

**RILIEVO DELLA SUBSIDENZA NELLA PIANURA
EMILIANO-ROMAGNOLA**

PRIMA FASE



RELAZIONE FINALE

Referenti per la Regione Emilia-Romagna:

Rosanna Bissoli, Responsabile del Servizio Tutela e Risanamento Acqua, Aria e Agenti Fisici.
Assessorato difesa del suolo e della costa, protezione civile e politiche ambientali e della montagna.

Immacolata Pellegrino, Servizio Tutela e Risanamento Acqua, Aria e Agenti Fisici.

Hanno collaborato alla realizzazione del progetto:

Flavio Bonsignore - Responsabile del progetto (ARPAE, Direzione Tecnica).

TRE ALTAMIRA - Analisi interferometrica.

Immagine di copertina: satellite RADARSAT - 2 (www.nasaspaceflight.com).

INDICE

1. Premessa	1
2. Area d'indagine	2
3. Acquisizione dei dati satellitari e definizione dei siti di elaborazione	2
3.1 Dati satellitari acquisiti	2
3.2 Definizione e preparazione dei siti di elaborazione	4
4. Analisi interferometrica	6
4.1 Introduzione	6
4.2 Risultati analisi SqueeSAR™ sui singoli siti di elaborazione	6
4.3 Sito di elaborazione di Piacenza	8
4.4 Sito di elaborazione di Parma	9
4.5 Sito di elaborazione di Bologna	10
4.6 Sito di elaborazione di Mirandola	13
4.7 Sito di elaborazione di Ravenna	16
4.8 Sito di elaborazione di Rimini	17
5. Conclusioni	18
Appendice I - Analisi interferometriche	20
Appendice II - Indici di precisione dell'analisi SqueeSAR™	31

1. Premessa

La Regione Emilia-Romagna con DGR n. 1690 del 17/10/2016 ha affidato ad ARPAE Direzione Tecnica la realizzazione delle attività inerenti il progetto “Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola - prima fase”, secondo termini e modalità contenute nella convenzione approvata con lo stesso atto.

L’obiettivo generale del progetto è l’aggiornamento delle conoscenze geometriche del fenomeno della subsidenza nell’ambito della pianura emiliano-romagnola.

La prima fase del lavoro, oggetto della presente relazione, riguarda la realizzazione dell’analisi interferometrica di dati radar satellitari, per la quale si è proceduto con lo stesso metodo utilizzato nel 2011 nell’ambito della precedente campagna di rilievo.

In questa prima fase del lavoro, sono state svolte le seguenti attività:

1. verifica della effettiva copertura territoriale delle immagini SAR relative al periodo 2011-2016, definizione e preparazione dei siti di elaborazione;
2. elaborazione SqueeSARTM dei singoli siti;

Ad una fase successiva, la cui attuazione sarà oggetto di una seconda convenzione, è demandata la conclusione del lavoro per la quale sono previste le seguenti attività:

- allineamento a scala regionale
- elaborazione dei dati acquisiti da almeno 15 stazioni permanenti GPS presenti nella regione Emilia-Romagna e inquadramento di tali stazioni nel Sistema Internazionale EUREF;
- verifica e calibrazione dei dati interferometrici e realizzazione della cartografia delle velocità di movimento verticale del suolo relativa al periodo 2011-2016.

2. Area d'indagine

L'area d'indagine (*Figura 1*) comprende il territorio di pianura della regione Emilia-Romagna ed una fascia di circa qualche chilometro oltre il confine nord. L'estensione totale dell'area è di oltre **13.000 km²**.



Fig. 1 - Estensione dell'area d'indagine

3. Acquisizione dei dati satellitari e definizione dei siti di elaborazione

3.1 Dati satellitari acquisiti

Il precedente monitoraggio realizzato nel 2011 si avvale di immagini radar acquisite dal satellite RADARSAT-1 (RSAT1), un satellite a media risoluzione, in banda C, con una lunghezza d'onda (λ) del segnale radar pari a 56.564 mm. Tale satellite, lanciato dall'Agenzia Spaziale Canadese nel 1995, non è più operativo da marzo 2013.

L'Agenzia Spaziale Canadese ha lanciato nel 2007 un satellite "gemello", RADARSAT-2 (RSAT2), tuttavia, in fase di progettazione, l'Agenzia stessa ha deciso di utilizzare per tale satellite una frequenza di acquisizione leggermente diversa da quella del suo predecessore, corrispondente ad una lunghezza d'onda di 55.465mm. Questa seppur lieve differenza impedisce l'utilizzo simultaneo di dati acquisiti da questi due satelliti nelle applicazioni interferometriche standard.

Pertanto, al fine di garantire la continuità del monitoraggio, TRE ALTAMIRA ha sviluppato una specifica modalità di funzionamento dell'algoritmo di elaborazione SqueeSAR™ detta *stitching* che consente l'elaborazione congiunta di dati acquisiti da questi due satelliti.

L'elaborazione congiunta richiede che la geometria di acquisizione dei satelliti utilizzati sia la stessa (ascendente o discendente). E' necessario infatti che lo stesso bersaglio radar sia identificabile da entrambi i satelliti. Ne consegue che il numero di punti di misura ottenibili con una elaborazione *stitching* è tanto più alto quanto più simili sono gli angoli di vista delle geometrie di acquisizione utilizzate, ma in generale inferiore a quanto ottenibile dall'elaborazione dei dati di un singolo satellite.

Grazie a questo algoritmo, è stato possibile elaborare congiuntamente immagini acquisite da entrambi i satelliti in geometria ascendente, fornendo informazioni continue sull'intera area d'indagine, nel periodo 2011-2016.

Nella *Figura 2* si riporta lo schema standard di un satellite nella fase di acquisizione in modalità ascendente ovvero da sud a nord: (a) la linea di vista del satellite rispetto alla verticale forma un angolo θ , (b) l'orbita del satellite non è perfettamente orientata in senso sud-nord ma differisce di un angolo δ , (c) vista tridimensionale.

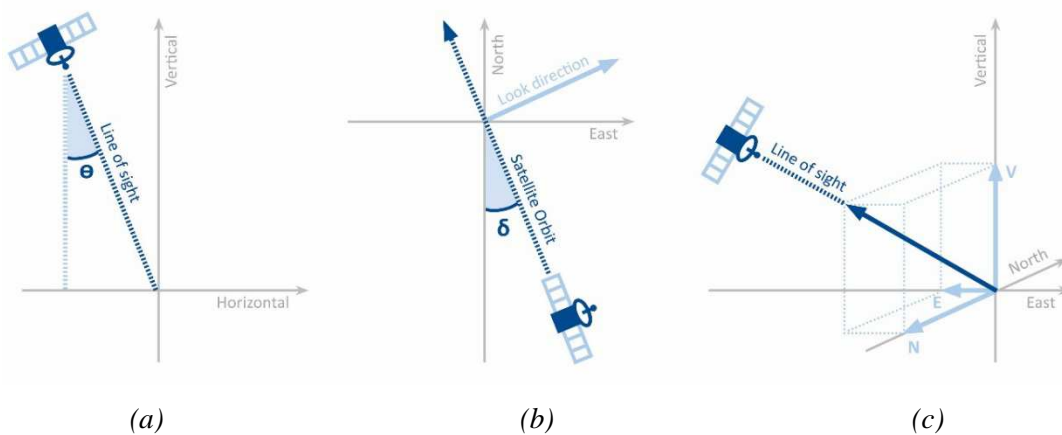


Fig. 2 - Schema standard di acquisizione in geometria ascendente

Infine, per un'area limitata del parmense, non adeguatamente coperta da dati RSAT2, è stato necessario acquisire immagini derivanti dalla costellazione COSMO-SkyMed (CSK) dell'Agenzia Spaziale Italiana, sempre in geometria ascendente. Tale satellite opera in banda-X (lunghezza d'onda $\lambda = 3.2$ cm) con una risoluzione maggiore (3x3 metri) rispetto ai satelliti RSAT (20x5 metri). Nella *Figura 3* è visualizzata la copertura delle immagini disponibili dei satelliti RSAT2 e CSK per l'area d'indagine.

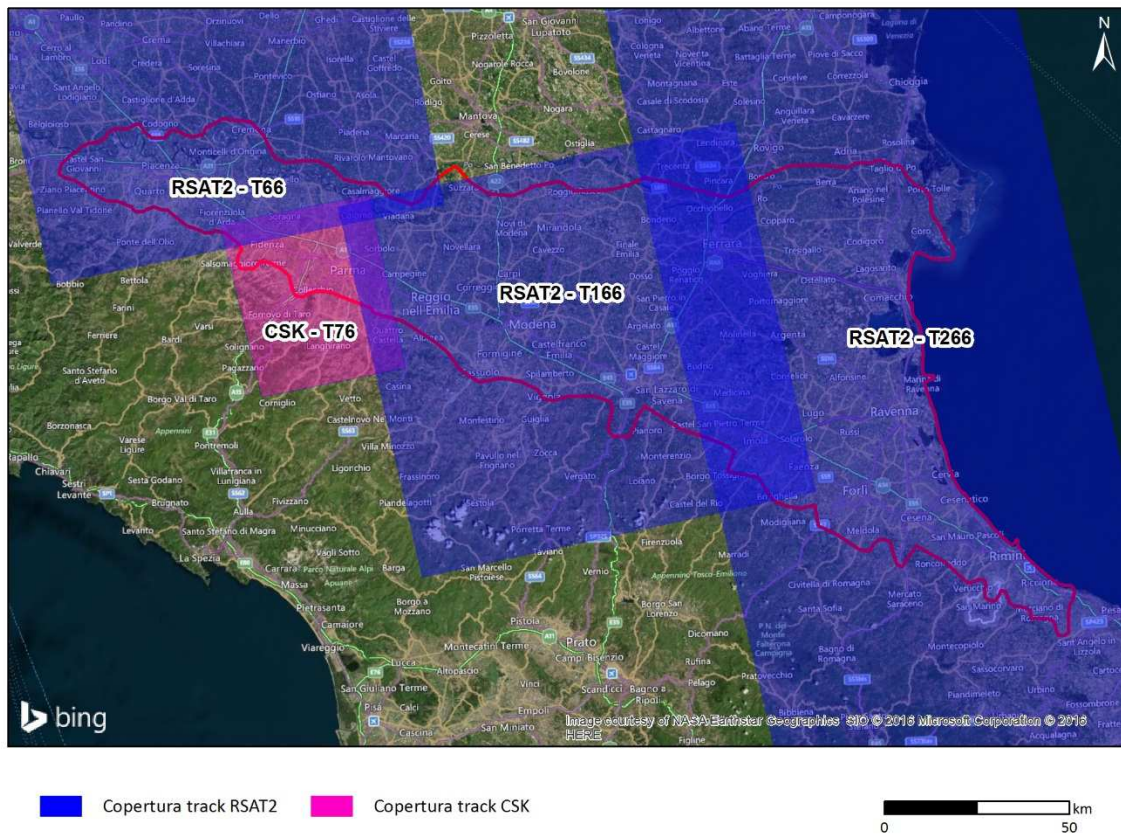


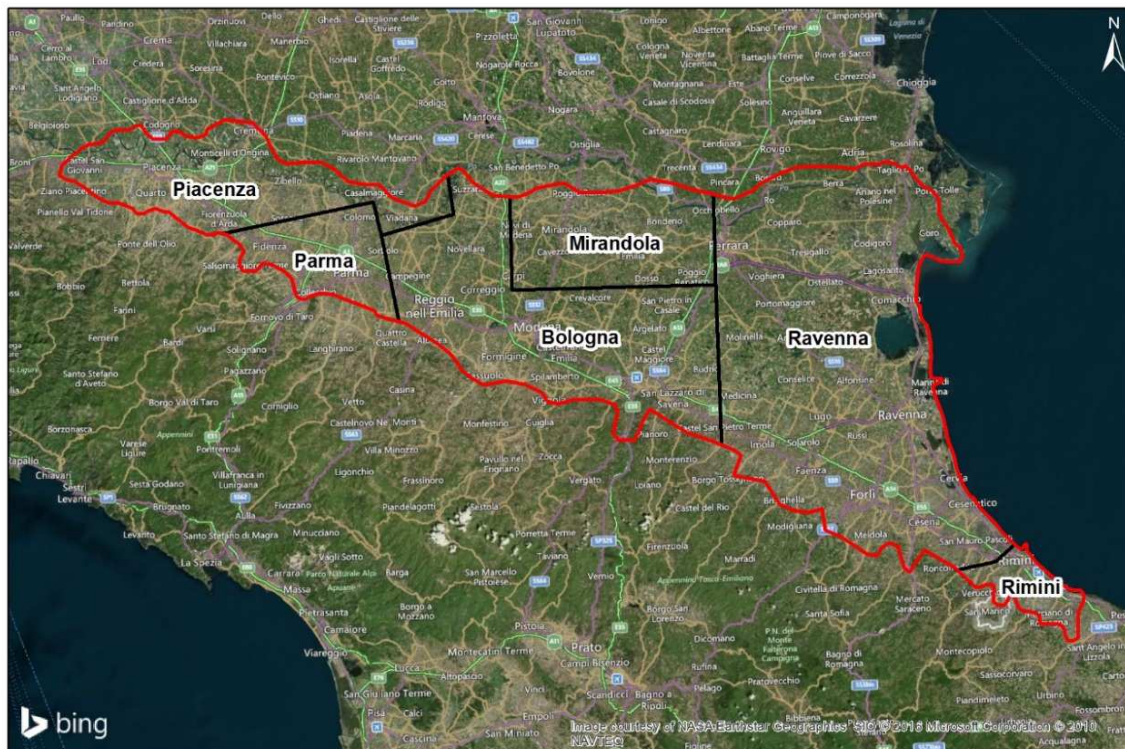
Fig. 3 - Copertura delle immagini RSAT2 e CSK disponibili sull'area d'indagine

3.2 Definizione e preparazione dei siti di elaborazione

Sulla base dei dati disponibili negli archivi e delle rispettive coperture a terra, è stato necessario definire dei siti di elaborazione diversi rispetto ai siti del precedente rilievo.

