verde quelli corretti di -0.16 mm/anno, con arrotondamento alla prima cifra decimale.

L'analisi a scala locale, eseguita considerando la media dei valori calibrati di velocità verticale dei PS Local entro l'area definita dai limiti del giacimento di Bordolano, ha evidenziato velocità verticali medie di -0.33 mm/anno, in linea con la velocità di deformazione registrata dal CGPS di Crema e con la distribuzione media delle velocità verticali dell'intera area. Tale valore risulta coerente con quanto misurato negli anni precedenti, anche con l'anno 2014, sebbene non sia stato possibile eseguire la calibrazione del dato in termini assoluti a causa della dismissione del CGPS di Crema. L'osservazione delle velocità degli spostamenti orizzontali evidenzia una sostanziale stabilità dell'area, se analizzata sull'intero periodo.

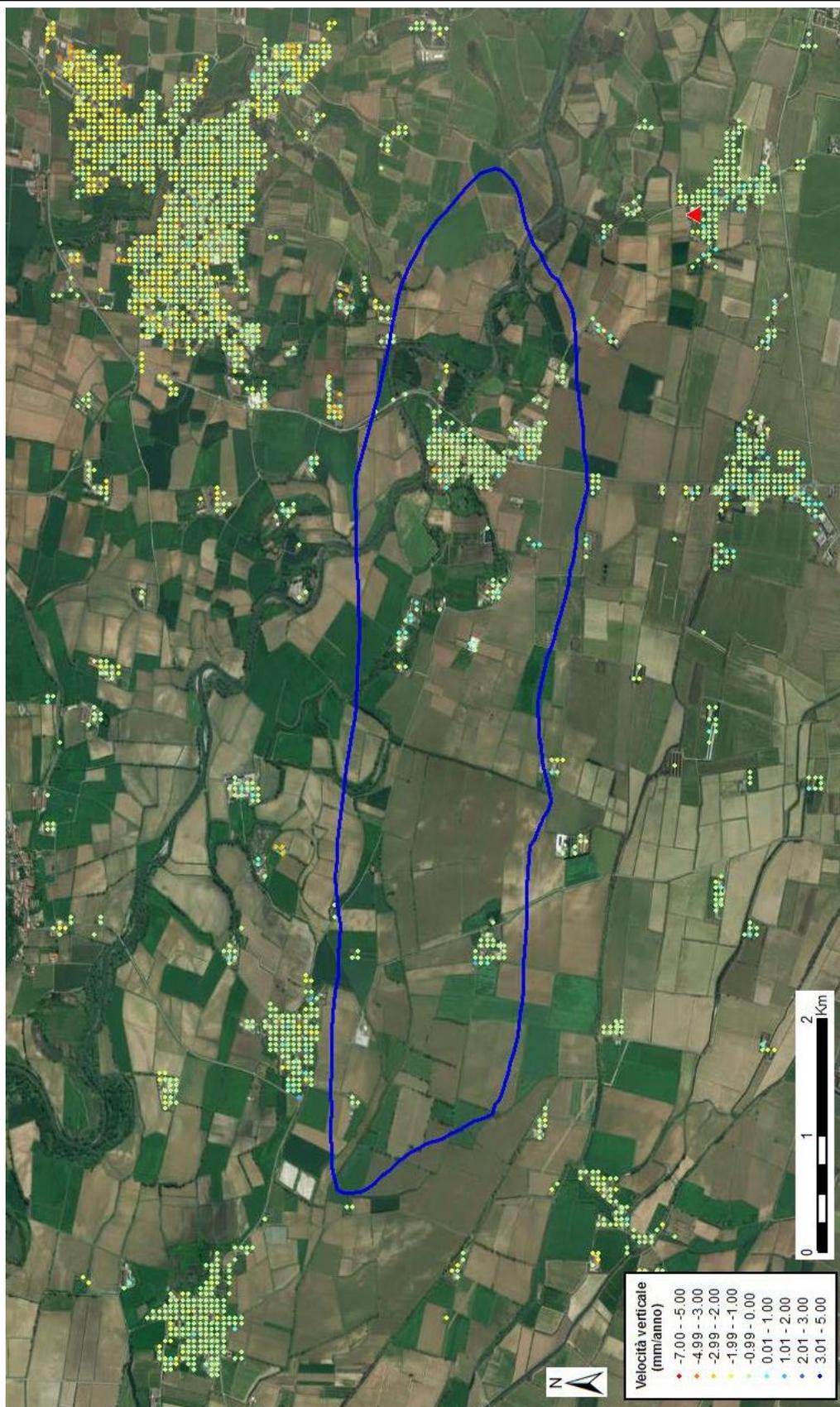


Fig. 19 – Visualizzazione in scala di colori delle velocità verticali dei punti scomposti dell'analisi Local dopo la variazione di -0.16 mm/anno effettuata sull'intero dataset. Il triangolo rosso indica la posizione del punto di riferimento utilizzato per la scomposizione del vettore velocità.

3.3 Analisi delle serie storiche dei punti scomposti

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. Tali fenomeni possono essere invece individuati analizzando le serie storiche di spostamento relative ad ogni singolo PS. Le serie storiche rappresentano, infatti, l'andamento nel tempo di un singolo punto scomposto attraverso la variazione altimetrica registrata da ogni singola immagine radar acquisita (nel caso di Radarsat-1 e Radarsat-2 ogni 24 giorni). In questo modo è possibile ottenere, oltre alle variazioni altimetriche relative di 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 veda esempio fig. 20 e 21).

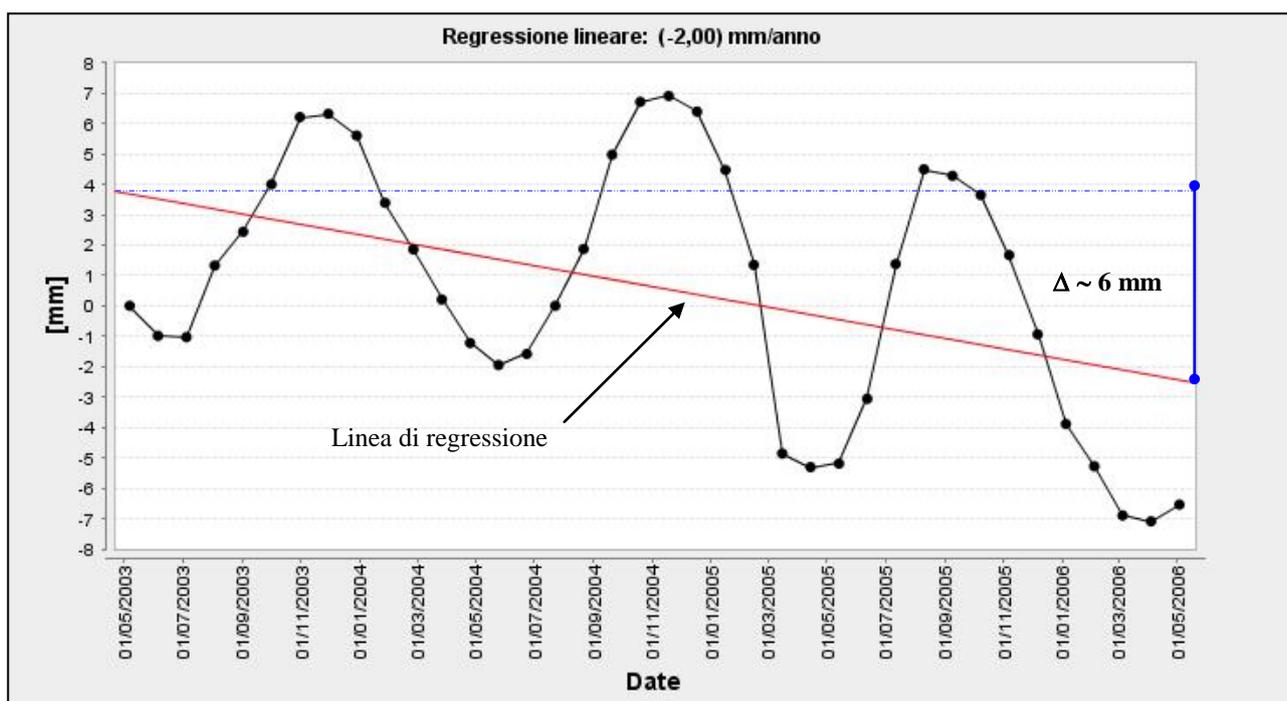


Fig. 20 – Esempio di serie storica con valori di subsidenza di circa 2 mm/anno.

Nel caso specifico di Bordolano tale analisi non assume particolare rilevanza poiché il campo non era ancora attivo allo stoccaggio nel periodo monitorato, ma è sicuramente un elemento utile per caratterizzare lo scenario deformativo di fondo degli anni precedenti l'avvio dello stoccaggio, per poter eseguire in futuro un confronto con gli anni in cui sarà realizzato lo stoccaggio del gas.

