

*Università degli Studi di Firenze*

DIPARTIMENTO DI SCIENZE DELLA TERRA

Centro di Competenza del Dipartimento della  
Protezione Civile - Presidenza del Consiglio dei Ministri

**PhD Thesis**

**Interpretazione di dati radar satellitari  
per la valutazione di movimenti di  
massa localizzati**

**Dottorando:  
Chiara Proietti**

**Relatore:  
Prof. Nicola Casagli**

**Firenze, Gennaio 2010**



## Tavola dei contenuti

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>DATI RADAR SATELLITARI.....</b>	<b>3</b>
2.1	INTERFEROMETRIA RADAR SATELLITARE (INSAR) .....	3
2.2	PRINCIPI DI INTERFEROMETRIA SAR (INSAR) .....	5
2.3	MISSIONI SAR .....	6
2.4	TECNICHE DI ELABORAZIONE .....	14
2.4.1	<i>Interferometria differenziale (DInSAR)</i> .....	14
2.4.2	<i>Tecniche Multi-Interferogramma</i> .....	16
2.4.2.1	Permanent Scatterers (PSInSAR) .....	17
2.4.2.2	PSP-DIFSAR) .....	18
<b>3</b>	<b>MONITORAGGIO DI MOVIMENTI DI MASSA LOCALIZZATI CON TECNICA PSI .....</b>	<b>20</b>
3.1	DISSESTI IDROGEOLOGICI MONITORABILI CON TECNICA PSI .....	20
3.2	FENOMENI FRANOSI .....	22
3.3	SUBSIDENZE .....	27
3.4	SPROFONDAMENTI .....	31
<b>4</b>	<b>UTILIZZO DI DATI RADAR SATELLITARI NEL SISTEMA DI ALLERTA NAZIONALE DI PROTEZIONE CIVILE .....</b>	<b>36</b>
4.1	IL SISTEMA DI ALLERTA NAZIONALE .....	37
4.2	TEMPO DIFFERITO .....	40
4.2.1	<i>Individuazione e Mappatura (Detection and Monitoring)</i> .....	40
4.2.2	<i>Caratterizzazione (Characterization)</i> .....	40
4.2.2.1	Caratterizzazione spaziale ( <i>Spatial Characterization</i> ).....	41
4.2.2.2	Caratterizzazione temporale ( <i>Back-monitoring</i> ).....	41
4.3	TEMPO REALE .....	42
4.3.1.1	Monitoraggio ( <i>Monitoring</i> ) .....	42
4.3.1.2	<i>Early Warning</i> .....	43
<b>5</b>	<b>UTILIZZO DATI PS NEL TEMPO DIFFERITO .....</b>	<b>44</b>
5.1	METODOLOGIA PER L'INTERPRETAZIONE DEI DATI PS .....	45
5.2	INDIVIDUAZIONE E MAPPATURA ( <i>DETECTION AND MAPPING</i> ) .....	49
5.2.1	<i>Scala Nazionale</i> .....	50
5.2.1.1	Il Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale (PST-A) .....	50
5.2.2	<i>Area Vasta</i> .....	56
5.2.2.1	Roma .....	57
5.2.2.2	Napoli.....	76
5.2.3	<i>Scala Locale</i> .....	89
5.2.3.1	Scilla90	

5.3	CARATTERIZZAZIONE .....	102
5.3.1	Caratterizzazione spaziale ( <i>Spatial Characterization</i> ): il centro storico di Roma.....	103
5.3.2	Caratterizzazione temporale ( <i>Back-monitoring</i> ): la stazione Garibaldi di Napoli .....	110
<b>6</b>	<b>UTILIZZO DATI PS NEL TEMPO REALE .....</b>	<b>122</b>
6.1	MONITORAGGIO .....	123
6.1.1	Fagnano Castello .....	124
6.2	EARLY-WARNING .....	133
6.2.1	Caltanissetta.....	134
<b>7</b>	<b>DISCUSSIONI E PROSPETTIVE FUTURE.....</b>	<b>145</b>
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONI.....</b>	<b>151</b>
<b>9</b>	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>154</b>

## 1 INTRODUZIONE

I movimenti di massa localizzati quali frane, subsidenze e sprofondamenti, sono ampiamente diffusi nel territorio nazionale ed interessano centri abitati ed aree urbanizzate, rappresentando perciò un reale problema socio-economico. In quest'ottica è necessaria una corretta pianificazione territoriale realizzata tramite l'individuazione delle aree soggette o potenzialmente soggette a dissesti ed una approfondita valutazione dei dissesti individuati. In tale contesto si inquadra la necessità di trovare sistemi di valutazione, monitoraggio e gestione del rischio idrogeologico.

In Italia le attività di gestione del rischio idrogeologico vengono svolte in ambiti diversi, in funzione della scala temporale e dello scopo per cui vengono svolte. A scopo di sorveglianza territoriale, per rilevare l'avvicinarsi delle condizioni di criticità e per la realizzazione delle conseguenti azioni di contrasto e di governo dell'emergenza, le attività di gestione del rischio idrogeologico vengono realizzate tramite il sistema nazionale di Protezione Civile che opera attraverso la rete di centri funzionali e di competenza. A scopo di pianificazione territoriale queste attività, relative principalmente ad azioni di natura politico-amministrativa quali la zonazione del territorio in base alla pericolosità ed al rischio frana, vengono realizzate attraverso il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM) e dalle istituzioni che dipendono da esso quali ad esempio le Autorità di Bacino. Gli enti pubblici preposti per tali attività si debbono avvalere delle tecnologie più innovative al fine di definire le migliori metodologie per la gestione del rischio idrogeologico.