La *Figura 4* riporta l'estensione dei siti di elaborazione definiti sulla base delle coperture dei tre satelliti utilizzati. La *Tabella 1* riporta la sintesi dei relativi dataset congiunti oggetto di elaborazione.

Gli eventi sismici che hanno coinvolto l'area di Mirandola nel Maggio 2012 hanno reso necessario che l'omonimo sito fosse elaborato autonomamente. Infatti, le immagini acquisite in corrispondenza degli eventi sismici (maggio 2012) risultavano affette da movimenti troppo elevati per poter essere elaborate insieme alle immagini registrate successivamente. Di conseguenza, per tale sito, il periodo di copertura delle immagini utilizzate risulta più breve di un anno rispetto agli altri siti (vedi *Tabella 1*)



Limite siti elaborazione
 Area d'indagine

km
 0 50

Fig. 4 - Estensione e denominazione dei 6 siti elaborati (in nero) all'interno dell'area d'indagine (in rosso)

Sito	Satelliti	θ	# Immagini	Periodo coperto
Piacenza	RSAT1 – RSAT2	34,1°	73	24/05/2011 – 09/05/2016
Parma	CSK	34°	66	03/05/2011 – 14/04/2016
Bologna	RSAT1 – RSAT2	34°	69	07/05/2011 – 16/05/2016
Mirandola	RSAT1 – RSAT2	34,7°	55	06/06/2012 – 16/05/2016
Ravenna	RSAT1 – RSAT2	33°	75	14/05/2011 – 23/05/2016
Rimini	RSAT1 – RSAT2	34,7°	70	02/05/2011 – 23/05/2016

Tabella 1- Caratteristiche dei siti elaborati

4. Analisi interferometrica

4.1 Introduzione

Nel 2011-12 Arpa (ora Arpae), su incarico della Regione Emilia-Romagna e in collaborazione con il Dicam dell'Università di Bologna, realizzò il rilievo dei movimenti verticali del suolo sull'area di pianura della regione Emilia-Romagna¹, utilizzando il metodo dell'analisi interferometrica di dati radar satellitari con tecnica SqueeSAR™ (algoritmo PSInSAR™ di seconda generazione). Tramite tale rilievo fu aggiornata la carta delle velocità di movimento verticale del suolo relativamente al periodo 2006-11.

Con il presente lavoro, si è proceduto ad aggiornare al periodo 2011-16 le conoscenze geometriche sul fenomeno della subsidenza già acquisite con il precedente rilievo, continuando ad utilizzare la tecnica SqueeSAR™ ulteriormente affinata.

4.2 Risultati analisi SqueeSAR™ sui singoli siti di elaborazione

Le analisi condotte hanno permesso di ottenere un totale di quasi 2.000.000 di punti di misura (MP) sull'intera area d'interesse. Come noto, la distribuzione dei punti di misura dipende principalmente dall'uso del suolo. Le densità massime si ottengono in corrispondenza dei centri abitati e delle infrastrutture antropiche mentre nelle aree coltivate e/o vegetate la densità risulta sensibilmente più bassa. Nei paragrafi successivi sono mostrati in dettaglio i risultati ottenuti sui singoli siti di elaborazione.

Si ricorda che tutte le misure di spostamento sono rilevate lungo la linea di vista del satellite (LOS - *Line of Sight*) e sono riferite ad un punto di riferimento (REF) indipendente per ogni sito elaborato. Il REF viene scelto in fase di elaborazione su base statistica e deve essere tale da mantenere una stabilità di ampiezza e fase in tutto il dataset analizzato.

Si ricorda inoltre che i dati SqueeSAR™ sono associati a due indici di precisione: la deviazione standard della velocità media e la coerenza temporale (cfr. Appendice II).

La **deviazione standard** (V_STDEV) per definizione è un indice che misura il grado di dispersione di una popolazione di dati attorno al valore medio. Questa misura (indicata spesso con σ) è solitamente utilizzata per quantificare il grado di precisione di un insieme di misure. Ipotizzando infatti di conoscere la deviazione standard e supponendo una distribuzione normale degli errori (ovvero gaussiana), il 95% dei valori tende ad essere incluso nell'intervallo $\pm 2\sigma$ rispetto al valor medio. Nel caso di analisi SqueeSAR™ la deviazione standard si riferisce alla velocità media dei punti di misura rispetto al punto di riferimento. La deviazione standard dipende da diversi fattori, in particolare la distanza fisica dal REF, la qualità radiometrica del punto di misura, il numero di immagini elaborate, nonché la lunghezza dell'intervallo analizzato e la continuità temporale di acquisizione delle immagini.

La **coerenza temporale** (COHERENCE) è un indice che misura quanto bene il moto stimato segue un modello analitico. Stabilire un modello analitico per il moto significa pensare il moto stesso secondo una certa funzione matematica. Le serie temporali delle analisi SqueeSAR™ vengono confrontate con modelli di tipo polinomiale e sinusoidale. Ogni serie temporale di movimento viene confrontata con il modello, il risultato del confronto è l'indice detto coerenza temporale. Il valore della coerenza temporale è compreso tra 0 (nessuna coerenza - il punto non ha nessuna attinenza con il modello utilizzato ed è quindi inaffidabile)

¹ Regione Emilia-Romagna - Arpa (2011): *Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola-Prima fase*. A cura di F. Bonsignore, Bologna, Arpa Direzione Tecnica.

Regione Emilia-Romagna - Arpa (2012): *Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola-Seconda fase*. A cura di F. Bonsignore, Bologna, Arpa Direzione Tecnica.

ed 1 (massima coerenza). Il valore 1 assume il significato che ogni misura contenuta nella serie temporale è perfettamente giustificata dal modello matematico, ed è ovviamente un caso limite.

La Tabella 2 sintetizza i valori medi di deviazione standard e coerenza ottenuti per ogni sito. Si noti che tutti i valori di deviazione standard sono compresi entro 1 mm/anno, ad indicare l'ottima precisione delle misure ottenute.

Sito	V_STDEV [mm/anno]	COHERENCE [-]
Piacenza	0,33	0,83
Parma	0,36	0,79
Bologna	0,31	0,85
Mirandola	0,39	0,90
Ravenna	0,29	0,83
Rimini	0,27	0,88

Tabella 2 - Valori medi di deviazioni standard della velocità media e coerenza temporale

4.3 Sito di elaborazione di Piacenza

Su questo sito sono stati individuati circa 140.000 punti di misura (MP), con una densità media di 85 MP/Km². La distribuzione dei punti, visualizzati per velocità media annua e relativa deviazione standard è mostrata in *Figura 5*.

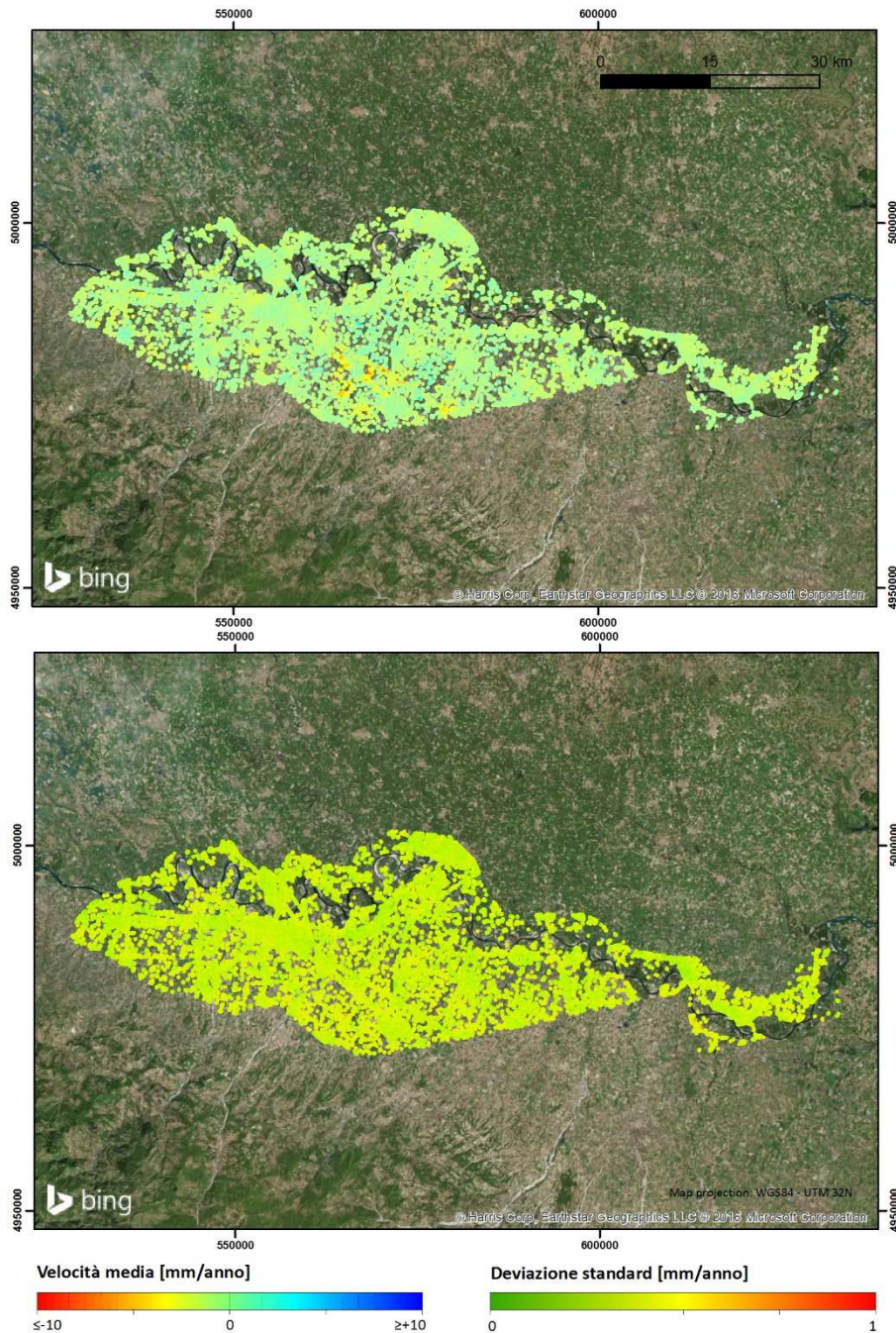


Fig. 5 - Velocità media annua (in alto) e relativa deviazione standard (in basso) dei punti individuati con l'elaborazione del sito di Piacenza

4.4 Sito di elaborazione di Parma

Per questo sito è stato necessario utilizzare immagini acquisite dalla costellazione CSK, poiché non risultava coperto da acquisizioni storiche RSAT2. Questo satellite opera in banda X, con una risoluzione spaziale di 3x3 metri. Grazie alla più alta risoluzione spaziale, il numero di punti di misura individuati su questo sito risulta sensibilmente maggiore rispetto agli altri (circa 1.285.000 MP) e raggiunge una densità media di 1.600 MP/km². La distribuzione dei punti, visualizzati per velocità media annua e relativa deviazione standard è mostrata in *Figura 6*.

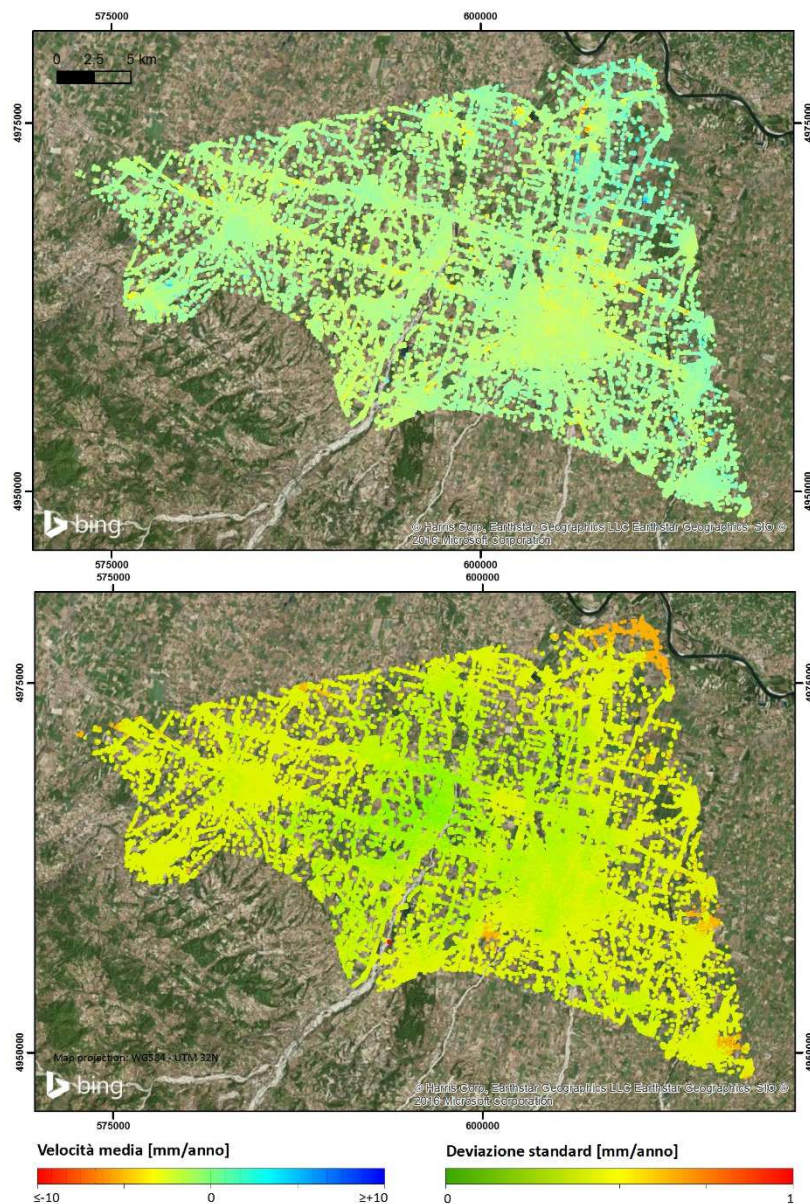


Fig. 6 - Velocità media annua (in alto) e relativa deviazione standard (in basso) dei punti individuati con l'elaborazione del sito di Parma

4.5 Sito di elaborazione di Bologna

Su questo sito sono stati individuati circa 166.000 punti di misura, con una densità media di 55 MP/Km². La distribuzione dei punti, visualizzati per velocità media annua e relativa deviazione standard è mostrata in *Figura 7*.