Se la velocità media annua evidenzia una sostanziale stabilità dell'area occupata dal giacimento, l'analisi delle serie storiche esclude la presenza di deformazioni cicliche: ciò è ben evidente anche

in fig. 22, che mostra i valori di ampiezza media della stagionalità per la componente verticale dei PS dell'analisi Local. Come già evidenziato dall'analisi a scala regionale, a nord 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 gas e che potrebbe essere connesso al prelievo di acqua dal sottosuolo.

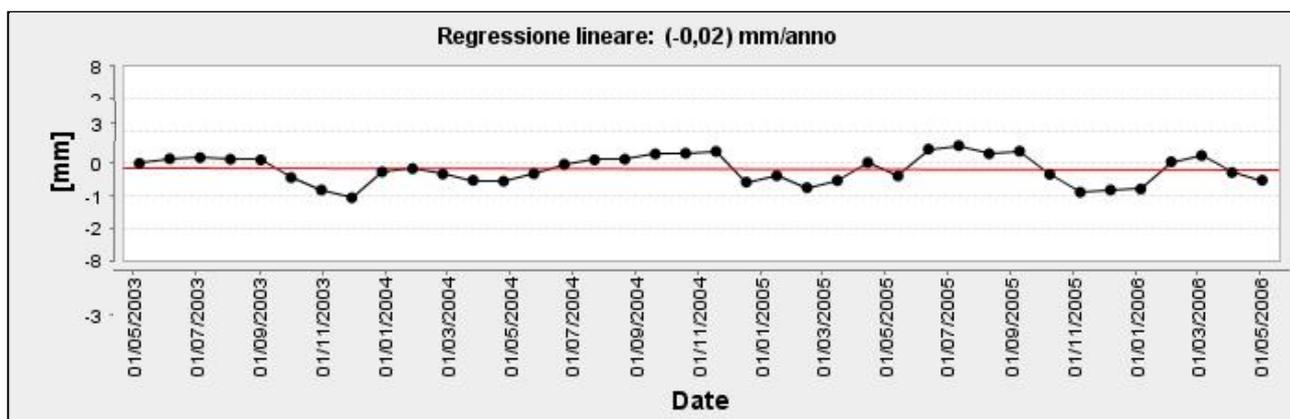


Fig. 21 – Esempio di serie storica con valori di regressione lineare nulla.

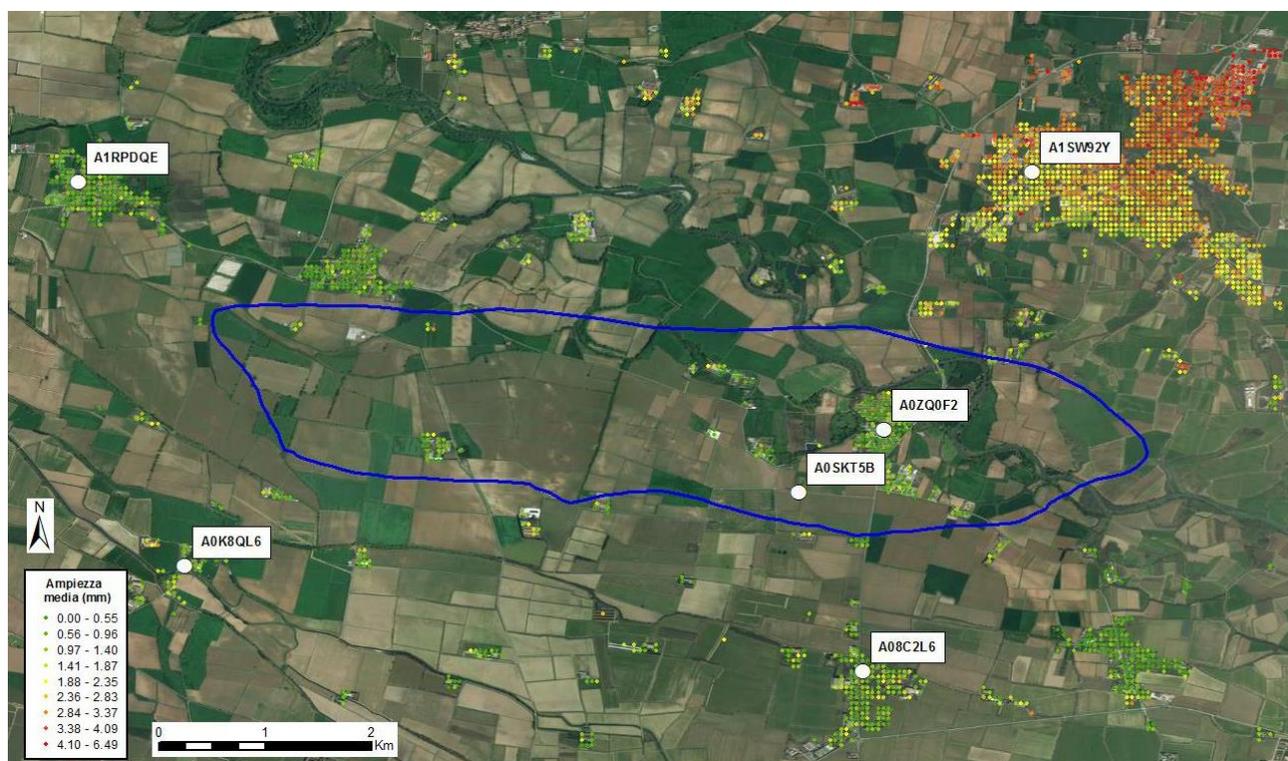


Fig. 22 – Valori medi di ampiezza della stagionalità calcolati per la componente verticale dei PS Local ed ubicazione dei 2 punti interni e dei 4 punti esterni alla proiezione in superficie del limite del giacimento.

Sono state analizzate le serie storiche relative a 6 punti. Dei 6 punti individuati, 2 ricadono entro l'area del giacimento in prossimità del top strutturale, mentre gli altri 4 sono ubicati all'esterno della proiezione in superficie del giacimento, come si nota in fig. 22.

Le serie storiche dei 6 punti individuati sono state confrontate con la curva cumulativa di iniezione del campo di Bordolano (fig. 23): dopo i 455 Msm³ di cushion gas iniettati in giacimento tra il 2008 ed il 2013, nel corso del 2016 sono stati eseguiti alcuni test di iniezione ed erogazione mirati alla verifica del corretto funzionamento degli impianti. In questo modo è stato possibile comparare analiticamente le misure di spostamento dei punti scelti e i volumi di gas immessi nel giacimento.

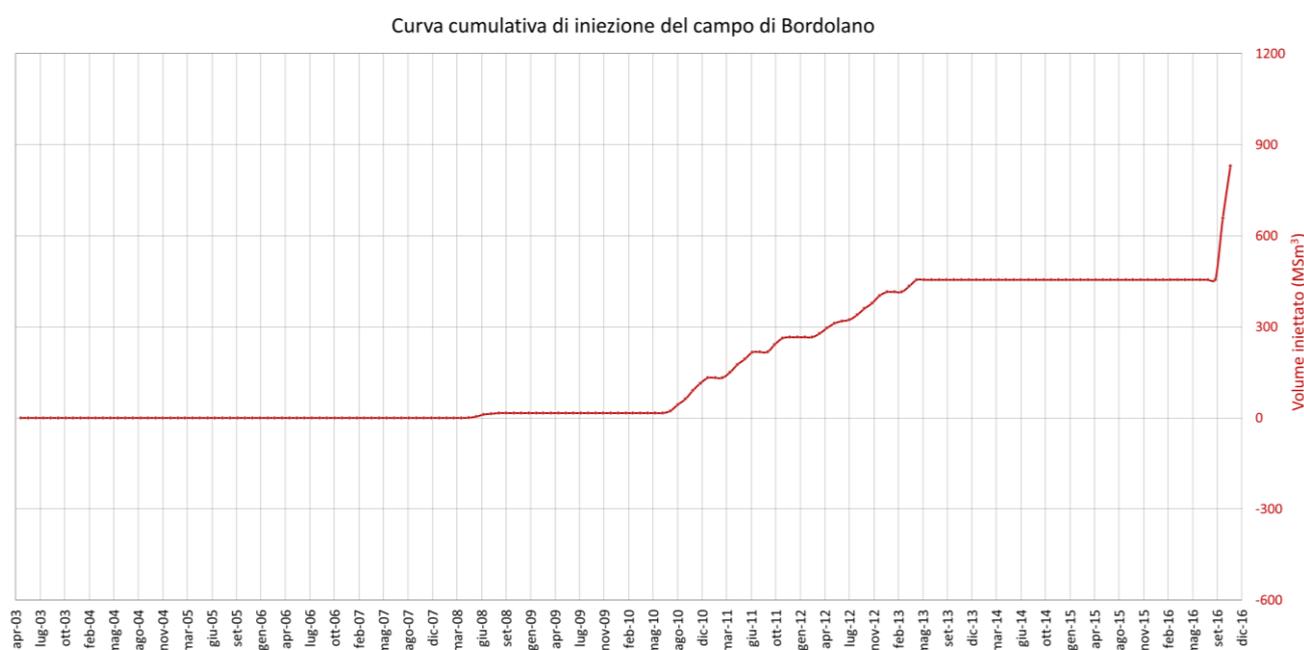


Fig. 23 – Curva cumulativa di iniezione del campo di Bordolano (unità di misura in Milioni di Standard m³ o MSm³).