I recenti sviluppi di nuove tecniche di analisi interferometrica delle immagini radar, come le tecniche multi-interferogramma, hanno considerevolmente aumentato le potenzialità del telerilevamento nello studio di movimenti di massa. Tali tecniche costituiscono uno strumento che, integrato con dati di superficie e di sottosuolo, consente la valutazione delle deformazioni osservate, quindi la possibilità di definire strategie di monitoraggio.

L'obiettivo della presente tesi di dottorato è l'analisi della potenzialità dell'utilizzo dei dati radar satellitari come strumento operativo per l'individuazione e la caratterizzazione dei dissesti in relazione alla scala temporale definita dal Sistema di Allerta della Protezione Civile, in cui si vanno a collocare le diverse attività volte a diminuire l'impatto dei dissesti sulla popolazione e sul territorio.

L'attuale Sistema di Allerta della Protezione Civile è incentrato sul rischio idraulico in termini di previsione di eventi meteorologici e sul contrasto e mitigazione degli effetti idrogeologici al suolo. Un supporto per l'estensione del Sistema di Allerta al rischio idrogeologico, includendo anche i movimenti di massa localizzati non strettamente connessi ad eventi pluviometrici, può essere fornito dall'utilizzo di dati radar satellitari. Tale supporto porta alla definizione di un sistema di monitoraggio satellitare che utilizza dati radar e ottici telerilevati, per l'individuazione, la mappatura e l'interpretazione di movimenti di massa localizzati in aree ad elevato rischio idrogeologico, per scopi di protezione civile. Per rendere efficace questa integrazione è necessario stabilire le piene potenzialità ed i limiti dell'uso dei dati interferometrici e ciò può avvenire solo grazie a costanti e mirate applicazioni in aree test e a diverse scale di analisi. E' difatti essenziale che le attività di pianificazione di Protezione Civile, per le quali è stata ampiamente dimostrata l'utilità dei dati interferometrici (come nell'aggiornamento di carte inventario dei dissesti redatte all'interno dei Piani stralcio di bacino per l'Assetto Idrogeologico – PAI – messi a punto dalle Autorità di Bacino), siano costantemente in funzione altrimenti il patrimonio di informazione ottenuto negli anni perderebbe in poco tempo la propria efficacia.

Le diverse attività di pianificazione di protezione civile devono essere sempre calibrate alla scala spaziale e temporale appropriata, in funzione dello scopo delle analisi che si vanno ad effettuare. Infatti, si ricorda che indagini orientate alla gestione del rischio a scala di bacino e quindi su area

vasta, non consentono il livello di dettaglio necessario alla pianificazione di protezione civile che, come è noto, si esplica spesso su scenari fortemente concentrati nel tempo e nello spazio.

Le analisi condotte nei diversi casi di studio sui quali sono state sperimentate le tecniche di interferometria SAR satellitare sono state svolte in collaborazione con autorità nazionali e regionali coinvolte nelle attività di protezione civile. Le indagini sono state quindi mirate ad un'analisi delle potenzialità e dei limiti dell'applicazione dei dati radar satellitari alla valutazione dei movimenti di massa localizzati sia in funzione della scala temporale (tempo differito e tempo reale) che della scala spaziale (scala nazionale, area vasta e scala locale).

La presente tesi è strutturata come segue:

- nella sez. 2 vengono descritti in maniera sintetica lo stato dell'arte sui dati radar satellitari disponibili per implementare analisi interferometriche, i principi dell'interferometria radar satellitare, le caratteristiche di acquisizione delle principali missioni radar satellitari e le tecniche multi-interferogramma utilizzate nella tesi;
- nella sez. 3 viene presentato lo stato dell'arte sull'utilizzo dei dati PS per la valutazione dei movimenti di massa localizzati, focalizzando in particolare su dissesti idrogeologici quali frane, subsidenze e sprofondamenti;
- la sez. 4 è dedicata alla descrizione dei contributi che possono arrivare dall'utilizzo di dati radar satellitari all'interno del Sistema di Allerta Nazionale di Protezione Civile, suddividendo l'analisi in funzione della scala temporale come definita dalla normativa;
- la sez. 5 è focalizzata sull'analisi dei dati radar satellitari volta alla pianificazione e prevenzione dei dissesti in tempo differito tramite il contributo fornito dall'utilizzo dei PS nell'individuazione, mappatura e caratterizzazione dei movimenti di massa, in funzione della scala spaziale a cui sono state effettuate le analisi;
- nella sez. 6 viene discusso il contributo fornito dai dati PS nel tempo reale, per il monitoraggio dei dissesti e l'allertamento rapido (*early warning*) per scopi di Protezione Civile;
- nelle sez. 7 e 8 vengono infine discussi le effettive potenzialità ed i limiti emersi dalle applicazioni nei diversi casi di studio delle tecniche interferometriche satellitari in funzione di un futuro utilizzo operativo all'interno del Sistema di Allerta di Protezione Civile, focalizzando su un utilizzo dei dati a scala nazionale, le conclusioni ed un'ampia bibliografia alla quale si rimanda per la trattazione specifica dei singoli argomenti affrontati.

## 2 DATI RADAR SATELLITARI

### 2.1 Interferometria radar satellitare (InSAR)

I sistemi radar satellitari sono di tipo attivo e forniscono immagini elettromagnetiche (a frequenze comprese tra 500MHz e 10GHz) della superficie terrestre con risoluzione spaziale superiore al metro. Rispetto ai più noti sistemi ottici operano con continuità, potendo acquisire dati in presenza di copertura nuvolosa e sia di giorno che di notte.