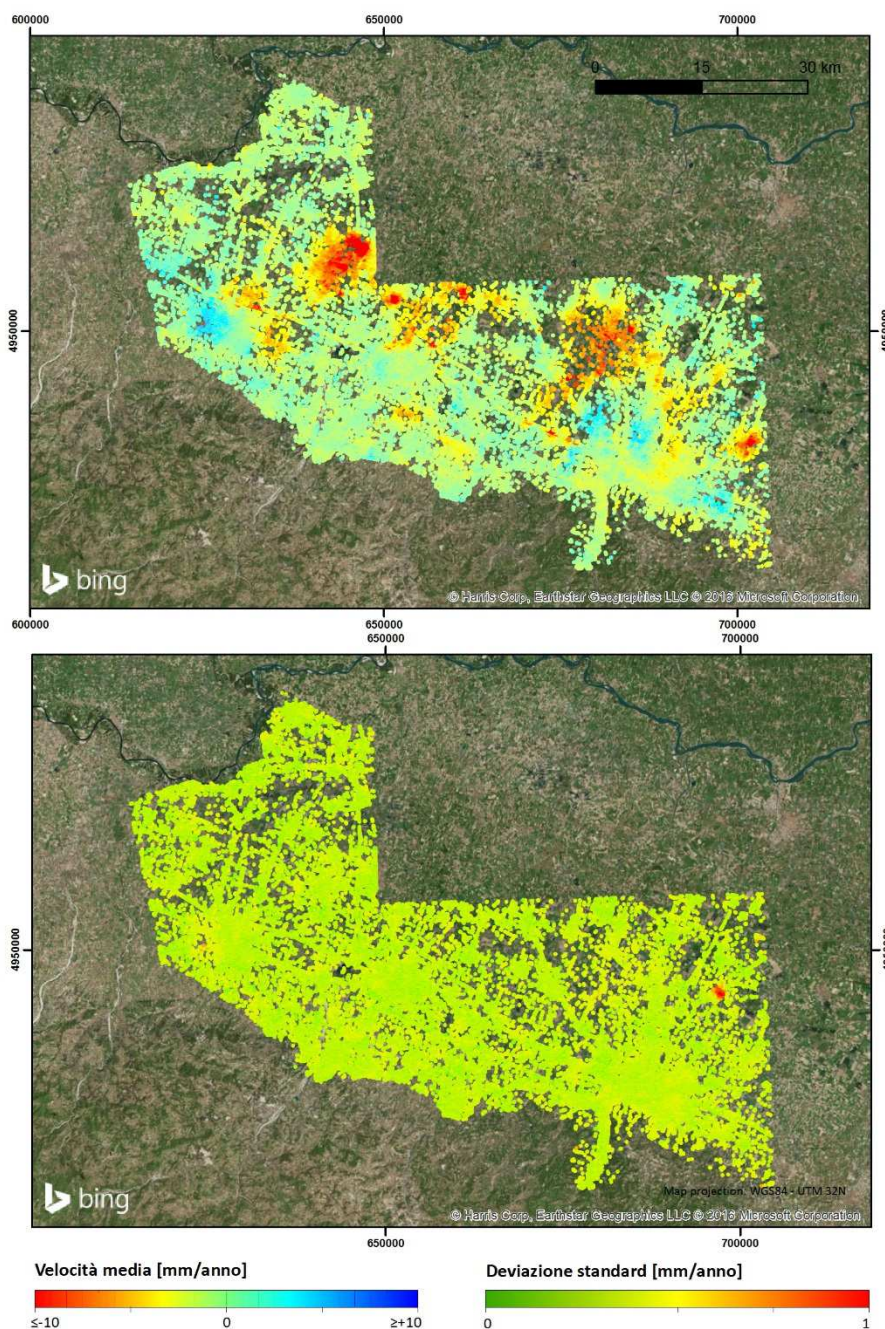


Fig. 7 - Velocità media annua (in alto) e relativa deviazione standard (in basso) dei punti individuati con l'elaborazione del sito di Bologna

L'areale bolognese, storicamente interessato dai fenomeni di subsidenza più consistenti, mostra nel periodo 2006-2011 una drastica riduzione dei tassi di abbassamento ed anche zone in leggero sollevamento. Un dettaglio del campo di velocità media è mostrato in *Figura 8*. Alcune serie storiche di esempio sono riportate in *Figura 9*.

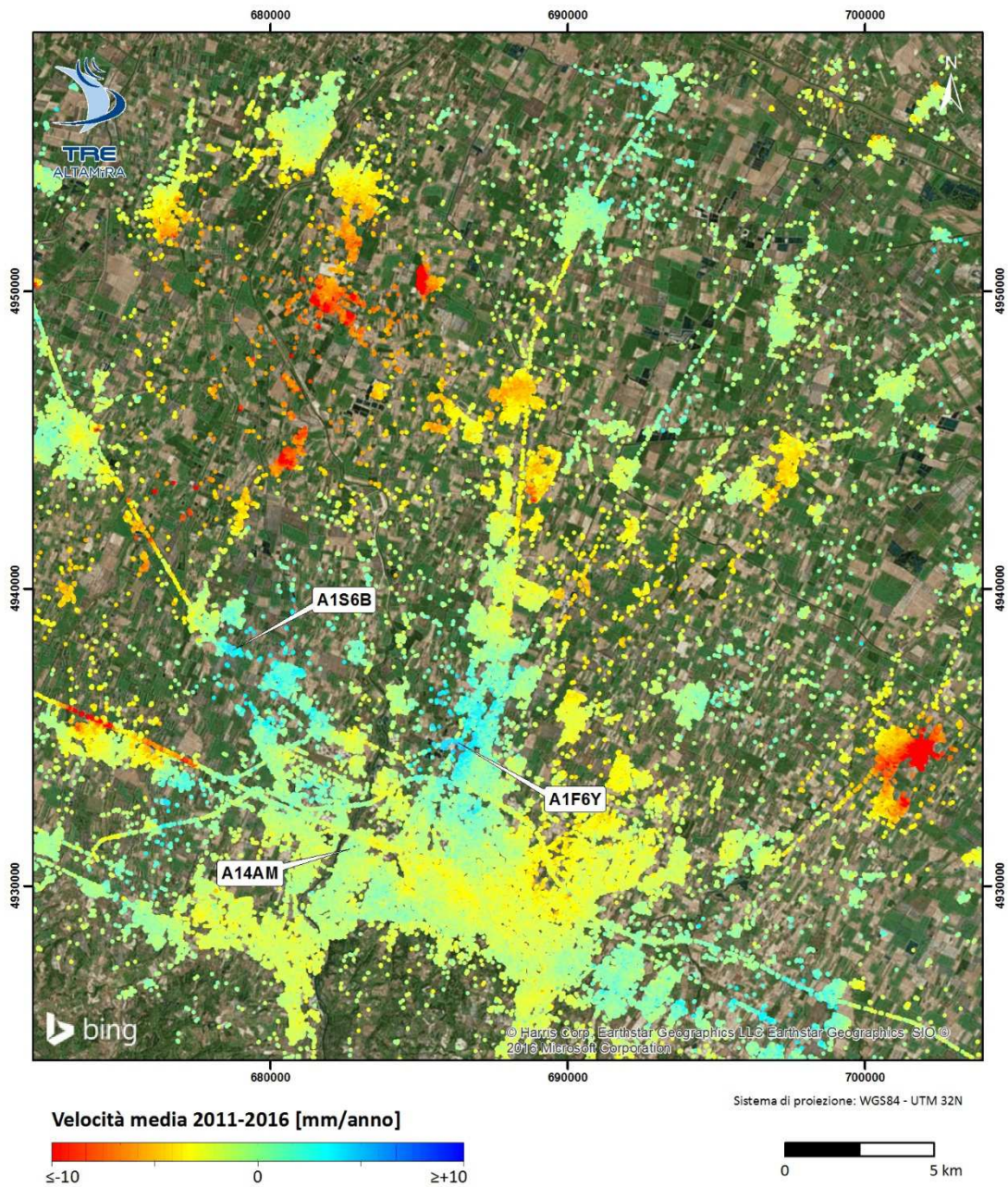


Fig. 8 - Dettaglio della velocità media annua, periodo 2011-2016, nell'area di Bologna