Le serie storiche da analizzare sono state scelte sulla base degli “indici di precisione” definiti nel par. 2.3. 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 pagine successive (fig. da 24 a 29) è mostrato l'andamento delle serie storiche scomposte dei 6 punti scelti, ottenuti sempre da griglia regolare, risoluzione 50x50m. Per ognuna delle serie storiche si evidenzia la coerenza temporale riferita sia alla geometria ascendente che discendente, ed il valore di deviazione standard della velocità verticale.

Punto interno al giacimento – A0SKT5B

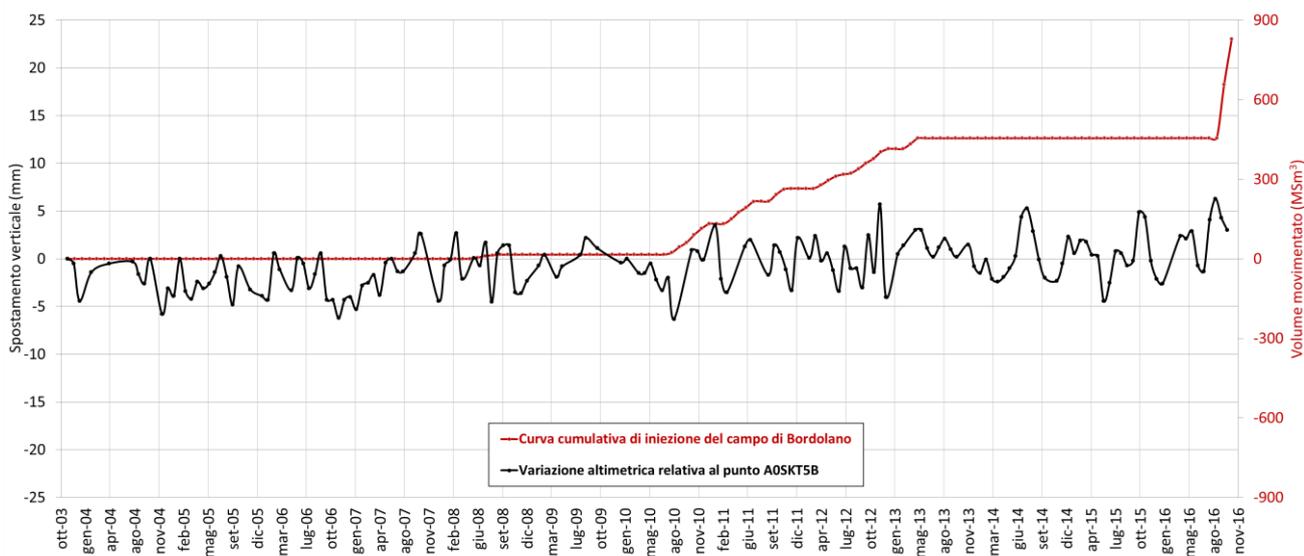
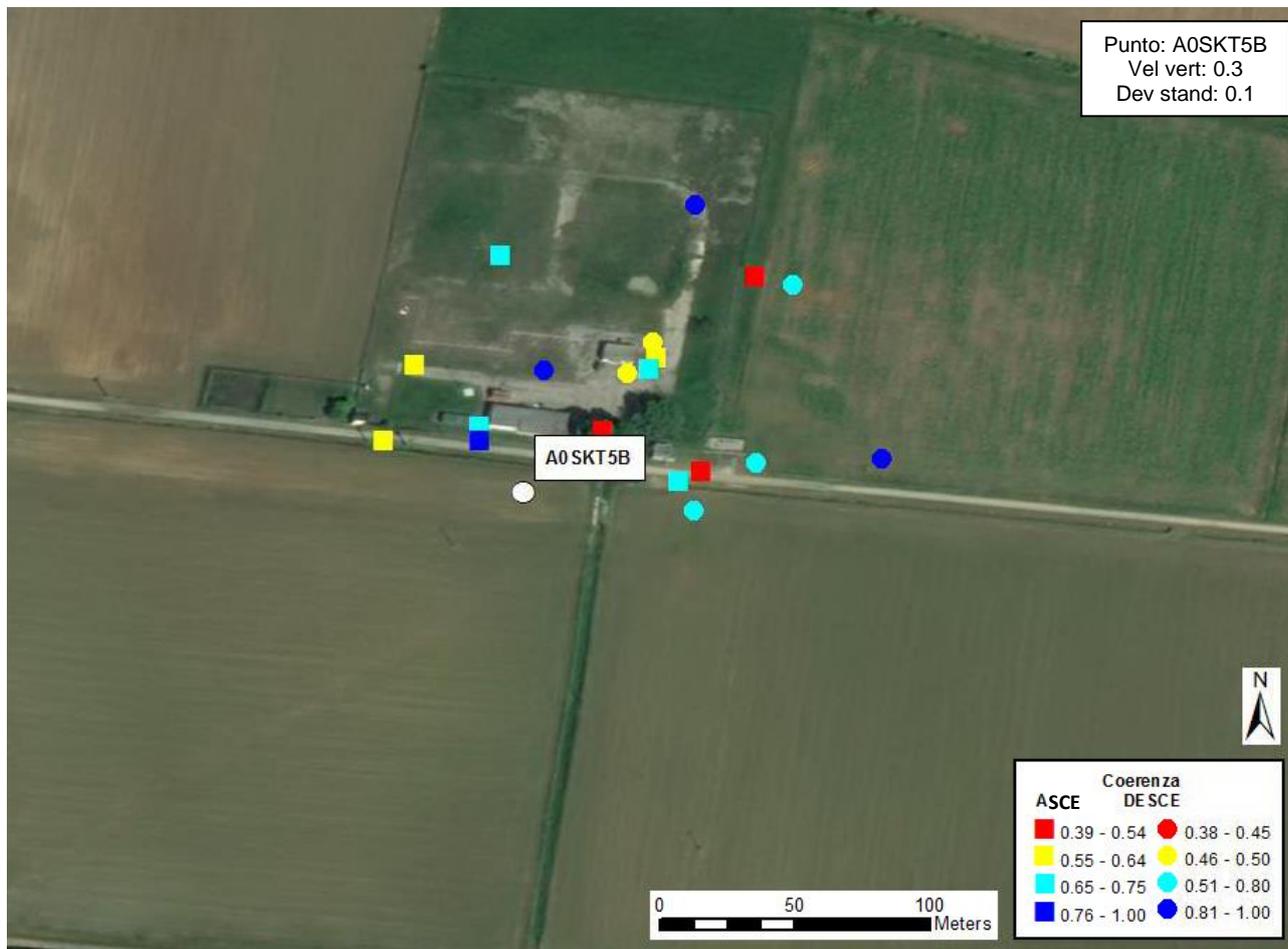


Fig. 24 – In alto, ubicazione del punto scomposto A0SKT5B con evidenza dei PS ascendenti e discendenti presenti nelle vicinanze e loro coerenza. In basso, confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche del punto scomposto A0SKT5B e la curva di iniezione del giacimento di Bordolano.