Il principio di funzionamento è il medesimo di tutti i sistemi radar (acronimo di *RA*dio *DE*tecting *AN*d *RA*nging): un apparecchio trasmittente illumina lo spazio circostante con un'onda elettromagnetica che incide su eventuali oggetti subendo un fenomeno di riflessione disordinata (diffusione, *scattering*). Una parte del campo diffuso torna verso la stazione trasmittente, equipaggiata anche per la ricezione, dove vengono misurate le sue caratteristiche. Il dispositivo è in grado di individuare il bersaglio elettromagnetico (*detection*) e, misurando il ritardo temporale tra l'istante di trasmissione e quello di ricezione, valutare la distanza (*ranging*) a cui è posizionato, localizzandolo in modo preciso lungo la direzione di puntamento dell'antenna (direzione di *range*).

La direttività dell'antenna utilizzata per trasmettere e ricevere il segnale radar, e cioè la selettività nell'illuminazione dello spazio circostante, consente di localizzare l'oggetto anche lungo l'altra dimensione (detta di *azimuth*). Quanto più grande è l'antenna, tanto più stretta è la sua impronta e, di conseguenza, tanto meglio viene localizzato il bersaglio. Chiaramente ciò avviene a scapito dell'estensione dell'area illuminata. Per ovviare questo inconveniente, le antenne molto direttive usate per i radar militari e per applicazioni di aviazione civile ruotano, in modo da "spazzare" tutta l'area circostante alla loro posizione.

Le immagini acquisite da un sensore radar vengono registrate in un sistema di riferimento di coordinate *range* ed *azimuth* e, in tali direzioni, sono caratterizzate da due diverse risoluzioni spaziali. La risoluzione in *range* o *slant-range* o LOS (*Line Of Sight*), riferita alla direzione di propagazione del segnale trasmesso dall'antenna radar, è legata al tempo impiegato dall'impulso di energia per compiere il doppio percorso segnale-bersaglio e, la sua proiezione a terra è detta risoluzione in *ground-range*. La risoluzione in *azimuth*, ossia nella direzione di moto della piattaforma su cui è posto il sensore, è inversamente proporzionale alla lunghezza  $L$  dell'antenna.

Ciò significa che, quanto più grande è l'antenna, tanto più stretta è la sua impronta a terra e, di conseguenza tanto meglio viene localizzato il bersaglio. Per ottenere buone risoluzioni in *azimuth*, occorre dunque aumentare la lunghezza dell'antenna, ma ciò comporta la riduzione dell'estensione dell'area illuminata.

Introducendo il concetto di SAR (*Synthetic Aperture Radar*, Radar ad Apertura Sintetica) si raggiunge un compromesso tra risoluzione nella direzione di *azimuth* ed estensione dell'area osservata, combinando coerentemente (cioè tenendo conto di ampiezza e fase del segnale ricevuto) i dati acquisiti dal sensore nelle diverse posizioni successive occupate e sintetizzando un'antenna fittizia di grandi dimensioni a partire da una lunghezza reale molto ridotta (Figura 1).

Le informazioni geografiche di carattere generale contenute in un'immagine ottica ed in una radar sono le stesse, tuttavia in quest'ultima si può notare come le strutture al suolo rispondano in modo differente alle onde elettromagnetiche emesse: le strade appaiono nere poiché riflettono specularmente il campo trasmesso, mentre le strutture metalliche sono particolarmente luminose.

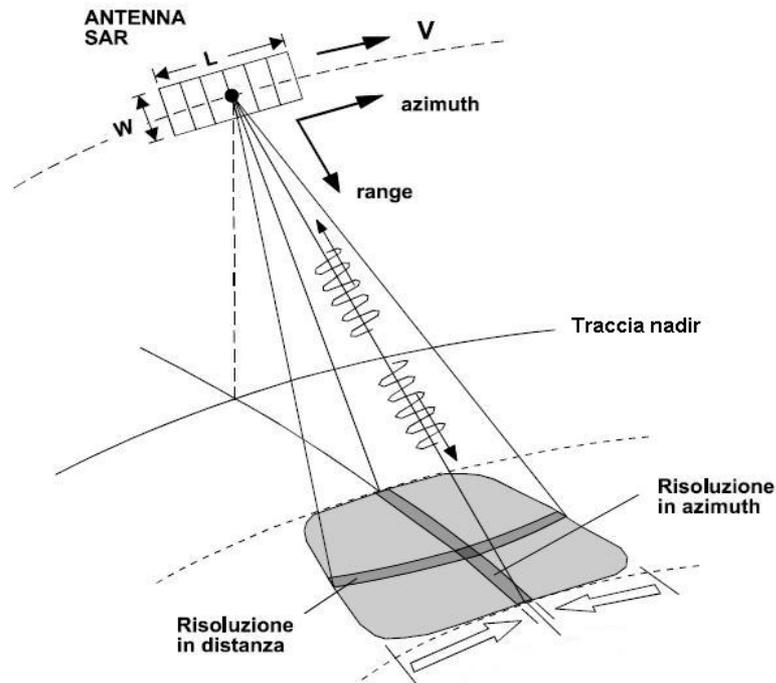


Figura 1 - Modalità di acquisizione di un sistema SAR (Casella & Galetto, 1998).

L'osservazione della superficie terrestre avviene dalla combinazione del movimento orbitale del satellite lungo i meridiani (orbita quasi polare) con la rotazione della terra nel piano equatoriale. I satelliti acquisiscono dati lungo orbite ascendenti, passaggio da S verso N, e lungo orbite discendenti, passaggio da N verso S (Figura 2).