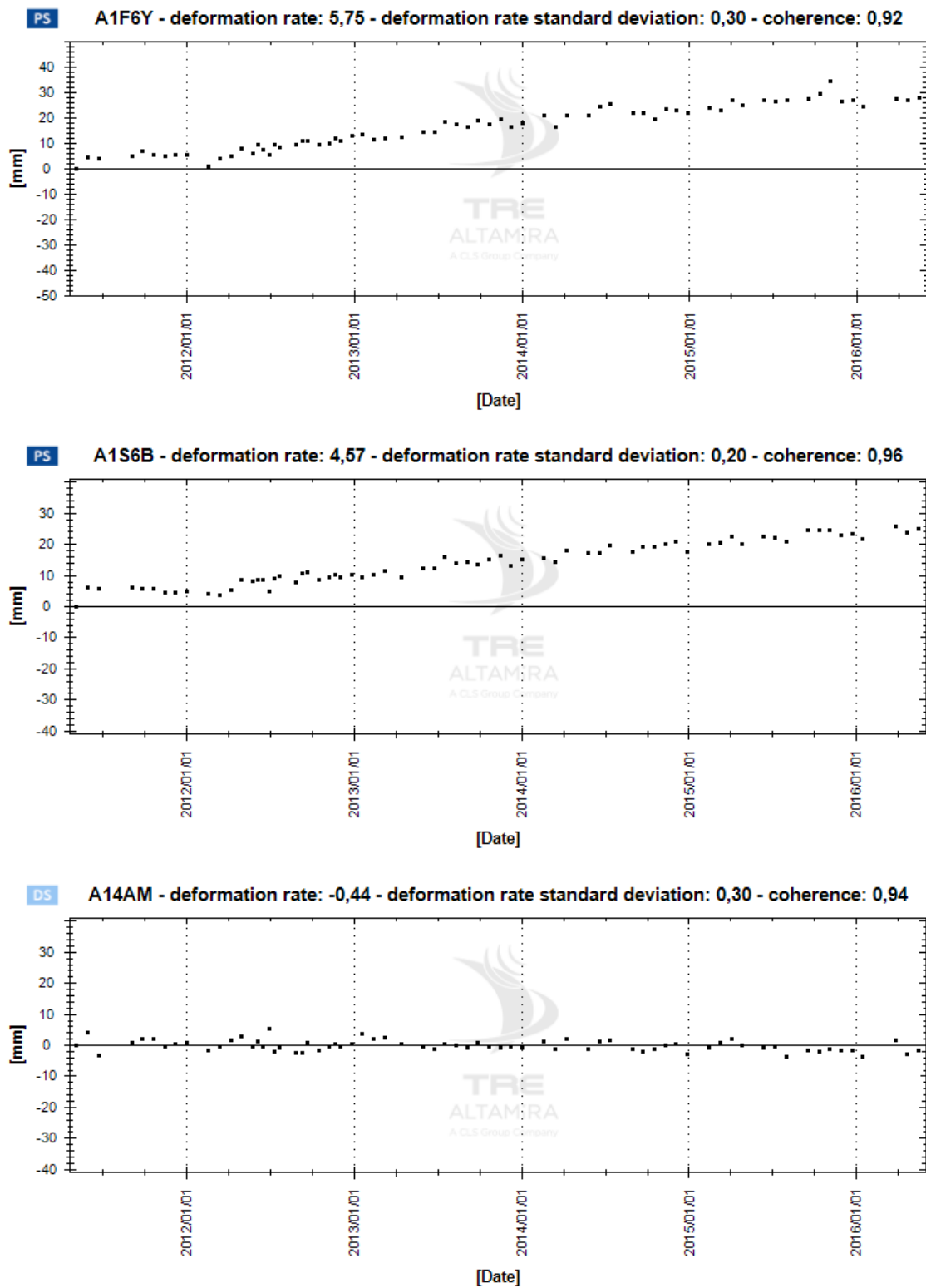


Fig. 9 - Serie storiche di spostamento dei punti evidenziati in Fig. 8

4.6 Sito di elaborazione di Mirandola

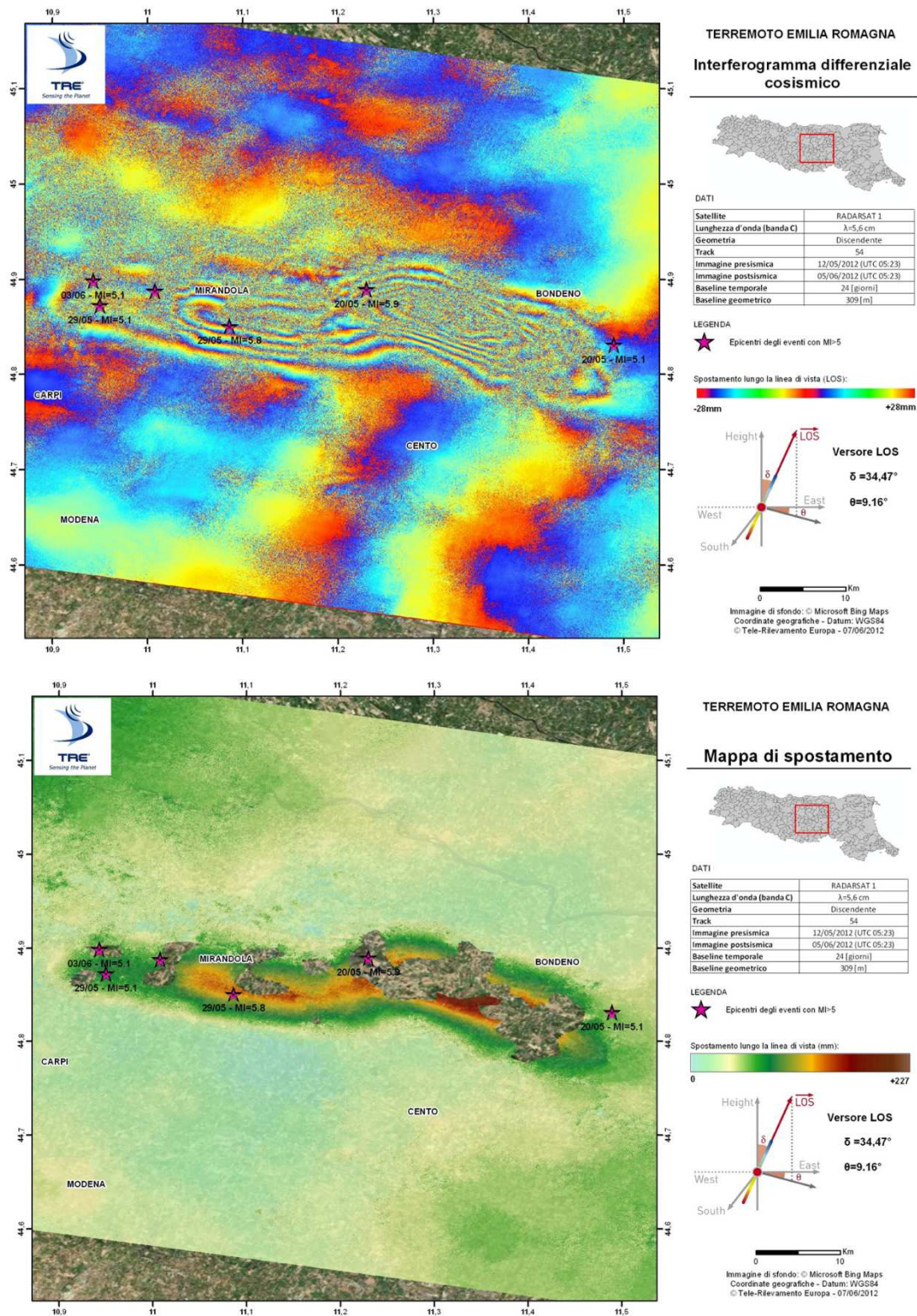
Come anticipato al paragrafo §3.2, per questo sito è stato necessario condurre un'elaborazione a se stante a causa degli eventi sismici che hanno coinvolto l'area di Mirandola nel maggio del 2012.

A titolo informativo, la *Figura 10* mostra i risultati di un'analisi DInSAR tradizionale (interferogramma e relativa mappa di spostamento) realizzati da TRE subito dopo gli eventi sismici del 2012. Come noto, una analisi DInSAR fornisce misure monodimensionali e con precisione centimetrica su moti veloci (oltre qualche cm/anno) avvenuti a cavallo di due acquisizioni. Il confronto tra queste due immagini SAR restituisce un interferogramma, una mappa che mostra la differenza tra i valori di fase del segnale radar tra le due acquisizioni. Gli spostamenti occorsi tra le due immagini sono evidenziati dalla presenza di frange interferometriche (bande colorate concentriche). Ogni frangia corrisponde ad una variazione di fase pari a 2π radianti che si traduce in uno spostamento del bersaglio pari a metà della lunghezza d'onda del radar utilizzato.

Se un'area rilevata dal radar mantiene tra le due acquisizioni caratteristiche omogenee in termini di riflessione dell'onda elettromagnetica, si usa parlare di area coerente. Nel caso di aree coerenti è possibile convertire le informazioni di fase dell'interferogramma in una mappa di spostamento. La conversione consiste nella risoluzione dell'ambiguità dei valori di fase, che sono ciclicamente ripetuti, in una misura di distanza (*phase unwrapping*). La mappa di spostamento rappresenta quindi la deformazione occorsa tra le due immagini utilizzate per creare l'interferogramma, misurata lungo la direzione di vista del satellite.

Dai dati DInSAR elaborati dopo gli eventi sismici, utilizzando le immagini acquisite dal satellite RSAT1 il 12/05/2012 ed il 05/06/2012, si osserva che nell'area di Mirandola il terreno ha subito un innalzamento di oltre 20 cm a seguito dei due principali eventi sismici del 20 Maggio e 29 Maggio 2012.

Le estese deformazioni che hanno interessato quest'area hanno impedito di effettuare un'elaborazione SqueeSAR™ a cavallo dell'evento, a causa dell'impossibilità di stimare correttamente l'entità del moto dall'interferogramma cosismico. Al fine di garantire un risultato SqueeSAR™ anche su questa area, è stato necessario elaborare unicamente le immagini acquisite dopo tali eventi sismici.



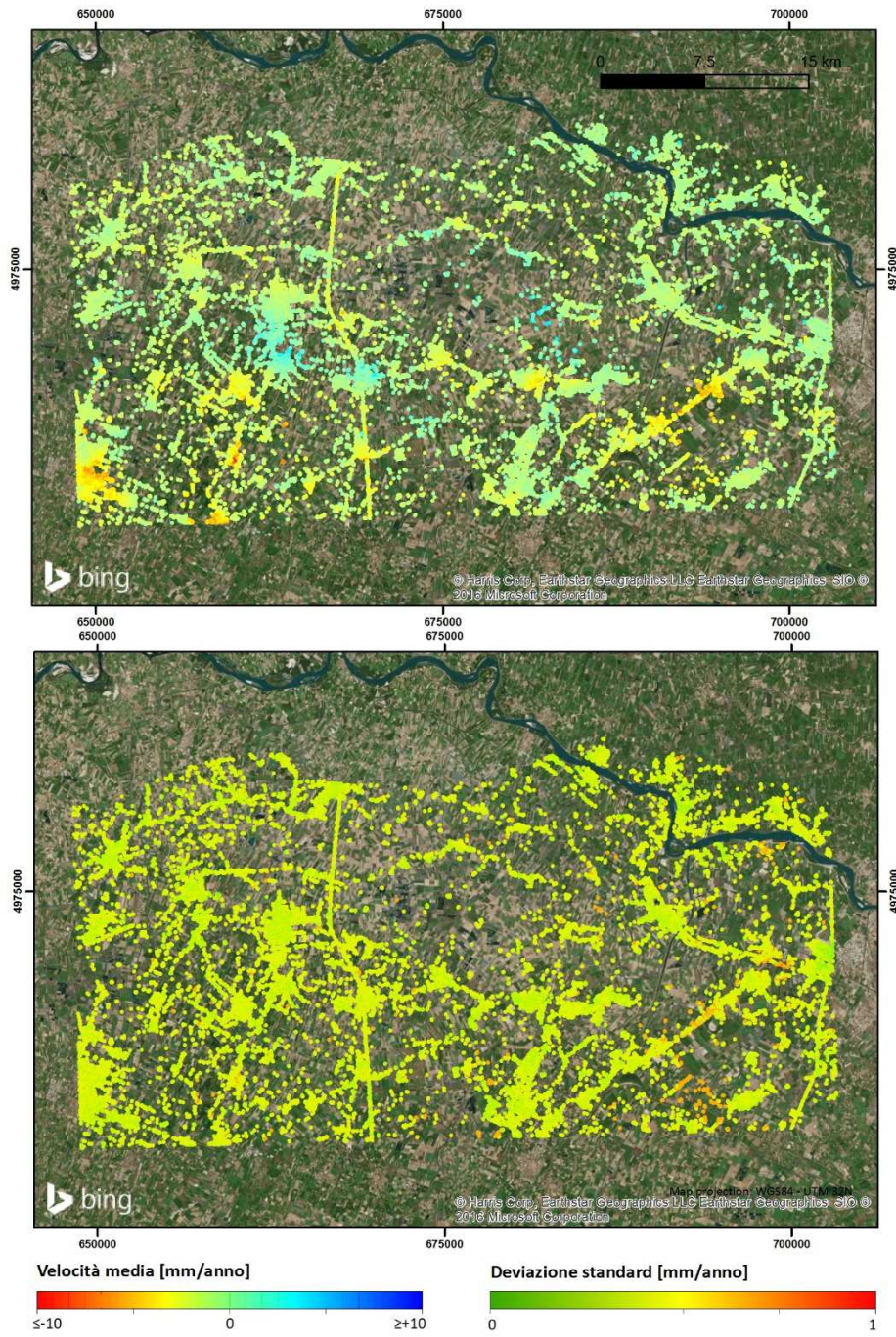


Fig. 11 - Velocità media annua (in alto) e relativa deviazione standard (in basso) dei punti individuati con l'elaborazione del sito di Mirandola

4.7 Sito di elaborazione di Ravenna

Sul sito di Ravenna sono stati individuati circa 325.000 punti di misura (MP), con una densità media di 56 MP/Km². La distribuzione dei punti, visualizzati per velocità media annua e relativa deviazione standard è mostrata in *Figura 12*.

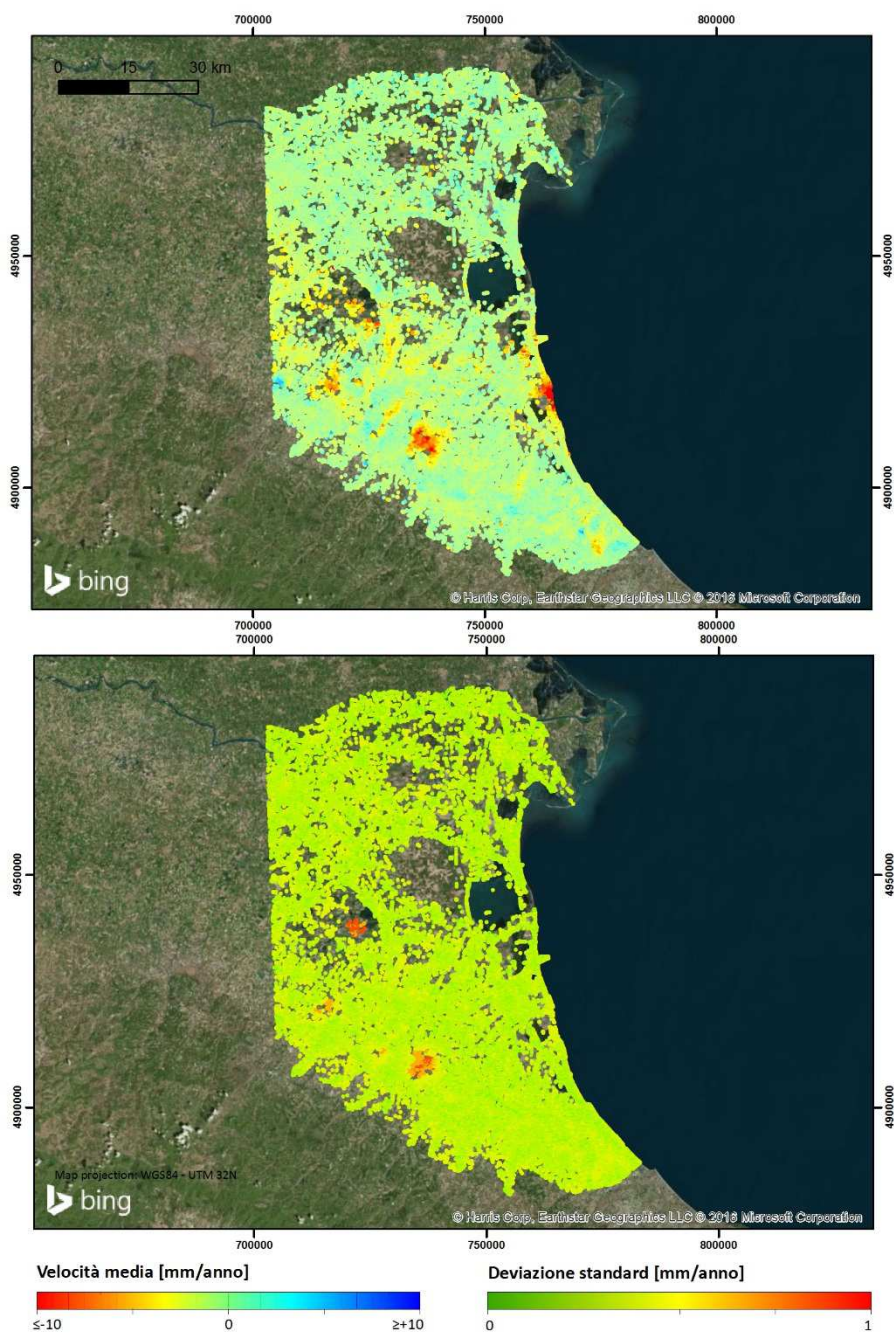


Fig. 12 - Velocità media annua (in alto) e relativa deviazione standard (in basso) dei punti individuati con l'elaborazione del sito di Ravenna

4.8 Sito di elaborazione di Rimini

Sul sito di Rimini sono stati individuati circa 20.000 punti di misura (MP), con una densità media di 56 MP/Km². La distribuzione dei punti, visualizzati per velocità media annua e relativa deviazione standard è mostrata in *Figura 13*.