Punto interno al giacimento – A0ZQ0F2

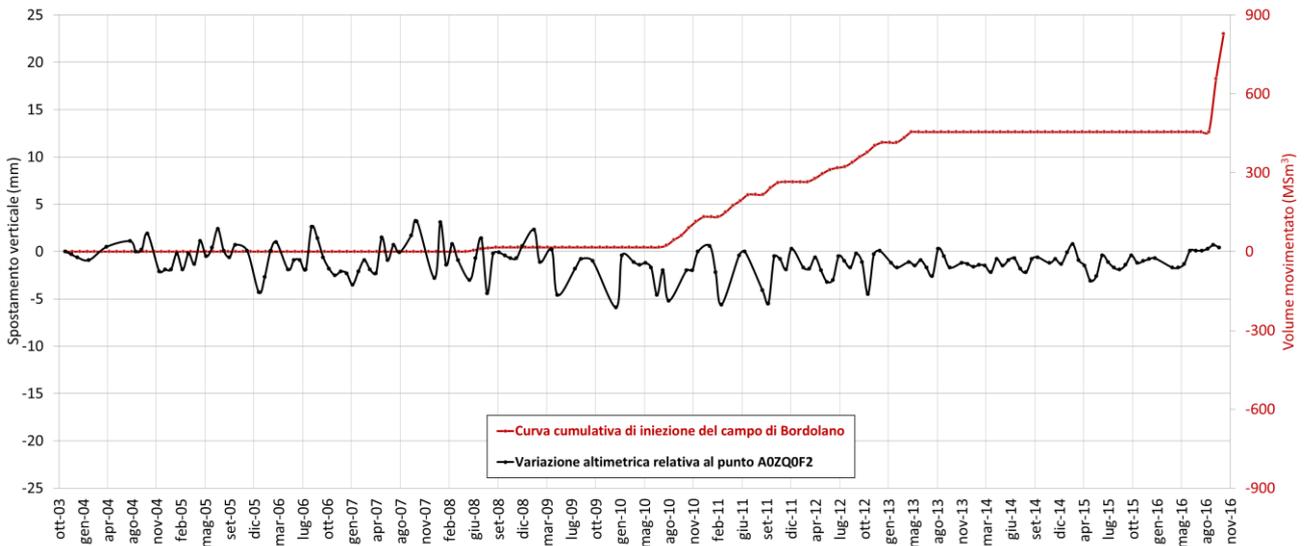
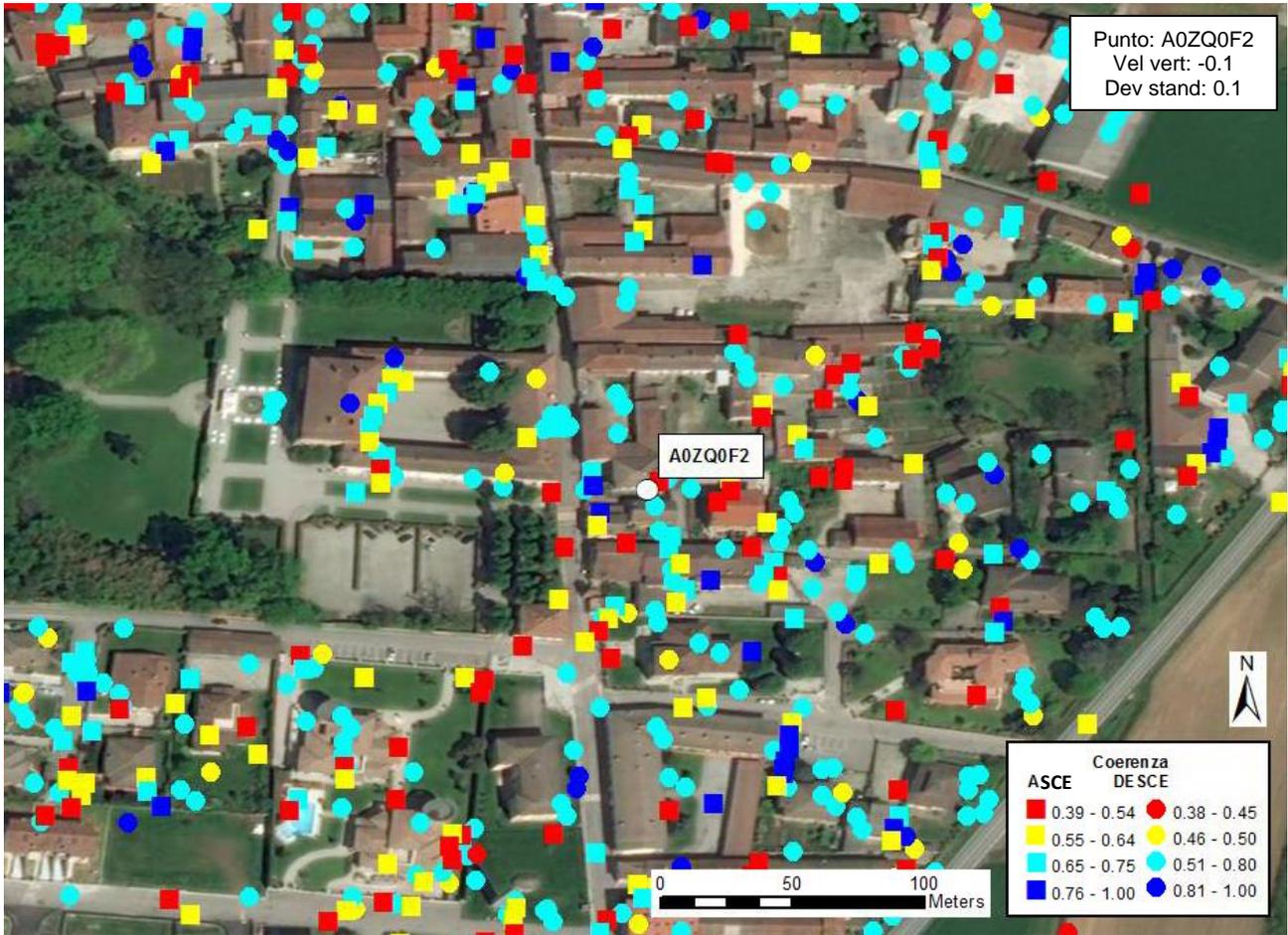


Fig. 25 – In alto, ubicazione del punto scomposto A0ZQ0F2 con evidenza dei PS ascendenti e discendenti presenti nelle vicinanze e loro coerenza. In basso, confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche del punto scomposto A0ZQ0F2 e la curva di iniezione del giacimento di Bordolano.