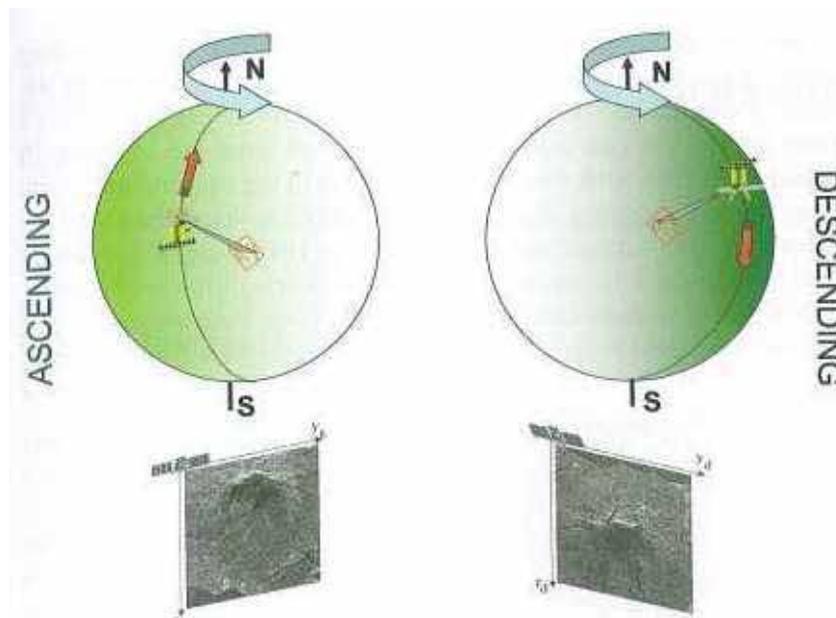


Figura 2 - Orbita ascendente (*ascending*) e discendente (*descending*) (ESA 2007).

Durante i vari passaggi lungo la stessa orbita i satelliti si discostano leggermente dalla traiettoria nominale, di fatto ci sono delle variazioni dell'ordine delle centinaia di metri descritte dal parametro *baseline* geometrico (o normale); di conseguenza la geometria di acquisizione per la stessa zona varia di volta in volta per angoli leggermente diversi creando matrici di *pixel* non corrispondenti alla medesima cella di risoluzione al suolo.

Per effettuare l'analisi è necessario che a *pixel* omologhi nelle varie immagini corrisponda la stessa cella di risoluzione, si procede quindi con una fase di elaborazione dei dati detta registrazione (o ricampionamento). Operativamente, tra tutte le acquisizioni, si sceglie un'immagine, detta *master*, come riferimento; tutte le rimanenti, dette *slave*, vengono ricampionate sulla geometria della *master*, grazie ad un opportuno modello, in modo da avere la stessa griglia di riferimento per tutti i passaggi del satellite. Il modello utilizzato permette di compensare sia una rotazione sia una traslazione indotta sulle immagini a causa del differente angolo di vista.

La modalità di acquisizione, non perpendicolare al suolo ma secondo un angolo di vista  $\theta$ , dà origine nelle immagini focalizzate a delle deformazioni prospettiche a causa della topografia del terreno. Ne conseguono tre differenti tipi di deformazione, in base alla pendenza del terreno (Figura 3):

1. *foreshortening*: si verifica quando la pendenza del terreno tende ad essere perpendicolare alla congiungente sensore-bersaglio (pendenza positiva pari all'angolo di *off-nadir*  $\theta$ ); in questi casi il contributo di più punti si concentra in poche celle producendo pixel molto luminosi nell'immagine di ampiezza.
2. *layover*: si verifica quando la pendenza del terreno è maggiore dell'angolo  $\theta$ ; questo produce una forte distorsione dell'immagine che impedisce la corretta interpretazione del segnale e ogni analisi quantitativa.
3. *shadowing*: si verifica quando alcune zone non possono essere illuminate dall'impulso *radar* perché schermate da altri oggetti; si producono quindi nell'immagine di ampiezza aree molto scure (in ombra).

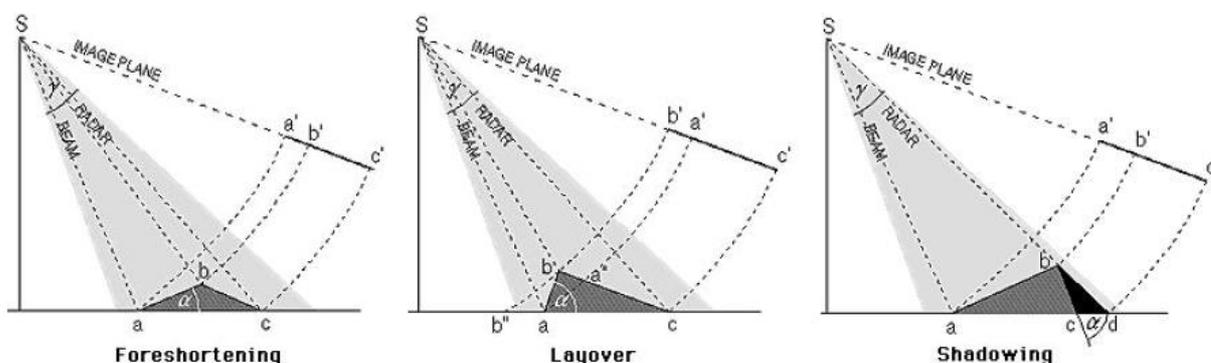


Figura 3 - Deformazioni prospettiche: *foreshortening*, *layover*, *shadowing* (<http://www.asf.alaska.edu>).

## 2.2 Principi di Interferometria SAR (InSAR)

Le immagini SAR per applicazioni interferometriche vengono elaborate in modo da preservare, per ogni *pixel*, le informazioni sia di ampiezza che di fase dell'eco ricevuto.

L'ampiezza individua la parte di campo elettromagnetico incidente su tutti gli oggetti appartenenti alla cella di risoluzione a terra e retrodiffusa verso il sensore.

I valori di fase delle immagini SAR costituiscono invece l'informazione di base per tutte le tecniche interferometriche, poiché racchiudono informazioni sul doppio percorso sensore-bersaglio compiuto dal segnale.