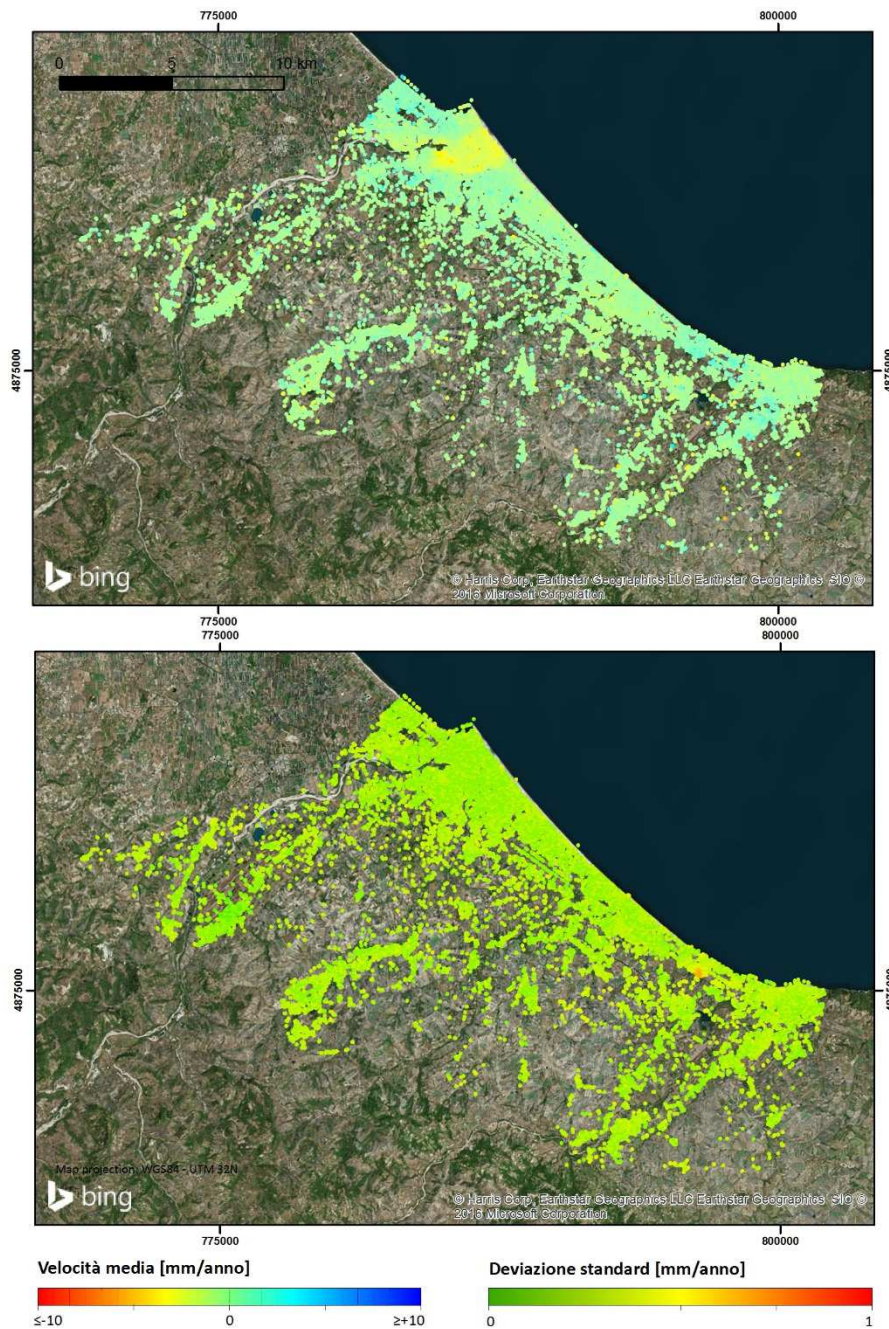


Fig. 13 - Velocità media annua (in alto) e relativa deviazione standard (in basso) dei punti individuati con l'elaborazione del sito di Rimini

5. Conclusioni

Nel 2016 Arpaè, su incarico della Regione Emilia-Romagna, ha avviato le attività inerenti l'aggiornamento delle conoscenze geometriche relativamente al fenomeno della subsidenza nell'ambito della pianura emiliano-romagnola. Il prodotto finale sarà la redazione di una nuova carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2011-2016, tramite la quale potranno essere valutate le variazioni intervenute rispetto al precedente monitoraggio relativo al periodo 2006-2011.

Il lavoro è stato diviso in due fasi successive. La prima fase, oggetto della presente relazione, riguarda la realizzazione dell'analisi interferometrica di dati radar satellitari. In particolare, sono state svolte le seguenti attività:

1. verifica della effettiva copertura territoriale delle immagini SAR relative al periodo 2011-2016, definizione e preparazione dei siti di elaborazione;
2. elaborazione SqueeSARTM dei singoli siti;

L'analisi ha fornito un totale di quasi 2.000.000 di punti di misura (MP) sull'intera area di pianura della regione. Un numero notevolmente superiore rispetto ai circa 320.000 MP del monitoraggio precedente. Tuttavia, va specificato che di tali punti, circa 1.285.000 riguardano il solo sito di Parma, per il quale è stato necessario utilizzare immagini acquisite da COSMO-SkyMed (CSK) dell'Agenzia Spaziale Italiana, poiché quest'area non risultava sufficientemente coperta da acquisizioni di RADARSAT-2 (RSAT2) dell'Agenzia Spaziale Canadese, come per il resto del territorio analizzato. Operando CSK con una risoluzione spaziale più alta rispetto a RSAT2, ecco che per l'area di Parma si è ottenuto un numero di punti che risulta superiore anche alla somma dei punti di tutti gli altri siti, circa 700.000 MP.

In ogni caso, anche solo questo ultimo dato, evidenzia una discretizzazione dell'informazione nettamente superiore rispetto all'analisi precedente.

Questi dati saranno utilizzati nell'ambito della seconda fase del lavoro, in cui verranno allineati a scala regionale e successivamente verificati e calibrati tramite l'utilizzo dei dati acquisiti da almeno 15 stazioni permanenti GPS. Infine, i dati calibrati permetteranno di realizzare la nuova carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2011-2016.

Questi primi risultati, quindi, nella seconda fase, potranno essere ulteriormente affinati, rispetto all'attuale stato dell'arte, tuttavia già ora ci restituiscono un quadro di massima piuttosto interessante.

Si nota, in particolare, la scomparsa quasi totale della subsidenza nel territorio bolognese, territorio che, come noto, da oltre 50 anni era soggetto ad abbassamenti i più importanti, sia per valori assoluti sia per vastità dell'areale interessato, rispetto al resto della pianura emiliano-romagnola, tanto da diventare un caso di studio equiparabile ad altri casi a livello mondiale. Il precedente rilievo aveva già evidenziato una tendenza alla riduzione degli abbassamenti, ma ora, possiamo osservare come, non solo il fenomeno sia regredito in quasi tutto l'areale, a parte qualche zona di depressione molto localizzata, ma anzi si presentino anche zone in leggero sollevamento. Nella seconda fase del lavoro, oltre alle attività già previste, si analizzeranno anche questi cambiamenti così marcati, ponendoli, in particolare, in relazione alla variazione del regime dei prelievi da falda intervenuta negli ultimi anni.

Per quanto riguarda la fascia litoranea, anch'essa storicamente soggetta a fenomeni di subsidenza antropica, si osserva ora una situazione di sostanziale stabilità - ferma restando la subsidenza naturale - con l'unica eccezione dell'areale in corrispondenza della foce dei F. Uniti in cui sembrano persistere abbassamenti dovuti certamente in parte a cause antropiche.

Un'analisi dettagliata e quantitativa del fenomeno sarà possibile solo con la seconda fase del lavoro, allorquando si potrà disporre di dati verificati e calibrati.

Appendice I - Analisi interferometriche

Le tecniche avanzate di rilevamento da satellite degli spostamenti della superficie terrestre sono note come interferometria SAR (InSAR).

I sistemi radar coerenti e, nello specifico, i radar di tipo SAR (Synthetic Aperture Radar) sono in grado di misurare la distanza tra il sensore e un bersaglio a terra, registrando il tempo intercorso tra l'emissione dell'onda elettromagnetica e la ricezione del segnale retro-diffuso dal bersaglio stesso. Grazie alla loro periodicità di acquisizione, i dati SAR forniscono misure ripetute della distanza sensore-bersaglio lungo la direzione di vista del satellite (LOS). Il confronto della distanza, misurata in istanti di tempo diversi, consente di mettere in luce eventuali spostamenti dei bersagli al suolo.

La tecnica convenzionale per lo studio dei dati SAR è l'interferometria differenziale (**DInSAR**) e si basa sul confronto tra due immagini distinte, acquisite sulla stessa area di interesse. Essa tuttavia risente di alcuni effetti che riducono, o addirittura compromettono, la qualità dei risultati.

Grazie al Politecnico di Milano, che ha sviluppato e brevettato l'algoritmo **PSInSAR**TM, è nata una seconda generazione di tecniche interferometriche, conosciute come Persistent Scatterer Interferometry (PSI).

In particolare, la tecnica **PSInSAR**TM, che è stata concessa in licenza esclusiva a TRE ALTAMIRA, sfrutta tutte le acquisizioni disponibili su una stessa area di interesse per individuare quei bersagli a terra (i Permanent Scatterers), che mantengono inalterate nel tempo le proprie caratteristiche elettromagnetiche. Per ciascuno di essi è possibile ricostruire le velocità medie e la serie storica di spostamento nell'intervallo di tempo analizzato, con precisione millimetrica. I PS corrispondono tipicamente a edifici, rocce esposte e altri rilevati.

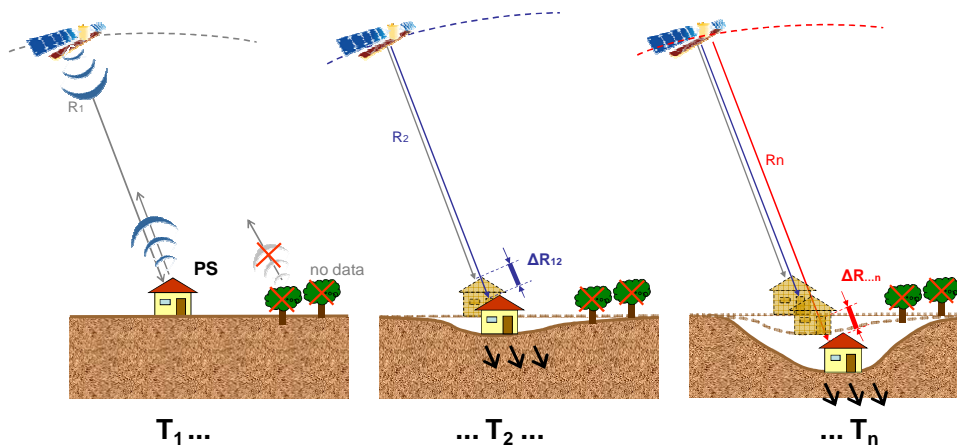


Fig. 1 - Concetto base delle analisi interferometriche: il confronto tra misurazioni successive della distanza sensore-bersaglio permette di determinare spostamenti del terreno

Le misure sono possibili solo in corrispondenza di bersagli radar con caratteristiche elettromagnetiche specifiche: punti già presenti al suolo (*scatterers*) che sono visibili in tutte le immagini acquisite nel periodo di osservazione e che mantengono una sufficiente stabilità nel tempo (*permanent*) del cosiddetto segnale di fase. Quest'ultimo è proprio l'elemento che contiene l'informazione relativa alla posizione al suolo e alla distanza del bersaglio dal satellite. Poiché i segnali utilizzati hanno lunghezze d'onda centimetriche (microonde),

spostamenti anche di pochi millimetri inducono degli sfasamenti tra un'onda e la successiva (es. R_{n-1} vs. R_n) che possono essere rilevati.