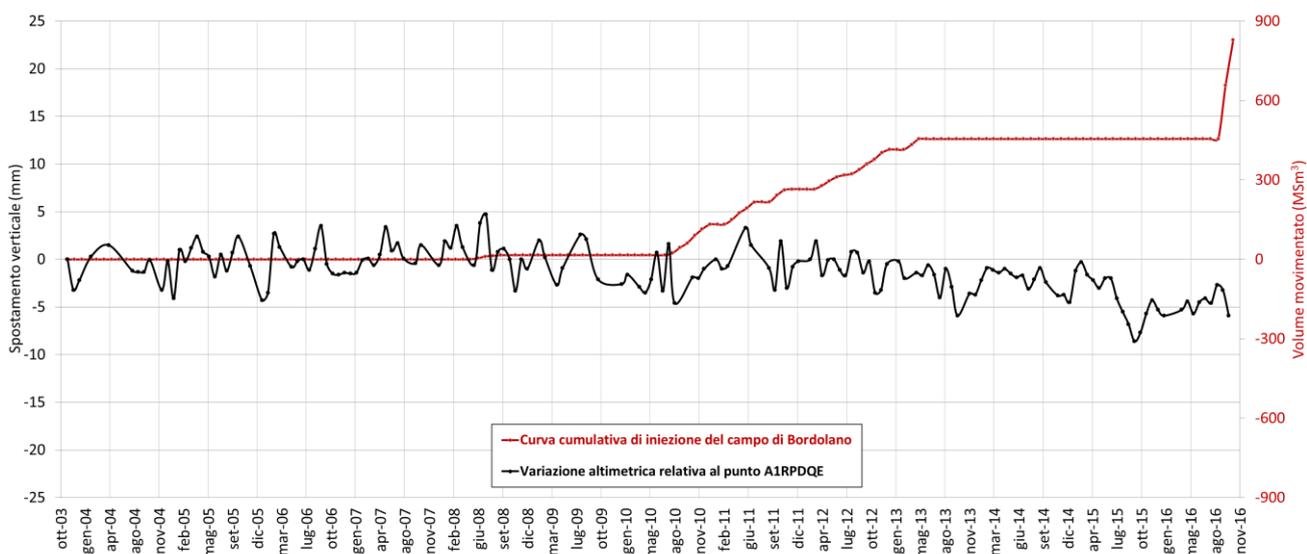
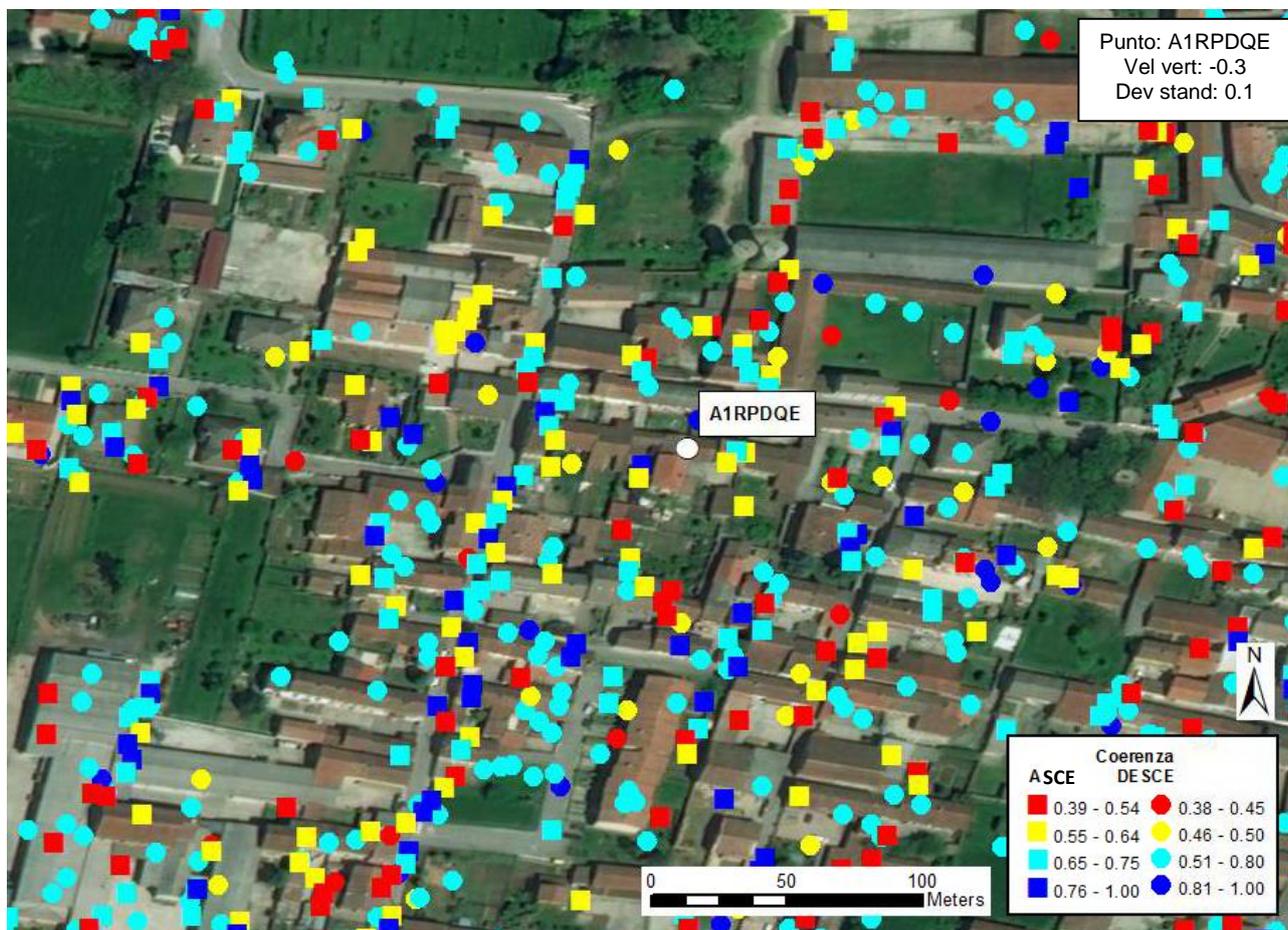
Punto esterno al giacimento – A1RPDQE


Fig. 26 – In alto, ubicazione del punto scomposto A1RPDQE con evidenza dei PS ascendenti e discendenti presenti nelle vicinanze e loro coerenza. In basso, confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche del punto scomposto A1RPDQE e la curva di iniezione del giacimento di Bordolano.

Punto esterno al giacimento – A0K8QL6

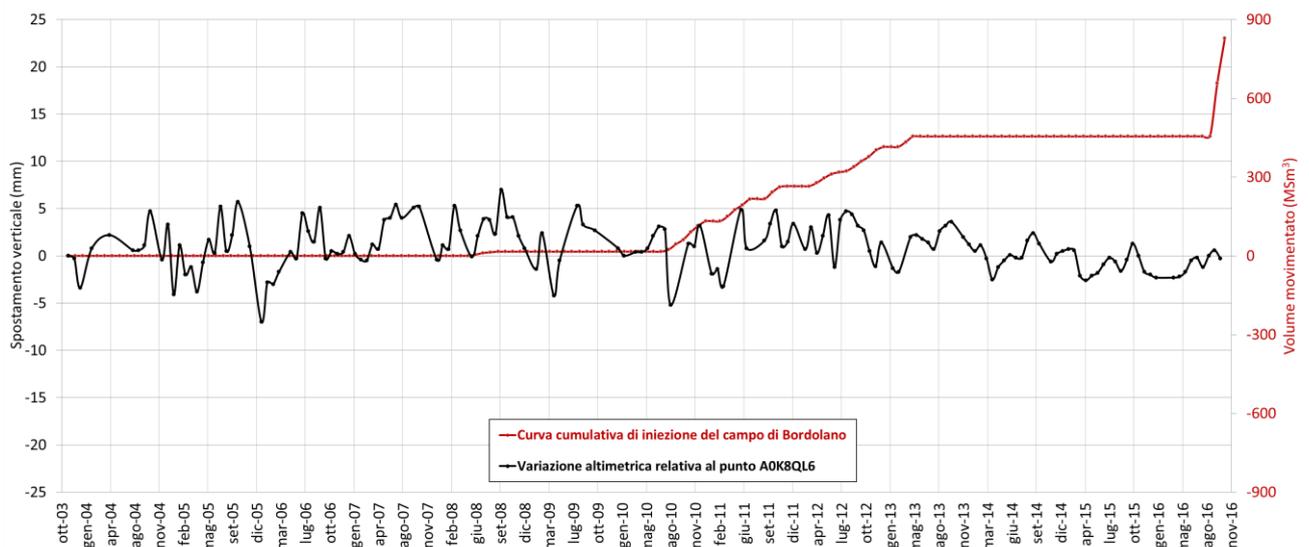
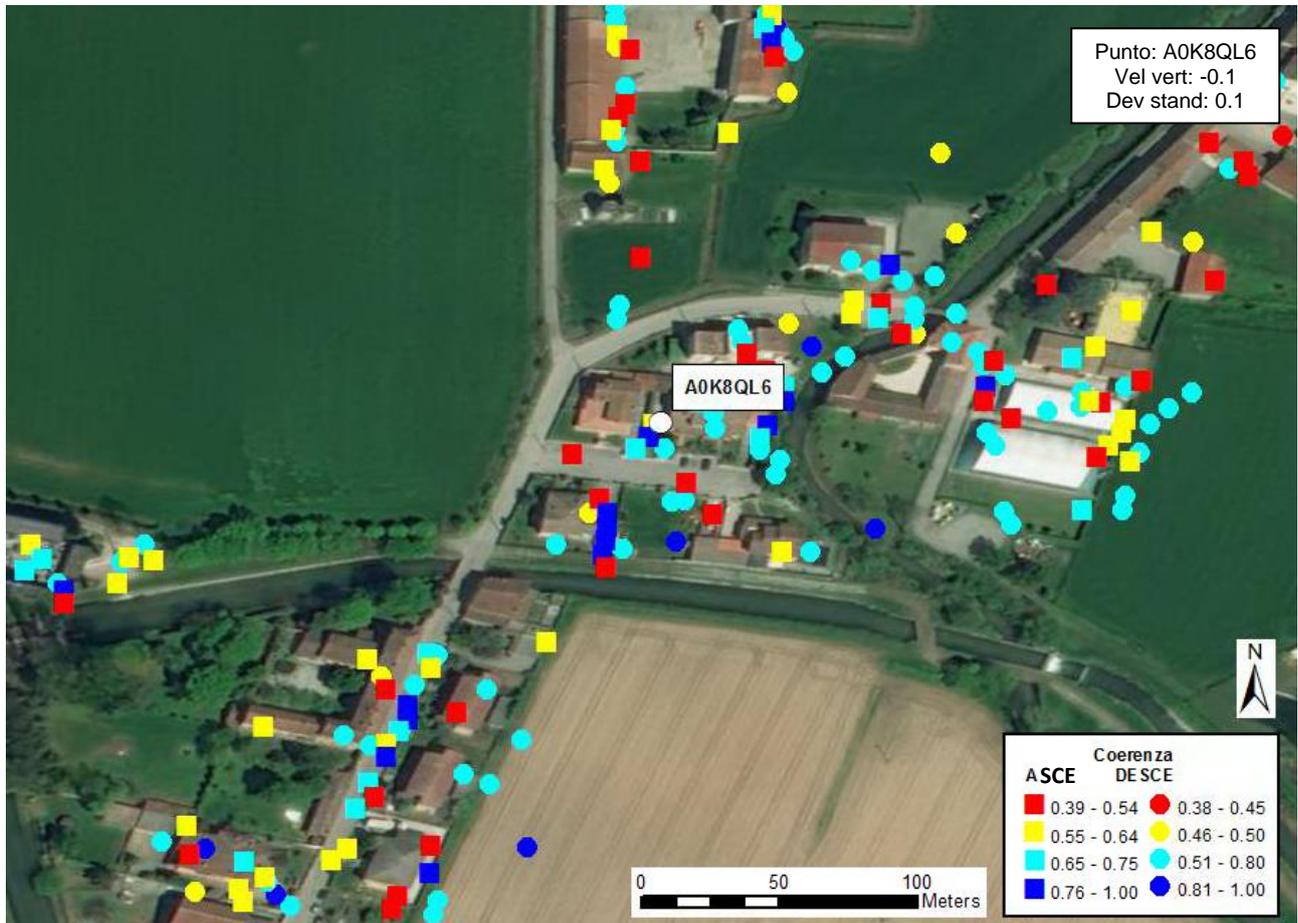


Fig. 27 – In alto, ubicazione del punto scomposto A0K8QL6 con evidenza dei PS ascendenti e discendenti presenti nelle vicinanze e loro coerenza. In basso, confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche del punto scomposto A0K8QL6 e la curva di iniezione del giacimento di Bordolano.