Il termine di fase di un'immagine SAR è infatti dato dal contributo di molteplici termini che possono essere riassunti nella seguente equazione:

$$\phi = \psi + \frac{4\pi}{\lambda} \cdot r + \alpha + n$$

in cui  $\psi$  è il termine di fase dovuto alla riflettività del bersaglio,  $\alpha$  è un contributo dovuto all'atmosfera,  $r$  è la distanza sensore-bersaglio ed  $n$  è un inevitabile rumore proprio del sistema di acquisizione, legato alla curvatura terrestre, al rapporto segnale-rumore (SNR, *Signal-Noise Ratio*) ed al rumore strumentale. Il fattore  $4\pi/\lambda \cdot r$  viene indicato con il termine di propagatore (Ferretti et al., 2003).

L'obiettivo dell'interferometria è quello di isolare i contributi di fase dovuti al movimento del bersaglio e di stimare la differenza di cammino ottico  $\Delta r$  dell'onda elettromagnetica trasmessa in due successive acquisizioni e retrodiffusa dal bersaglio a terra.

La fase di una singola immagine SAR è tuttavia inutilizzabile perché risulta impossibile discriminare i vari contributi a causa della casualità dei termini legati ai retrodiffusori presenti nella scena e all'elevata entità del termine propagatore.

Tuttavia, nell'ipotesi che nel tempo intercorso tra l'acquisizione di due immagini SAR le caratteristiche di retrodiffusione degli oggetti presenti nella scena siano rimaste immutate, si può considerare la differenza della fase fra due immagini relative alla stessa area, i contributi dovuti alla riflettività si elidono e la fase dell'interferogramma dipende, con buona approssimazione, solo dalla distanza sensore-bersaglio (a parte i contributi spuri dovuti all'atmosfera e al rumore):

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r$$

in cui  $\Delta r$  è la distanza in *range* dei percorsi tra i sensori e la stessa cella di risoluzione a terra e  $\lambda$  è la lunghezza d'onda del segnale radar utilizzato per effettuare l'acquisizione delle immagini. La differenza di fase, *pixel a pixel*, fra due immagini SAR è detta *fase interferometrica* e può assumere valori compresi tra  $-\pi$  e  $+\pi$ .

Se le due acquisizioni SAR non avvengono esattamente dalla stessa posizione la fase interferometrica possiede una componente legata all'elevazione del terreno oltre a quella data da eventuali deformazioni verificatesi nell'intervallo di tempo che intercorre tra le due acquisizioni

## 2.3 Missioni SAR

Di seguito sono riportate le caratteristiche dei principali satelliti con sensori SAR a bordo che hanno acquisito in passato o sono attualmente operativi, ed i cui dati sono utilizzabili o lo saranno in futuro, per effettuare analisi interferometriche. Nella figura 4 è rappresentata la distribuzione temporale dei dati forniti da tali sensori. Maggiori dettagli tecnici su ciascun satellite o costellazione di satelliti, possono essere reperiti sui siti internet relativi all'agenzia spaziale di competenza.

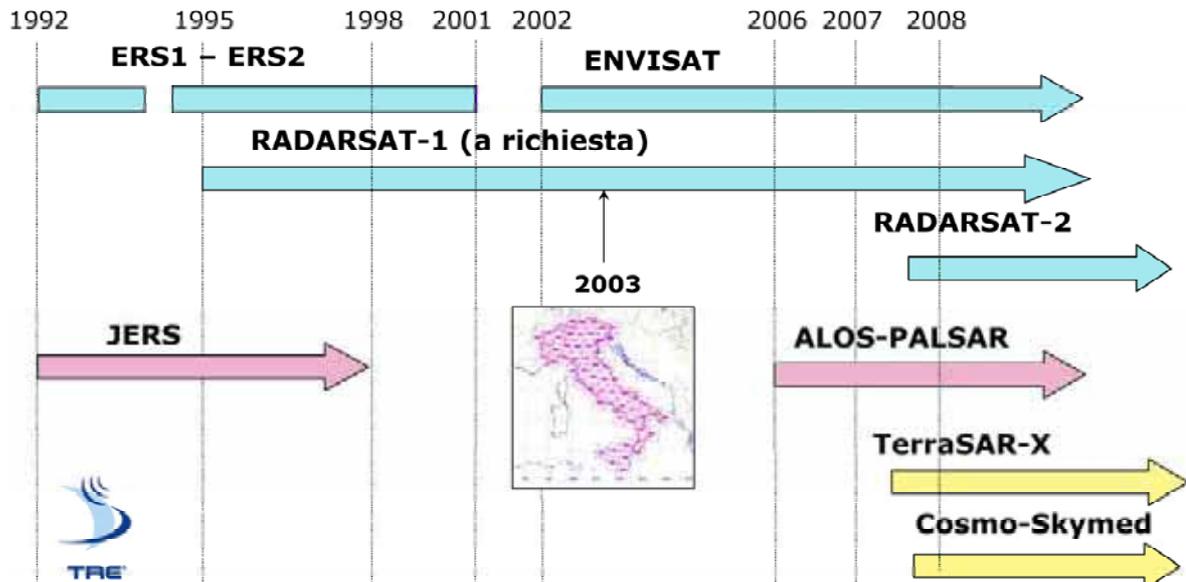


Figura 4 - I dati SAR satellitari disponibili per effettuare analisi interferometriche. I colori con cui sono rappresentati i diversi satelliti differenziano le bande di appartenenza dei segnali utilizzati dai relativi sensori: banda C (celeste), banda L (rosa), banda X (giallo) (modificata da Prati et al., 2008).