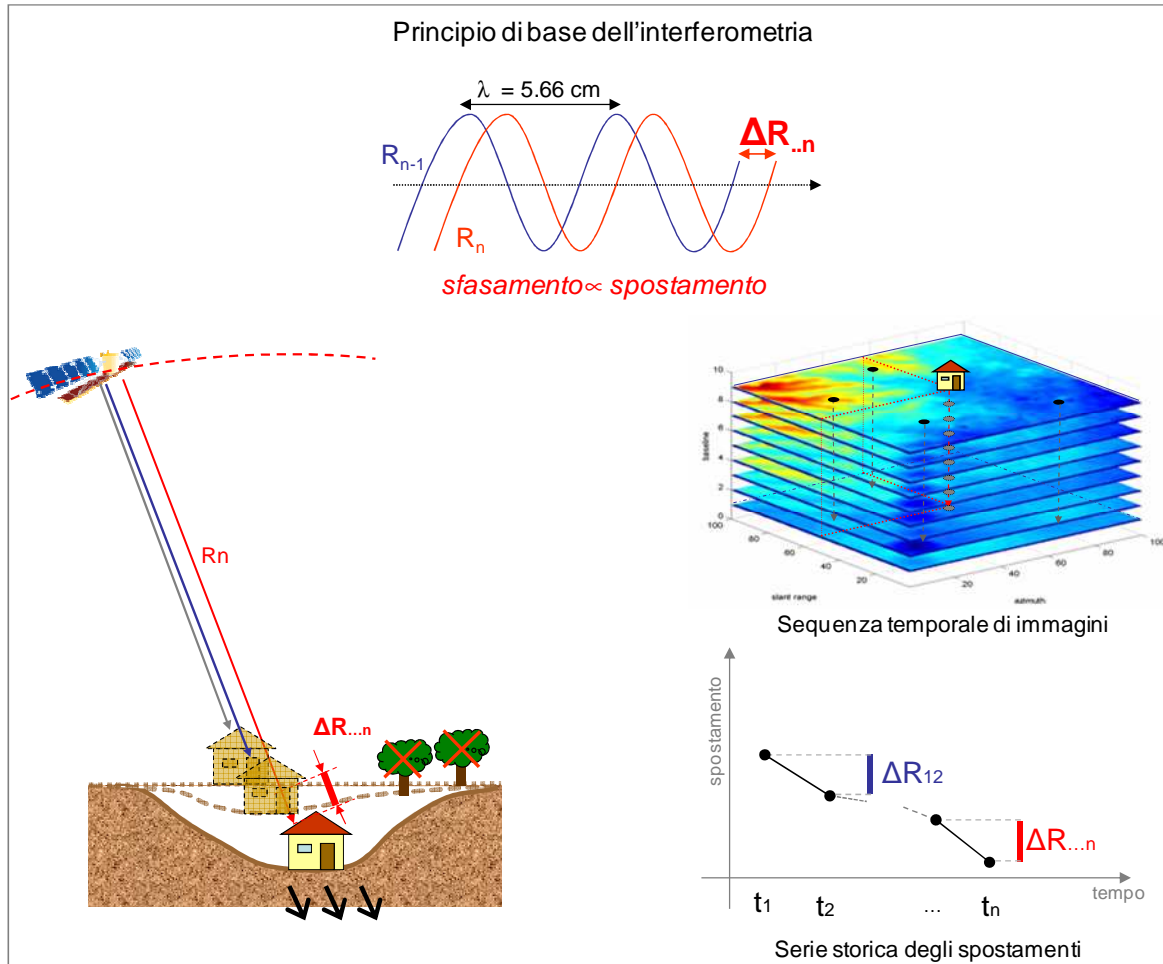


Fig. 2 - Rappresentazione schematica del principio di base dell'interferometria per la misura di spostamenti rilevando gli sfasamenti di onde successive; estensione del principio per il calcolo delle serie storiche di spostamento di bersagli al suolo

A distanza di dieci anni dal brevetto PSInSAR™, TRE ALTAMIRA ha sviluppato un nuovo algoritmo proprietario, **SqueeSAR™**, che rappresenta un ulteriore traguardo nel campo dell'interferometria e una soluzione avanzata per il monitoraggio di tutte le aree extra-urbane, dove la densità delle misure PS può talvolta risultare non soddisfacente. L'innovazione consiste nell'aver individuato una nuova famiglia di "bersagli" monitorabili da satellite, i cosiddetti Distributed Scatterer o DS, che si vanno così ad aggiungere ai PS.

I dati, in un'immagine radar, provengono da bersagli di varia natura a terra. È possibile classificare i pixel dell'immagine in due famiglie di bersagli: i bersagli puntiformi, che caratterizzano un solo pixel, o al più pochi altri pixel ad esso connessi, e i bersagli distribuiti, che caratterizzano tutto un gruppo di pixel, e che generano caratteristiche pressoché identiche del segnale radar riflesso. I primi rappresentano i già noti PS, mentre i secondi costituiscono la nuova famiglia dei DS.

A differenza di un target puntiforme, dove l'energia retro-diffusa verso il sensore risulta elevata e concentrata in un'area molto ridotta, l'intensità dell'eco radar per un pixel appartenente a un DS è solitamente meno forte, perché manca un bersaglio dominante. D'altra parte, l'utilizzo congiunto di tutti i pixel appartenenti al DS permette di ridurre il rumore presente nei dati, migliorando in modo significativo la qualità della stima, tanto che le serie storiche di movimento di un DS appaiono meno rumorose.

Esempi di target distribuiti sono le aree detritiche, i campi non coltivati, le aree desertiche non sabbiose. È importante sottolineare come il nuovo approccio di analisi contenga in sé anche la catena di processing delle misure PS. Questo significa che i PS continueranno a esistere accanto ai DS.

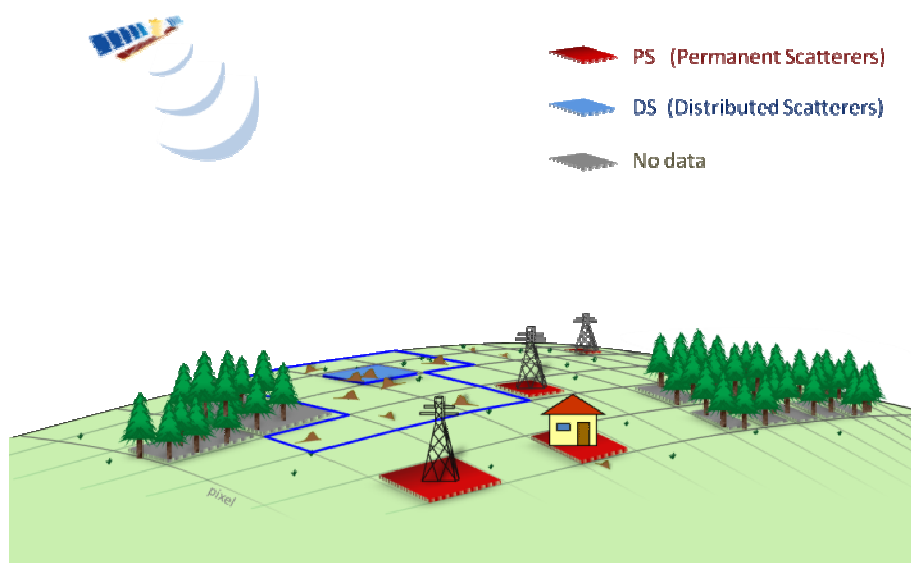


Fig. 3 - Rappresentazione schematica dei diversi bersagli monitorabili da satellite

Che cosa si può ottenere con le analisi SqueeSAR™

In generale la tecnologia di elaborazione dei dati satellitari SqueeSAR™ permette di:

- **Misurare deformazioni nell'ordine del millimetro**
Le misure interferometriche sono state validate tramite confronto con misure da rete GPS, leveling topografico, inclinometri e altro
- Studiare l'**evoluzione degli spostamenti nel tempo** e identificare **trend stagionali** attraverso le serie storiche di spostamento
- Ricostruire **dinamiche di spostamento passate**: l'esistenza di archivi storici di dati satellitari permette di ricostruire, in molte aree di interesse nel mondo, dinamiche di spostamento a partire dal 1992. Nessun'altra tecnologia può fare altrettanto
- Identificare **movimenti non lineari**: le più recenti innovazioni nell'algoritmica di elaborazione delle immagini satellitari hanno reso possibile anche l'analisi di deformazioni non lineari
- Determinare le **componenti verticale e orizzontale della velocità di spostamento** dei punti.

- Se il satellite acquisisce sulla stessa area di interesse in entrambe le modalità (ascendente e discendente), combinandole è possibile misurare le componenti verticale e orizzontale (in direzione est-ovest) della velocità di spostamento dei punti di misura.
- Effettuare **analisi multi scala**: da satellite è possibile monitorare aree estese fino a 10.000 km² con costi molto ridotti rispetto ad altre tecniche tradizionali, guadagnando una visione sinottica su città, bacini, pianure alluvionali, intere catene montuose.
- **Integrare altre fonti di dati**: i sono complementari ad altre tecniche di misurazione come il rilievo GPS, il leveling topografico, i tiltmetri, la microsismica, ecc. estendendo i risultati di queste indagini ad aree molto più ampie. Inoltre possono fornire utili indicazioni per progettare o migliorare la dislocazione di reti di monitoraggio a terra.

Che cosa è possibile misurare

Come già accennato nei paragrafi precedenti, la tecnica consente di identificare alcuni bersagli a terra passibili di misure estremamente accurate. Ma che cosa è possibile misurare effettivamente?

I satelliti acquisiscono lungo una direzione inclinata di alcuni gradi (da 23 a 45) rispetto alla verticale (linea di vista del satellite - Line Of Sight, LOS). Questo significa che i movimenti misurati sono in realtà **la proiezione degli spostamenti reali lungo la congiungente sensore-bersaglio**.

Di fatto si tratta quindi di misure monodimensionali.

La proiezione del movimento rilevato lungo altre direzioni, quali ad esempio la direzione di massima pendenza di un versante, può essere effettuata previa definizione delle ipotesi di reale direzione del moto e delle condizioni al contorno. In ogni caso questa operazione, che prevede di fatto un'ipotesi di interpretazione del dato, avviene in accordo con il committente. TRE ALTAMIRA si impegna a fornire la massima assistenza e disponibilità per consentire al committente una corretta lettura dei risultati forniti.

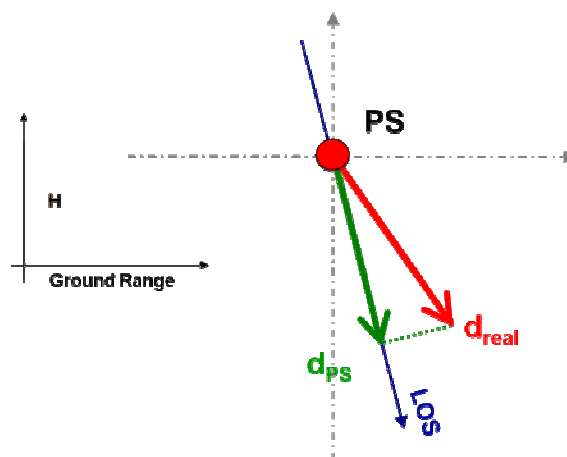


Fig. 4 - Il movimento rilevato è quello della proiezione del movimento reale nella direzione della linea di vista del satellite (LOS)

È importante ricordare come tutte le misure di movimento siano misure relative, nel tempo e nello spazio. L'analisi prevede infatti l'utilizzo di un'immagine di riferimento, chiamata

immagine *master*, che rappresenta lo “zero temporale”, cui riportare le misure di spostamento. Inoltre, le misure sono relative ad un “caposaldo radar” assunto fermo (reference point, REF).

Geometrie di acquisizione

I satelliti radar percorrono orbite elio-sincrone lievemente inclinate rispetto ai meridiani terrestri. Dalla combinazione della rotazione terrestre con le orbite del satellite, risulta che una stessa area della superficie terrestre viene illuminata dal sensore sia durante un passaggio del satellite in direzione Nord-Sud, denominata geometria discendente, sia durante un passaggio del satellite in direzione Sud-Nord, denominata geometria ascendente. Entrambe le geometrie hanno lo stesso tempo di rivisitazione. L'angolo di incidenza della radiazione emessa dipende dal sensore utilizzato.

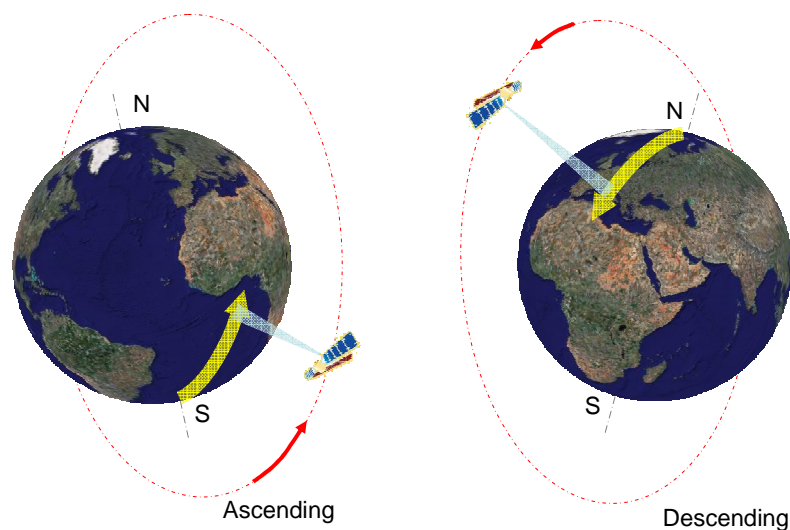


Fig. 5 - geometrie di acquisizione ascendente e discendente

Note sulla scomposizione del moto

Utilizzando una sola geometria di acquisizione, non è in generale possibile distinguere i vari contributi di spostamento. Tuttavia, se si dispone, per una stessa area di interesse, di dati acquisiti sia in modalità ascendente che discendente, si può procedere alla stima del vettore di spostamento in **direzione verticale** e in **direzione orizzontale est-ovest**. Una vera ricostruzione 3D del vettore spostamento non è tuttavia possibile, essendo la direzione Nord-Sud quasi parallela alla direzione di volo del satellite e, in quanto tale, praticamente cieca al sensore.