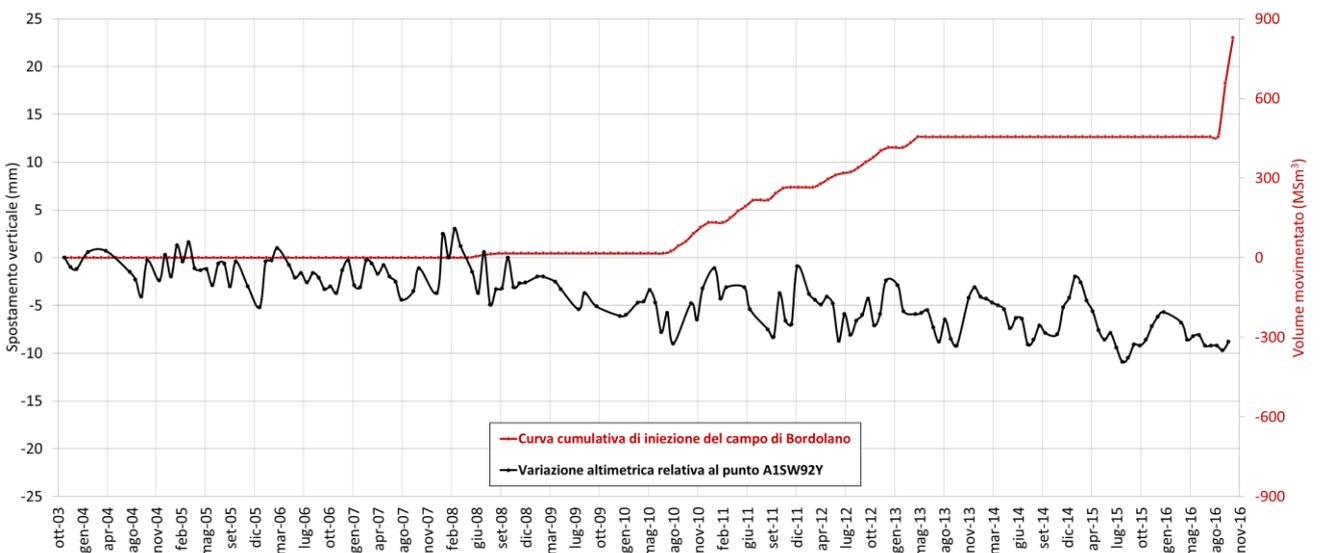
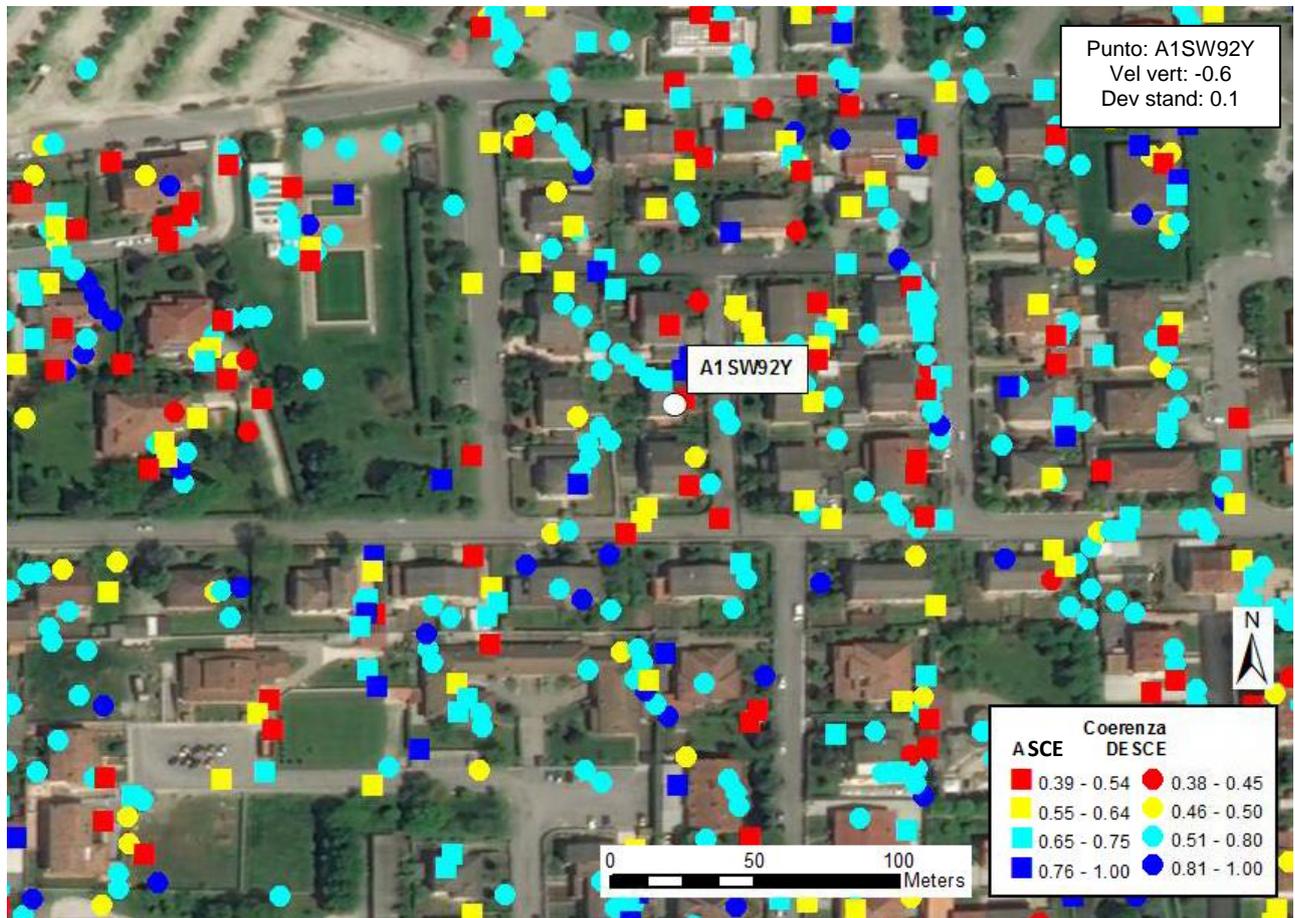
Punto esterno al giacimento – A1SW92Y


Fig. 28 – In alto, ubicazione del punto scomposto A1SW92Y con evidenza dei PS ascendenti e discendenti presenti nelle vicinanze e loro coerenza. In basso, confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche del punto scomposto A1SW92Ye la curva di iniezione del giacimento di Bordolano.