In generale, le analisi interferometriche vengono portate avanti su immagini acquisite dallo stesso sensore o acquisite da sensori di identiche caratteristiche tecniche (per esempio i sensori montati sui satelliti ERS1/2 dell'ESA). I dati provenienti da sensori satellitari differenti non possono infatti essere usati in modo congiunto a causa delle diverse caratteristiche di acquisizione dei sensori, tra le quali la loro diversa polarizzazione, la banda utilizzata, l'orientazione spaziale della linea di vista. Soltanto in particolari casi ed attraverso alcuni accorgimenti, è possibile sfruttare immagini acquisite da sensori differenti, per esempio immagini ERS ed ENVISAT (in modalità *ERS-like*) per effettuare analisi interferometriche convenzionali (Arnaud et al., 2003) o analisi interferometriche avanzate (Wegmuller et al., 2005).

### Dati SAR in banda C

La maggior parte dei satelliti operativi fino a poco tempo fa, utilizzava sensori SAR che acquisivano in banda C. La frequenza del segnale utilizzato in questa banda è compresa tra 4 e 8 GHz e, di conseguenza, la lunghezza d'onda varia tra 7,5 e 3,75 cm rispettivamente.

I principali satelliti civili dotati di sensore SAR in banda C sono:

- ERS-1 ed ERS-2 (ESA)
- ENVISAT (ESA)
- RADARSAT-1 (CSA)
- RADARSAT-2 (CSA)

### ERS-1 ed ERS-2

I satelliti ERS (*European Remote Sensing*) dell'ESA, sono stati dotati di sensori radar di tipo SAR in banda C (frequenza di 5,3 GHz, lunghezza d'onda  $\lambda = 5,66$  cm). Le loro orbite (Figura 5) sono eliosincrone e lievemente inclinate rispetto ai meridiani ( $8,5^\circ$ ) ed illuminano, dalla quota di 785 km, una striscia di territorio (*swath*) larga approssimativamente 100 km. La direzione della congiungente sensore-bersaglio (LOS) è perpendicolare all'orbita del satellite ed è inclinata mediamente di un

angolo pari a  $23^\circ$  ( $\theta$ , *off-nadir*) rispetto alla verticale (Figura 5). La risoluzione ottenuta è di circa 4 metri in *azimuth* e 8 metri in direzione di *range* (la risoluzione in *ground range* è circa 20 m).

La stessa orbita nominale viene ripercorsa ogni 35 giorni e in un tempo di circa 100 minuti.

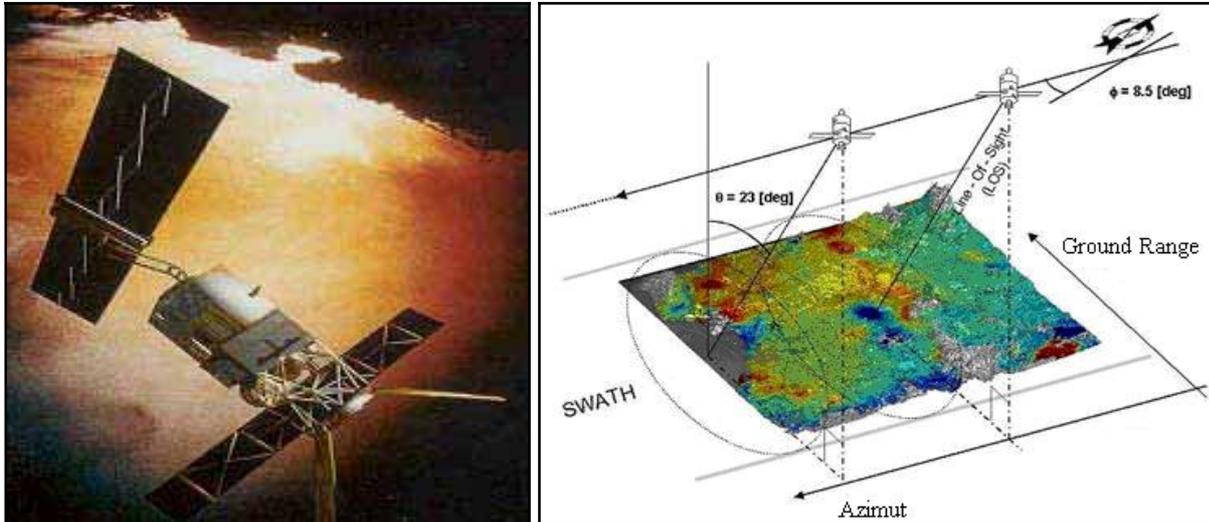


Figura 5 - Il satellite ERS; geometria di acquisizione (Colesanti et al., 2003).

Il satellite ERS-1 ha acquisito dati dalla fine del 1991 a Marzo 2000. Da Novembre del 1993 ad Aprile 1995 le acquisizioni sono state caratterizzate da particolari modalità, di differenti fasi di durata di alcuni mesi ciascuna, in cui i parametri di acquisizione sono stati modificati per particolari applicazioni e per l'acquisizione in aree specifiche della Terra, tra le quali gli oceani e i poli.

Il satellite ERS-2 è operativo dall'inizio del 1995 e, fino al termine della missione ERS-1, ha eseguito una scansione della stessa scena ma da un punto di ripresa leggermente differente ed un giorno dopo il passaggio di ERS-1. Grazie a tale caratteristica, l'ESA ha garantito la disponibilità di coppie *Tandem* da Marzo 1995 a Marzo 2000, mediante le quali poter generare dei DEM ad alta risoluzione sfruttando la *baseline* spaziale delle coppie di immagini.

Il 16 Gennaio 2001 è avvenuta la rottura di un giroscopio del satellite ERS-2. Tale problematica, sebbene permetta l'acquisizione delle immagini radar e l'utilizzo del loro contenuto di ampiezza, non garantisce l'utilizzo dei dati a fini interferometrici, provocando uno *shift* di fase che riduce la banda di frequenza comune tra le diverse acquisizioni.