La disponibilità di dati acquisiti lungo traiettorie distinte permette in generale di: analizzare versanti reciprocamente non visibili nelle due geometrie, ottenere un incremento decisivo dei punti di misura, distinguere moti verticali da moti orizzontali.

La combinazione dei risultati ottenuti dall'elaborazione del data-set discendente e ascendente consente di scomporre il vettore di velocità stimato (che risulta orientato lungo la *LOS* del satellite) nelle componenti di deformazione in **direzione verticale** e in **direzione est-ovest**.

Per la configurazione della geometria di acquisizione, non risultano possibili stime del moto in direzione Nord-Sud, in quanto quest'ultima è quasi parallela all'orbita del satellite, direzione lungo la quale è impossibile rilevare variazioni "in range" poiché i satelliti acquisiscono perpendicolarmente ad essa.

Se il fenomeno di deformazione che interessa l'area in esame ha delle significative componenti in direzione orizzontale, i valori di velocità individuati dall'analisi delle due geometrie di acquisizione ascendente e discendente risultano diverse, come illustrato in Fig6

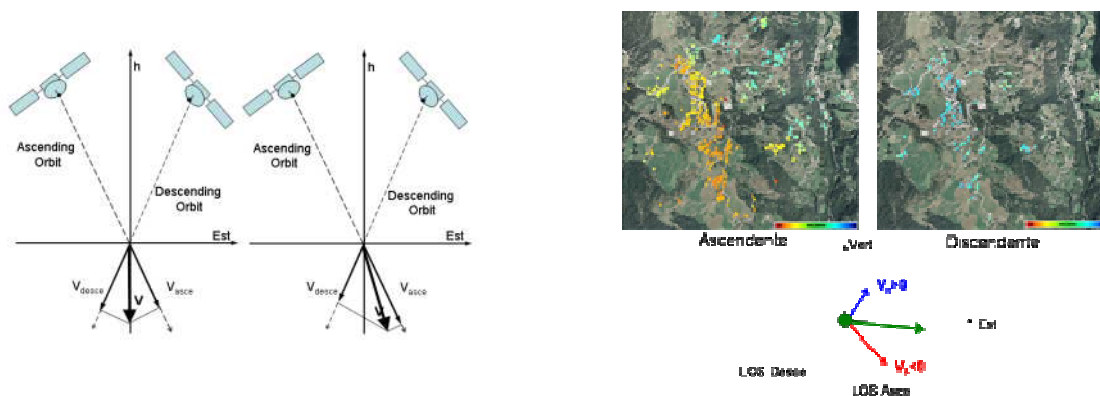


Fig. 6 - *Differenti punti di vista della velocità. Se il punto si muove solo lungo la direzione verticale, le proiezioni del moto lungo la LOS sono identiche per entrambe le geometrie; se il moto ha invece anche una componente orizzontale, le proiezioni risultano sensibilmente differenti*

Operativamente, a valle dei risultati della analisi SqueeSAR™ svolta su un'area è possibile procedere con la stima delle componenti orizzontale e verticale del moto.

L'area di interesse viene suddivisa in celle di 50x50m o di 100x100m il cui moto viene descritto da un singolo "pseudo PS". L'ipotesi è che tutti i PS all'interno della stessa cella presentino valori di spostamento simili così che il moto locale possa essere descritto mediante un unico vettore di spostamento. Sotto queste ipotesi le velocità e le serie storiche di spostamento di tutti i PS identificati all'interno della stessa cella con una medesima geometria di acquisizione (ascendente o discendente) vengono mediati e opportunamente proiettati per ottenere il risultato finale.

Aggiornamento delle misure

Per poter iniziare un'analisi SqueeSAR™ solitamente è necessario disporre di un dataset consistente in almeno 15-20 immagini satellitari. Ciò garantisce la robustezza dell'algoritmo di elaborazione e la qualità dei risultati. In seguito è possibile aggiornare i risultati a intervalli regolari (solitamente ogni 6 mesi o un anno). Data la natura statistica delle elaborazioni, è possibile che nei successivi aggiornamenti possa aumentare la quantità e il dettaglio dell'informazione fornita in sede di prima elaborazione: maggiore il numero dei dati, migliore la qualità delle stime.

Precisione delle misure

La precisione delle misure è funzione della distanza di ogni singolo punto di misura da quello di riferimento, come meglio specificato nel rapporto di elaborazione che sarà consegnato al cliente.

Si riportano in tabella 1, a titolo di esempio, i valori di precisione (90% del campione) relativi a misure di spostamento, per distanze inferiori a 1 km dal punto di riferimento (indipendentemente dal prodotto):

Velocità media	Spostamenti
sull'intero periodo di osservazione	(singolo valore della serie storica)
< 1 mm/year	< 5 mm

Tabella 3 - Precisione del dato PS a una distanza dal punto di riferimento < 1km per un dato ottenuto dall'analisi di un dataset di 5 anni

È importante sottolineare come SqueeSAR™ consista in un processo di elaborazione di immagini radar satellitari basato su modelli statistici e permetta di ottenere margini di affidabilità delle misure estremamente più elevati di quanto ricavabile con l'approccio interferometrico standard. Ad oggi, l'affidabilità del dato è inferiore a un punto spurio ogni 10.000 consegnati.

Visualizzazione dei risultati delle analisi

Per la visualizzazione delle misurazioni ottenute, è possibile importare i punti di misura su un qualsiasi supporto cartografico, in modo da favorire l'individuazione e l'interpretazione dei fenomeni in atto (la condizione ottimale è operare in ambiente GIS, dove l'utente può selezionare il layer opportuno).

Esistono soluzioni alternative, quali ad esempio la visualizzazioni ambienti web-gis, che tuttavia non sono a portafoglio di TRE ALTAMIRA, di conseguenza sono proposte a titolo sperimentale e quindi senza costi aggiuntivi e sempre previo accordo con il committente.

Applicazioni

I risultati delle elaborazioni con tecnica SqueeSAR™ costituiscono uno strumento unico di analisi del territorio che si va ad aggiungere al panorama delle tecnologie di monitoraggio tradizionali e che si presta all'utilizzo in diverse applicazioni.

- **Individuazione di aree soggette a subsidenza o sollevamento**
La tecnica è sempre più utilizzata da pubbliche amministrazioni e società del settore oil&gas per l'analisi dei fenomeni di subsidenza e compattazione generati da cause naturali o antropiche (es. prelievi di acqua, di gas o idrocarburi dal sottosuolo). La disponibilità di un vasto archivio di dati permette di ricostruire, in poco tempo, le dinamiche di porzioni molto estese di territorio a partire dal 1992.
- **Individuazione di aree soggette a fenomeni franosi e di instabilità di versante**
Uno dei principali ambiti di applicazione delle analisi PS è quello dello studio dei fenomeni franosi. Nel corso degli ultimi anni i risultati ottenuti hanno mostrato come il monitoraggio satellitare possa contribuire a migliorare il livello di conoscenza, grazie ad informazioni quantitative dei movimenti in atto, alla possibilità di estendere le aree di indagine e di misurare spostamenti di piccola entità non identificabili con tecnologie tradizionali.

Un esempio emblematico è stato l'utilizzo dei dati PS per aggiornare e migliorare i risultati del progetto IFFI, Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia. In molti casi le misure PS hanno consentito di definire meglio i limiti di frana, di stabilire lo stato di

attività dei movimenti e di individuare nuovi fenomeni non riconoscibili con l'adozione dei metodi di rilevamento tradizionali.

- **Monitoraggio di zone vulcaniche e faglie sismiche**
Il monitoraggio radar da satellite può fornire informazioni per la Protezione Civile e gli Istituti di Ricerca in zone edificate a elevato rischio sismico e/o vulcanico, sia in un'ottica di prevenzione e pianificazione, sia di studio a carattere scientifico.
- **Mappatura del territorio**
Potere disporre di informazioni sui movimenti occorsi nell'ultimo decennio su centinaia o migliaia di chilometri quadrati di superficie risulta utile per caratterizzare in tempi brevi il territorio e valutare la presenza e l'ubicazione di aree a rischio. Si ha quindi uno strumento di analisi, di valutazione e di pianificazione per la gestione ambientale.
- **Progettazione di tracciati stradali**
Uno strumento strategico per la progettazione di nuovi tracciati: conoscere lo stato di attività di un versante potrebbe consigliare di valutare alternative a minor rischio.
- **Stato dell'arte ante operam**
Definire lo stato di attività di una zona di interesse, prima di intervenire con lavori per la realizzazione di grandi opere e monitorare in futuro le conseguenze che i lavori stessi hanno generato sull'ambiente circostante sono tra i possibili obiettivi di un'analisi SqueeSAR™.
- **Accertamento della responsabilità per danni causati da costruzioni**
La possibilità di avere un archivio storico di dati radar consente di verificare i legami causa-effetto tra la costruzione di opere (gallerie, linee metropolitane, ecc.) ed eventuali danni indotti ad abitazioni ed edifici in genere. La tecnica SqueeSAR™ è uno strumento efficace per compiere analisi retrospettive e risolvere vertenze riguardo a danni passati, conseguenza sia di intervento umano che di cause naturali (es.: terremoti). I risultati delle indagini si rilevano di grande interesse anche per le compagnie di assicurazione.
- **Analisi di stabilità dei beni architettonici e degli edifici pubblici**
È possibile avvalersi di questo strumento di prevenzione e sorveglianza per fornire dati utili a verifiche e controlli più mirati e di lunga durata su beni architettonici, riducendone i costi di manutenzione.

Specifiche applicazioni per il settore Infrastrutture

Nello studio di fattibilità e nella **fase preliminare** della progettazione di opere infrastrutturali, il telerilevamento da satellite può fornire un utile contributo all'analisi e allo studio del territorio. L'individuazione di aree soggette a movimento e la ricostruzione dell'evoluzione temporale delle deformazioni, grazie agli archivi storici di dati satellitari, consente, insieme alle informazioni di carattere geologico e geotecnico, di migliorare la scelta di siti e tracciati. Nel caso di opere a grande sviluppo lineare, il telerilevamento satellitare, rispetto ad altre tecniche, offre il grande vantaggio di ottimizzare tempi e costi di indagine.

In **fase di realizzazione** delle opere, si possono sorvegliare da satellite le conseguenze dei lavori sull'ambiente circostante, fino a verificare i legami di causa-effetto tra i lavori di scavo e gli eventuali danni ad abitazioni e strutture in superficie, da utilizzare anche nel corso di controversie giudiziarie.

In **fase di esercizio** delle opere, per le verifiche del comportamento deformativo dell'opera al termine del lavoro e i controlli a lungo termine, la tecnica SqueeSAR™ può essere utilizzata come un vero e proprio strumento di monitoraggio integrativo, da utilizzare comunque in parallelo a tecniche di monitoraggio tradizionali.

Applicazioni per le quali i risultati SqueeSAR™ hanno già dimostrato la loro utilità e la loro efficacia, grazie anche ad un ottimo rapporto costi-benefici, sono:

- **Strade e ferrovie:** in Italia e all'estero la tecnica SqueeSAR™ è stata applicata in ambito ferroviario a casi di studio che coinvolgono opere in sotterraneo, dalla fase progettuale, alla fase realizzativa e, infine, d'esercizio. In particolare, le recenti analisi condotte sui cantieri di realizzazione della linea AV/AC a Bologna, durante l'esecuzione dei *lavori di completamento della galleria* nei pressi della futura stazione, hanno offerto la possibilità di un utile confronto tra le misure di spostamento satellitare e quelle ottenute con tecniche tradizionali, previste in progetto a presidio dei lavori, per una sorta di mutua validazione e a conferma dell'affidabilità e della precisione delle misure SqueeSAR™.
- **Linee metropolitane:** a Vancouver (Canada) e a Parigi, l'archivio storico di dati satellitari è stato utilizzato in fase preliminare, per definire il grado di stabilità delle aree attraversate dal tracciato della metropolitana e valutare il possibile impatto dei lavori di costruzione sui rilevati in superficie, tenendo conto delle caratteristiche litologiche dei terreni attraversati.
- **Aeroporti:** Le aree aeroportuali di Fiumicino (Roma) e Vancouver sono state analizzate con SqueeSAR™ per verificare l'andamento dei tassi di subsidenza in corrispondenza degli elementi più sensibili dell'aeroporto. In particolare, sono stati valutati i cedimenti differenziali lungo le piste, contribuendo a ottimizzare la pianificazione di altre indagini e a migliorare la gestione della loro manutenzione.

Le analisi SqueeSAR™ a confronto con tecniche convenzionali

Rispetto alle convenzionali tecniche di monitoraggio a terra, la tecnica SqueeSAR™ offre numerosi vantaggi, tra cui:

- possibilità di acquisire informazioni su una **rete di capisaldi radar estremamente densa**, soprattutto nelle aree urbane, dove la densità dei punti di misura può raggiungere valori notevolmente superiori rispetto a quanto ottenibile con le reti geodetiche convenzionali; inoltre, bisogna considerare che i bersagli sono già presenti sul terreno e, a differenza dei tradizionali strumenti di misura (quali, capisaldi geodetici e GPS, estensimetri, inclinometri), essi **non richiedono alcuna produzione, installazione e successiva manutenzione** da parte dell'operatore;
- disponibilità per ciascun bersaglio radar della serie storica degli **spostamenti con una elevata precisione, superiore a quella del GPS in direzione verticale**, e con una frequenza temporale regolare e più elevata in confronto a molte delle tecniche di misura convenzionali;
- possibilità di studiare ampie porzioni di territorio, incluse aree difficilmente accessibili (dal momento che non richiede alcun intervento a terra), consentendo di **ottimizzare i costi ed i tempi di indagine**;
- disponibilità di un **archivio storico** che consente di ricostruire l'evoluzione pregressa di un fenomeno deformativo **a partire dal 1992** (data di inizio dell'acquisizione delle immagini radar ERS), che può rivelarsi un elemento decisivo, soprattutto laddove le

velocità in gioco (mm/anno) sono estremamente ridotte e le tecniche convenzionali richiederebbero anni prima di poter dare misure significative.