Punto esterno al giacimento – A08C2L6

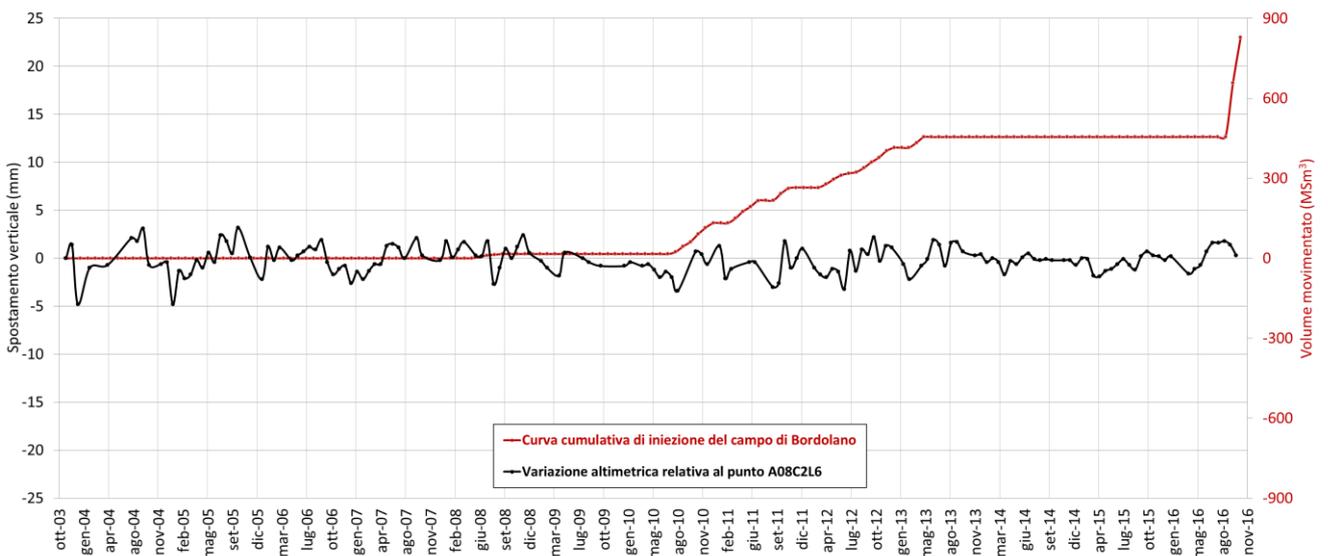
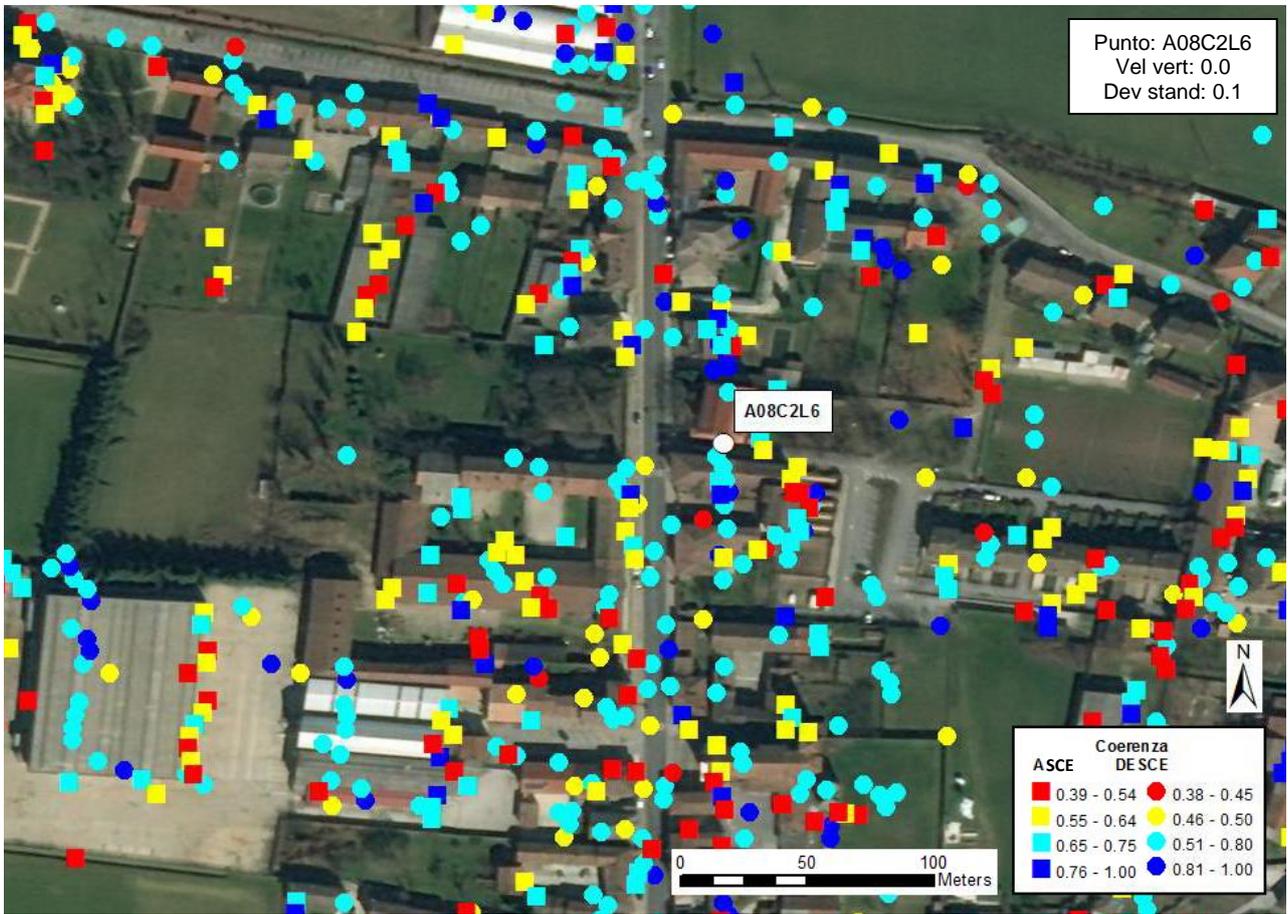


Fig. 29 – In alto, ubicazione del punto scomposto A08C2L6 con evidenza dei PS ascendenti e discendenti presenti nelle vicinanze e loro coerenza. In basso, confronto tra l'andamento temporale delle variazioni altimetriche del punto scomposto A08C2L6 e la curva di iniezione del giacimento di Bordolano.

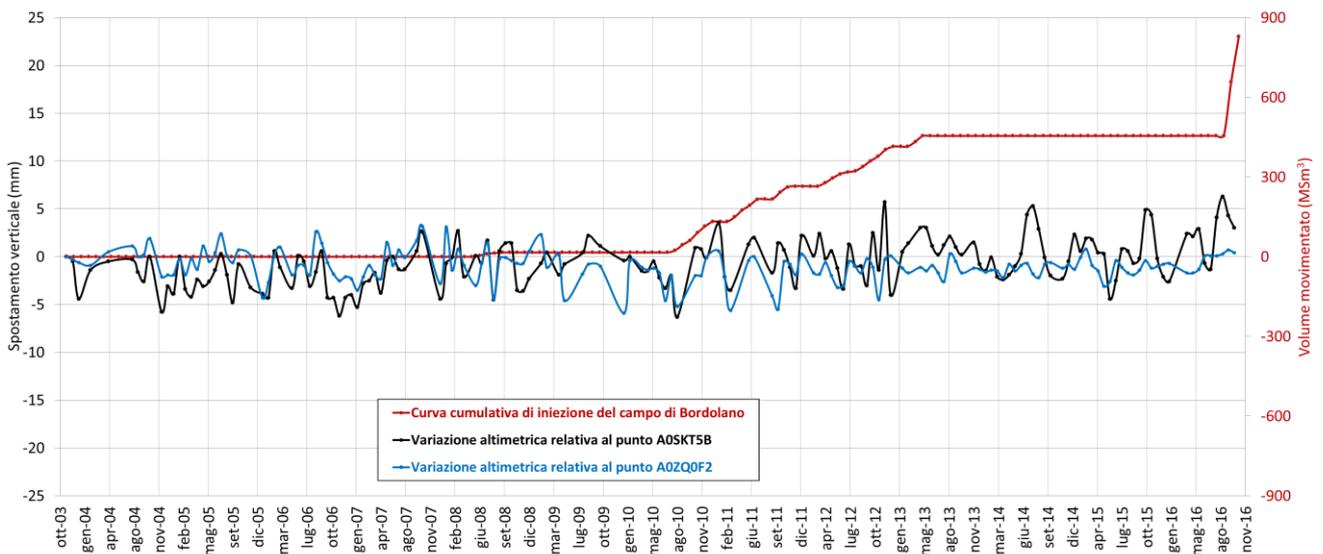


Fig. 30 – Confronto tra la curva di iniezione del giacimento di Bordolano e le serie storiche dei punti scelti all'interno dei limiti del campo.