Grazie alla scelta dell'ESA di acquisire continuamente i dati a partire dal 1992, per vaste aree sono oggi disponibili i *dataset* storici che ricoprono un intervallo di circa dieci anni, composti da un'immagine radar ogni 35 giorni.

Nella Figura 6 sono mostrate tutte le immagini ERS riprese sull'Italia lungo passaggi satellitari discendenti ed ascendenti. Il territorio viene coperto da 113 immagini SAR ascendenti e 117 immagini discendenti. Mediamente, ciascuna zona possiede circa 40 immagini acquisite in geometria ascendente e 70 in geometria discendente.

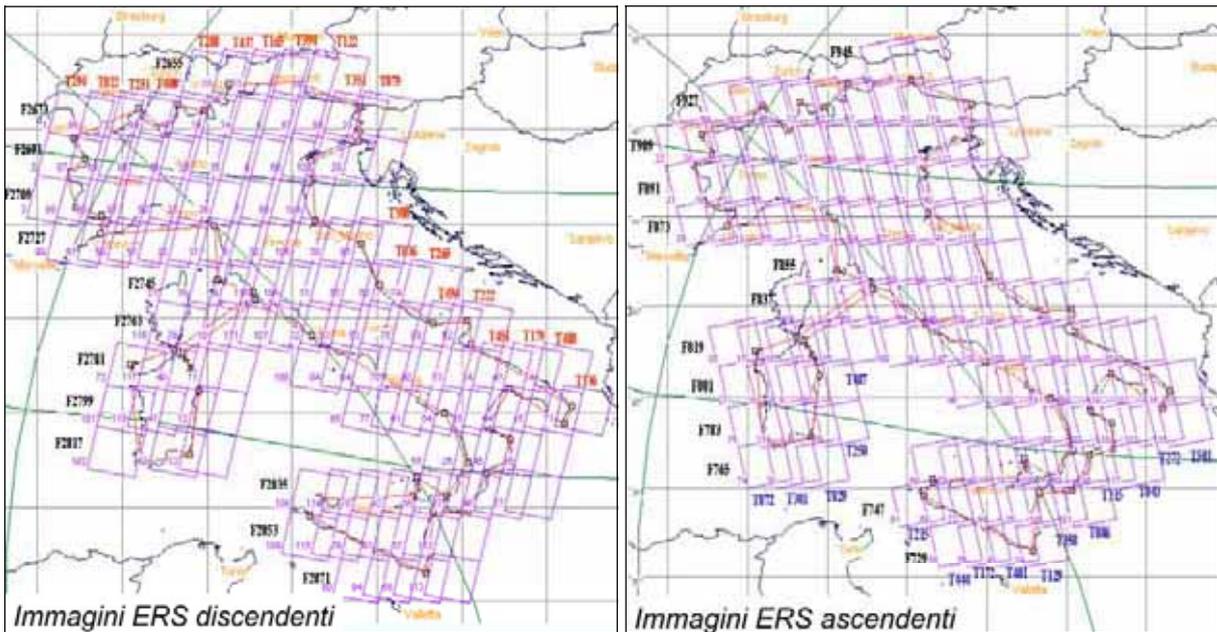


Figura 6 - Copertura dell'Italia con immagini SAR acquisite dai satelliti ERS in geometria discendente e ascendente (Prati et al., 2008).

### ENVISAT

Il satellite ENVISAT (*ENVironmental SATellite*) dell'ESA, lanciato nel Novembre del 2002, ha recentemente sostituito e ampliato le funzioni dei satelliti ERS-1 ed ERS-2. Esso è dotato di un sensore ASAR (*Advanced Synthetic Aperture Radar*), che rappresenta un'evoluzione del SAR e usa una serie di antenne che possono lavorare con diverse polarizzazioni e 7 diversi angoli di incidenza (compresi tra  $15^\circ$  e  $45^\circ$ ) con conseguente variazione della dimensione della scena osservata in una singola immagine. Il satellite percorre un'orbita eliosincrona con tempo di rivisitazione uguale a quello dei satelliti ERS (35 giorni), ma con un ritardo di 30 minuti.

Lo strumento acquisisce in banda C (frequenza di 5,331 GHz e lunghezza d'onda di 5,63 cm) ma con un leggero *shift* nella frequenza rispetto ERS-1 ed ERS-2 che rende difficile, ma possibile attraverso alcuni accorgimenti tecnici, la combinazione dei suoi dati con quelli ERS per effettuare elaborazioni interferometriche.

### RADARSAT-1

Il satellite RADARSAT-1 della CSA, lanciato nel Novembre del 1995, utilizza un sensore SAR in banda C. La geometria di osservazione è molto flessibile, infatti, gli angoli di incidenza variano circa da  $10^\circ$  a  $60^\circ$ , il fascio d'onde radar può essere orientato e l'ampiezza delle bande di formazione dell'immagine possono essere variate da 45 a 510 km di larghezza, con le risoluzioni rispettivamente da 8 a 100 metri. Benché il ciclo di ripetizione di orbita del satellite sia di 24 giorni, la flessibilità del fascio orientabile del radar fornisce a RADARSAT-1 la capacità di acquisire immagini molto più frequentemente (per le regioni polari la copertura può essere quotidiana e alle latitudini equatoriali può essere ottenuta in sei giorni usando la modalità *scanSAR Wide*, caratterizzata da *swath width* di 500 km) (Figura 7).