Quest'ultimo aspetto si è rivelato in molti casi determinante nella caratterizzazione di siti destinati alla realizzazione di nuove opere e/o infrastrutture e nella valutazione del loro impatto sul territorio.

L'analisi SqueeSARTM rappresenta inoltre uno strumento di grande valore a supporto della progettazione di reti di monitoraggio ed allertamento, in quanto fornisce informazioni relative sia all'estensione del fenomeno da monitorare sia alla sua dinamica evolutiva.

Molti casi applicativi possono essere citati a dimostrazione della completa sinergia dei dati SqueeSARTM con quelli ottenuti con la strumentazione convenzionale. Un esempio di interesse è quello della baia di San Francisco (California), dove l'analisi satellitare ha portato all'identificazione di un'elevatissima quantità di punti di misura che consentono di individuare diversi fenomeni in atto (tettonici, idrogeologici, geomorfologici) oggetto di studio dell'Università di Berkley (Bürgmann et al., 2006; Ferretti et al., 2004, Hilley et al. 2004). L'integrazione tra i dati PS (oltre 115.000 punti di misura) e i dati GPS (200 stazioni presenti su tutta la baia) ha consentito di risolvere il campo di velocità orizzontale e verticale come mostrato in figura 7.

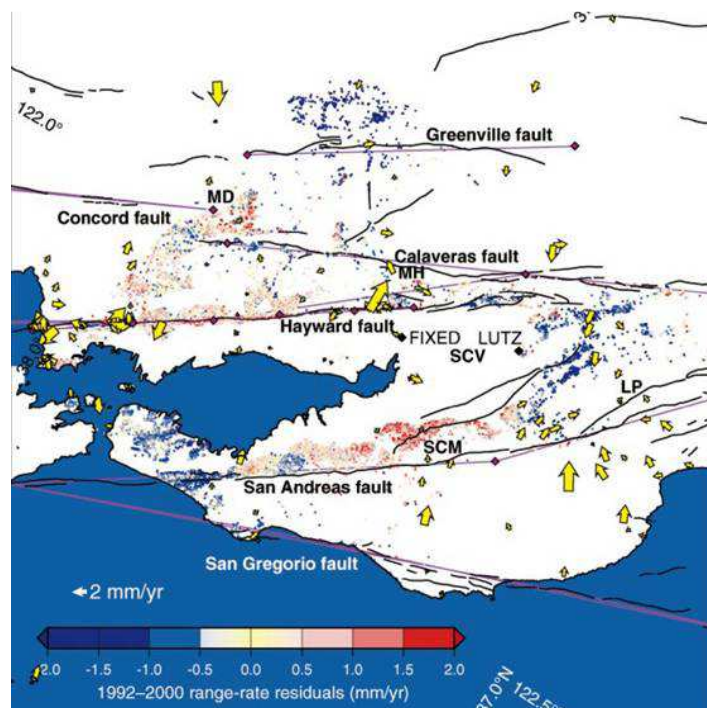


Fig. 7 - Baia di San Francisco: campo di velocità orizzontale e verticale ottenuto dalla combinazione di dati PS e GPS (Bürgmann et al., 2006)

Numerosi sono inoltre i confronti tra dati PS e dati GPS, come quelli relativi all'edificio vulcanico del Mauna Loa sull'isola di Hilo, Hawaii (USA) di figura 2. Nell'ambito del progetto ESA - GlobVolcano sono stati forniti dal Rosenstiel School for Marine and Atmospheric Science (RSMAS) dell'Università di Miami i dati di 47 stazioni GPS sparse sull'isola principale delle Hawaii e confrontati con i risultati SqueeSARTM (ascendenti e discendenti).

Come risulta dalla Figura 8, esiste un ottimo accordo tra i dati GPS, proiettati lungo la linea di vista del satellite, e le serie storiche relative ai bersagli radar più vicini. Pur confermando il trend evidenziato dai dati PS, i dati GPS si presentano più rumorosi a causa della minor precisione della tecnica nella direzione verticale.

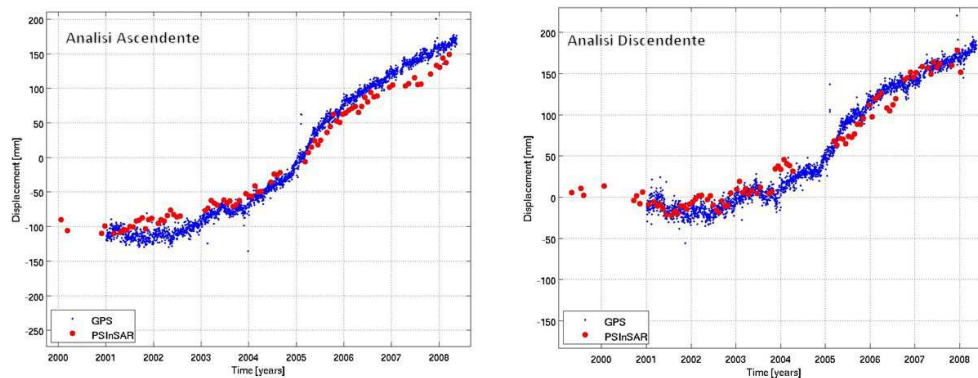


Fig. 8 - Confronto tra gli spostamenti (lungo la linea di vista del satellite) registrati in corrispondenza del caposaldo GPS e quelli del PS ad esso più vicino. A sinistra il risultato dell'elaborazione ascendente a destra quella discendente

Bibliografia

- TAMBURINI A, BIANCHI M., GIANNICO C. AND NOVALI F. (2010) Retrieving surface deformation by PSInSAR™ technology: A powerful tool in reservoir monitoring. Int. J. Greenhouse Gas Control, in press.
- PELTIER A., BIANCHI M., KAMINSKI E., KOMOROWSKI J.-C., RUCCI A., STAUDACHER T. (2010) PSInSAR™ as a new tool to monitor pre-eruptive volcano ground deformation: Validation using GPS measurements on Piton de la Fournaise. Geophysics Research Letters, Vol. 37, L12301, doi: 10.1029/2010GL043846, 2010
- BURGMANN R., HILLEY G., FERRETTI A., NOVALI F. (2006) Resolving vertical tectonics in the San Francisco Bay Area from permanent scatterer InSAR and GPS analysis. Geology, March 2006, Volume 34, N. 3, pp. 221-224
- FERRETTI A., COLESANTI C., PRATI C., ROCCA F. (2001). Comparing GPS, Optical Levelling and Permanent Scatterers. Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGAARS 2001, Sydney (Australia), 9-13 July 2001, VOL. 6, Pages 2622-2624, 2001

Appendice II - Indici di precisione dell'analisi SqueeSAR™

I risultati SqueeSAR™ si presentano con due indici di precisione, la cui comprensione è molto importante:

1. La **deviazione standard della velocità** (V_STDEV).
2. La **coerenza temporale** (COHERENCE).

La deviazione standard (STD) è un noto parametro statistico, per definizione è un indice che misura il grado di dispersione di una popolazione di dati attorno al valore medio. Questa misura (indicata spesso con σ) è solitamente utilizzata per quantificare il grado di precisione di un insieme di misure. Ipotizzando infatti di conoscere la deviazione standard e supponendo una distribuzione normale degli errori (ovvero gaussiana), il 95% dei valori tende ad essere incluso nell'intervallo $\pm 2\sigma$ rispetto al valor medio. In assenza di errori sistematici, precisione e accuratezza coincidono. Nel caso di analisi PSInSAR™ e SqueeSAR™ la deviazione standard si riferisce alla velocità media dei PS/DS rispetto al punto di riferimento. La deviazione standard dipende da diversi fattori, in particolare si evidenziano i seguenti:

- distanza fisica tra il PS/DS ed il punto di riferimento;
- qualità del punto di misura (coerenza di fase);
- qualità della stima della componente atmosferica;

La coerenza temporale, da non confondersi con la coerenza interferometrica, è un indice che misura quanto bene il moto stimato segue un modello analitico. Stabilire un modello analitico per il moto significa pensare il moto stesso secondo una certa funzione matematica. Le serie temporali delle analisi SqueeSAR™ vengono confrontate con modelli di tipo polinomiale e sinusoidale (andamenti stagionali). La scelta del modello appropriato deve tenere conto di alcuni fattori:

- Numero di immagini elaborate.
- Intervallo temporale tra la prima e l'ultima acquisizione.
- Eventuali lacune nell'acquisizione (ad esempio intervalli sporadici o regolari di assenza di acquisizioni).

Stabilito il modello matematico da utilizzare, ogni serie temporale di movimento viene confrontata con il modello, il risultato del confronto è l'indice detto **coerenza temporale**. Il valore della coerenza temporale è compreso tra 0 (nessuna coerenza) ed 1 (massima coerenza). Il valore 1 assume il significato che ogni misura contenuta nella serie temporale è perfettamente giustificata dal modello matematico, ed è ovviamente un caso limite.

I dati creati dalle analisi SqueeSAR™ vengono selezionati in base alla coerenza temporale, eliminando tutte le serie temporali che presentano una coerenza troppo bassa per garantire una interpretazione del risultato. La selezione dipende dai fattori sopra elencati, dunque varia da elaborazione ad elaborazione, ed è basata su test statistici che determinano il livello minimo di coerenza da ritenere accettabile (soglia minima di coerenza). Va infatti sottolineato che il valore assoluto della coerenza, fatti salvi i valori estremi di 0 ed 1, non assume una valenza

qualitativa a sua volta assoluta, bensì relativa alla combinazione dei fattori che determinano il 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) . Ovvero il valore di coerenza temporale è sicuro indice di precisione, **purché confrontato sempre all'interno dello stesso set di dati**.

La Figura 1 mostra due serie temporali di diversa coerenza. Risulta evidente come la serie temporale di coerenza maggiore (in basso) appaia molto meglio definita e “pulita” rispetto alla serie temporale di coerenza minore (in alto).

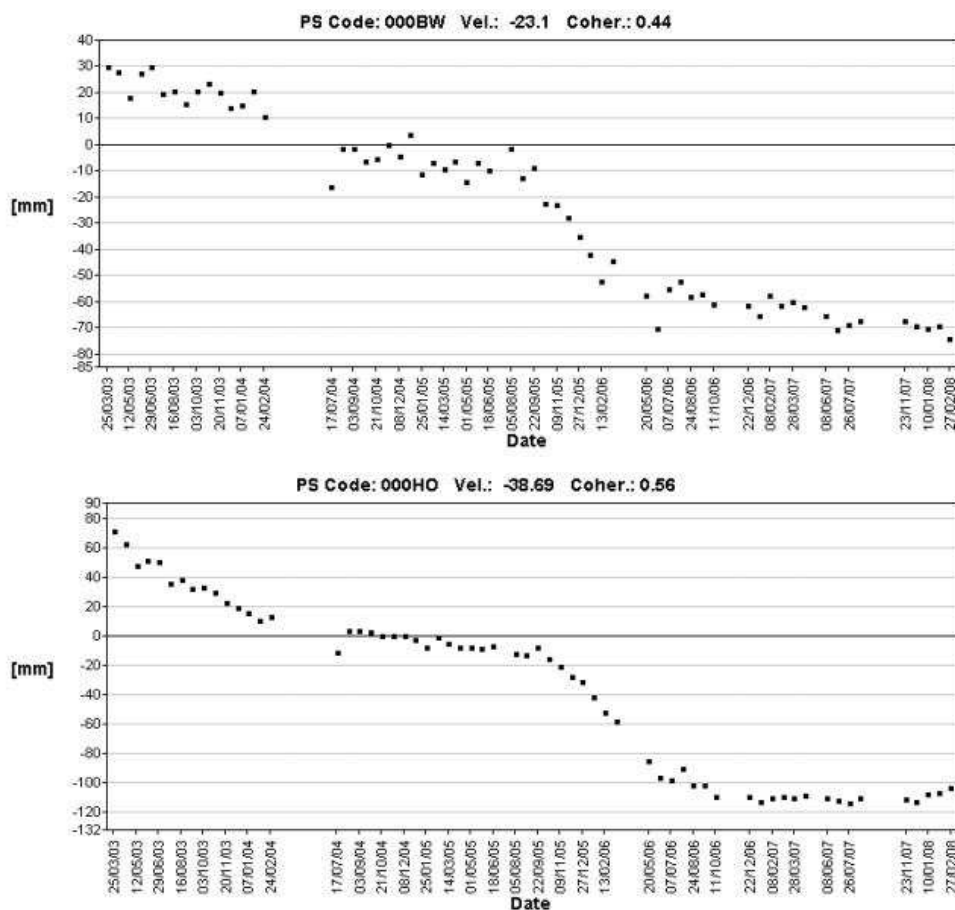


Fig. 1 - Confronto tra serie temporali a coerenze diverse: nella serie temporale riportata in alto la coerenza è inferiore rispetto alla serie temporale riportata in basso