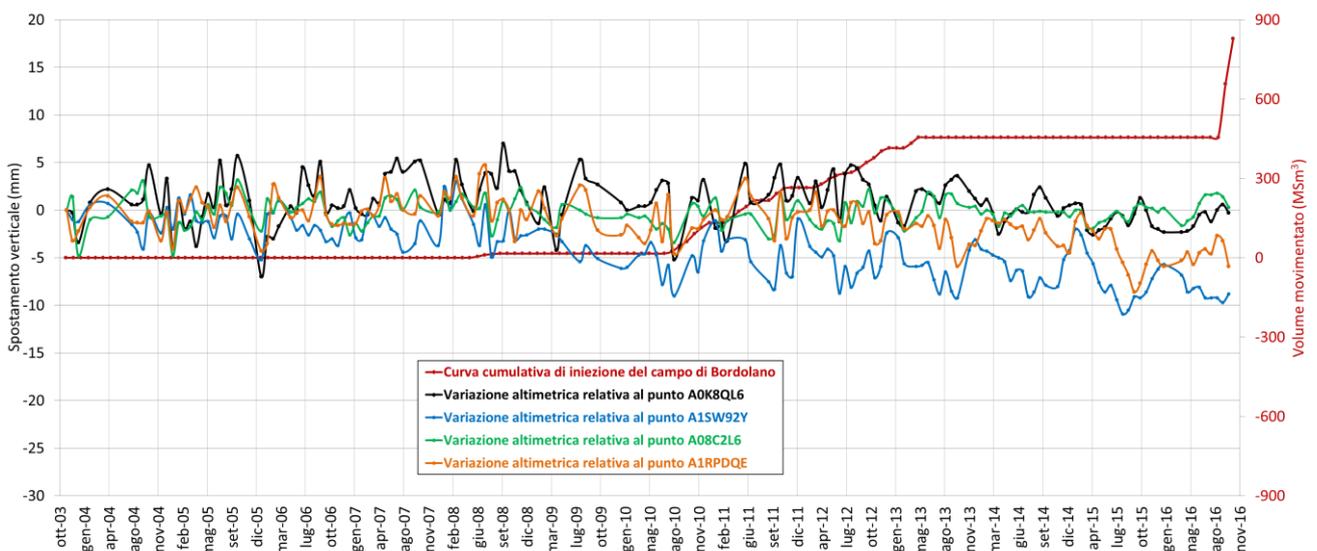


Fig. 31 – Confronto tra la curva di iniezione del giacimento di Bordolano e le serie storiche dei punti scelti all'esterno dei limiti del campo.

I punti scelti all'interno dei limiti del giacimento mostrano una sostanziale stabilità e non risentono delle discontinue operazioni di iniezione effettuate tra il 2008 ed il 2016.

Anche l'analisi dei punti esterni evidenzia una condizione di stabilità, eccetto per i punti ubicati nell'area a nord di Bordolano (A1SW92Y e, in minor misura, A1RPDQE), che registrano un lieve trend di abbassamento iniziato a fine 2011. Il punto A1SW92Y, inserito entro la già citata area a nord con fenomeni stagionali nella componente verticale, presenta un'ampiezza delle oscillazioni in genere contenuta entro 5 millimetri (raramente supera i 10 millimetri). In generale, la frequenza di oscillazione registrata (dell'ordine di 1-3 mesi) rappresenta sostanzialmente un rumore neutro associabile all'errore nella misura.

4. Conclusioni

Analisi Regionale

L'analisi a scala regionale evidenzia una sostanziale stabilità, ad eccezione dell'estremità SW dell'area di indagine, caratterizzata da fenomeni di subsidenza che superano i -5 mm/anno.

Andando ad evidenziare i soli punti situati entro i limiti definiti dalla proiezione in superficie del giacimento, risulta un valore medio di velocità verticale pari a -0.18 mm/anno. Tale range di valori viene confermato dalla stima delle velocità verticali assolute effettuate mediante il CGPS installato presso Crema (-0.24 mm/anno).

Analisi Local

L'analisi a scala locale effettuata sull'area occupata dal giacimento di Bordolano evidenzia valori medi di velocità verticale di -0.33 mm/anno, in linea con la velocità di deformazione registrata dal CGPS di Crema e con la distribuzione media delle velocità verticali dell'intera area.

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

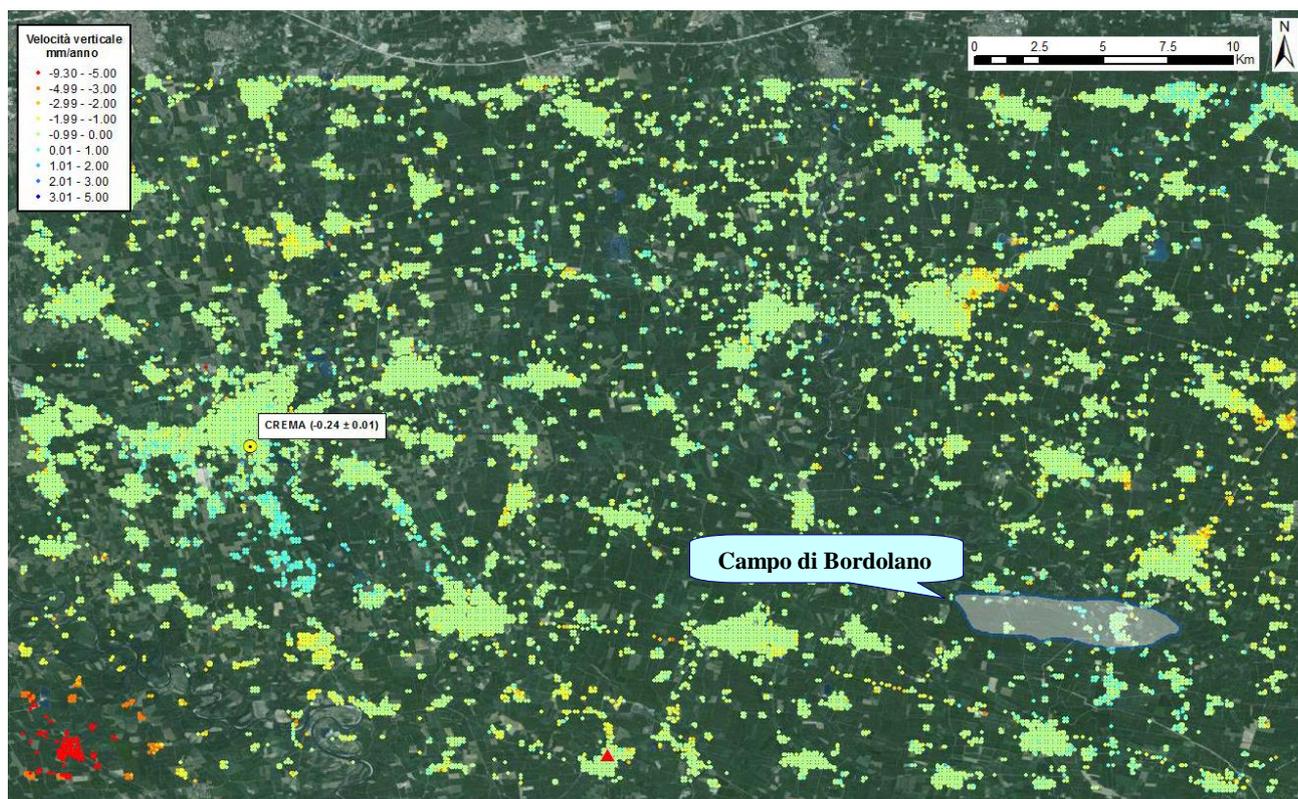
Analisi delle serie storiche

Le serie storiche di spostamento dei punti analizzati presentano periodicità confrontabili. L'analisi ha evidenziato una sostanziale stabilità sia per i punti esterni che per i punti scelti all'interno della proiezione in superficie del limite del giacimento, ad eccezione dei due punti ubicati a nord di Bordolano, che registrano un lieve trend di abbassamento iniziato alla fine del 2011.

Le serie storiche dei punti interni non sono in alcun modo influenzate dalle discontinue operazioni di iniezione effettuate tra il 2008 e il 2016, con oscillazioni di ampiezza in genere contenuta entro 5 millimetri: il loro comportamento non può pertanto essere messo in correlazione con l'attività del giacimento. Le misure ad oggi registrate sono imputabili unicamente a cause naturali o a fattori antropici differenti dalle attività di stoccaggio del gas naturale, utili per un futuro confronto con gli spostamenti complessivi che verranno registrati dopo l'avvio dello stoccaggio.

I risultati conseguiti risultano in linea con quanto evidenziato nei report precedenti.

La fig.32 riassume i risultati dell'analisi SAR condotta sul campo di Bordolano.



Variazioni Altimetriche +/- (mm/anno)

**Trend regionale
(valori CGPS Crema)**

- 0.24 mm/a

**Relative rispetto al
trend regionale**

~ (- 0.18 mm/a)

**Correlazione con la curva
di iniezione del campo**

**Ampiezza media
delle curve**

< 5 mm

**Correlazione (con curva
iniezione del campo)**

ASSENTE

Fig. 32 – In alto i dati Regional scomposti secondo il vettore verticale e calibrati, con ubicazione del CGPS di Crema, del punto di riferimento (in rosso) e i limiti del giacimento di Bordolano. In basso i risultati dell'analisi SAR eseguita sul campo di Bordolano.