A differenza degli altri satelliti, RADARSAT-1 acquisisce generalmente immagini *on demand* e questo limita molto la possibilità di utilizzare dati di archivio per potere seguire l'evoluzione temporale passata di un fenomeno deformativo. Grazie ad un accordo tra RADARSAT *International* e

TRE (società di *spin-off* del Politecnico di Milano), a partire da Marzo 2003 il satellite acquisisce immagini sul territorio italiano ogni 24 giorni in modalità *Standard*, sia lungo orbite ascendenti che discendenti. In aggiunta sono state richieste delle acquisizioni del satellite in modalità *Fine Beam* su alcune aree sensibili, quali Venezia, Torino, Roma, Napoli, Ancona e Crotone.

Le mappe di copertura RADARSAT dell'Italia sono mostrate nella Figura 8. Ad oggi, la maggior parte delle zone, risultano coperte da almeno 60 immagini in geometria discendente e 60 in geometria discendente.

Le immagini RADARSAT, grazie all'elevato numero di acquisizioni disponibili e alla più breve frequenza di acquisizione rispetto ai satelliti ERS ed ENVISAT dell'ESA (24 giorni, contro i 35 di ERS ed ENVISAT) consentono di ottenere una precisione più elevata nella misura delle deformazioni, perché consentono di limitare gli effetti di decorrelazione temporale del segnale radar.

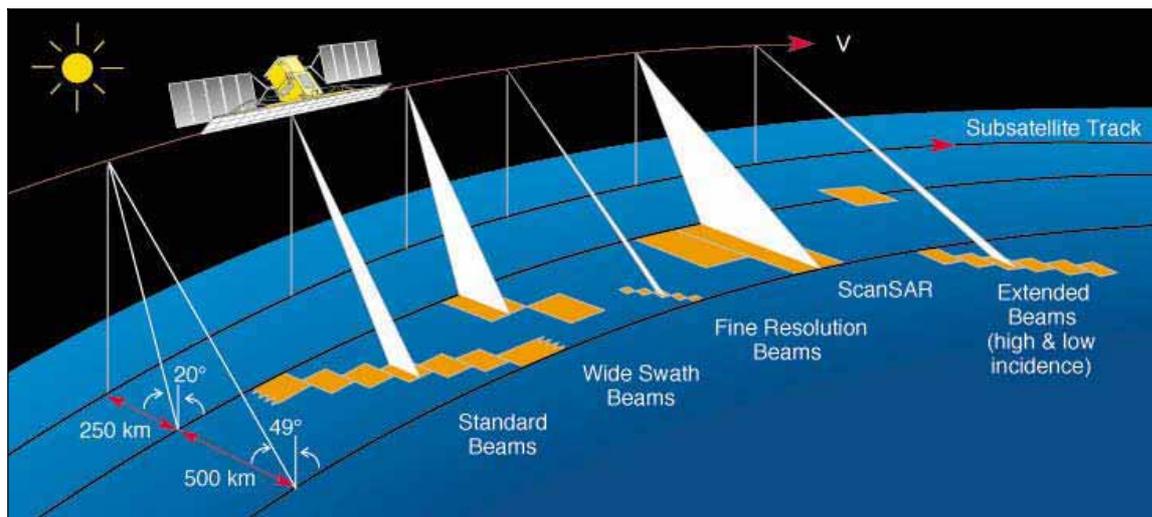


Figura 7 - Modalità di acquisizione del satellite RADARSAT-1 (<http://www.space.gc.ca>).

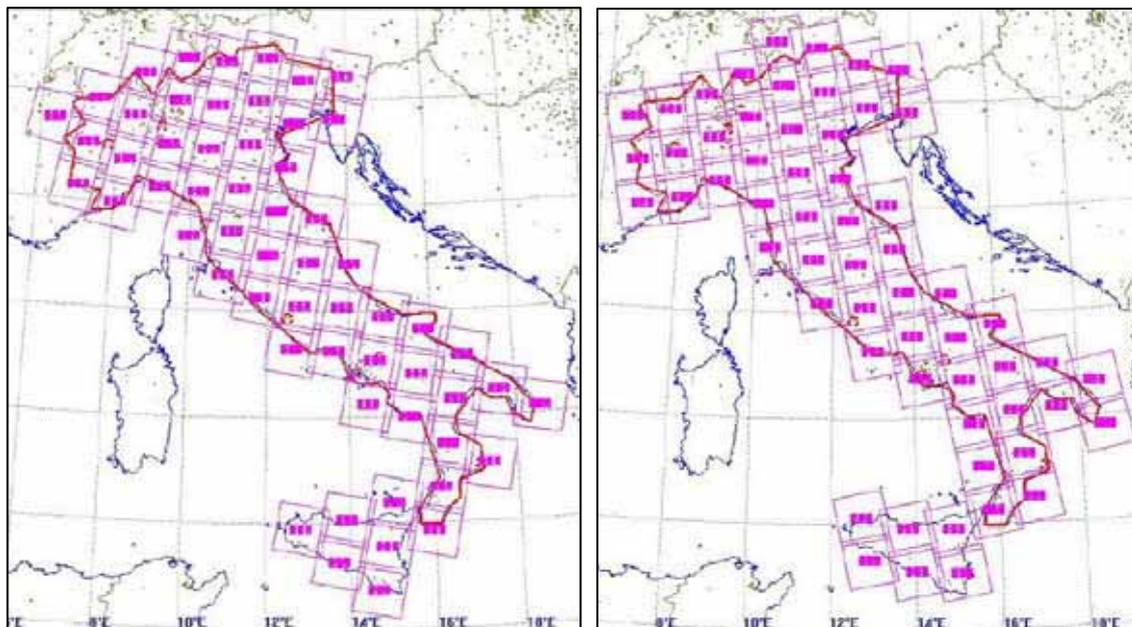


Figura 8 - Copertura dell'Italia con immagini SAR acquisite dal satellite RADARSAT in geometria discendente (sinistra) e ascendente (destra) (Prati et al., 2008).

## RADARSAT-2

A Dicembre del 2007 è stato lanciato dalla *Canadian Space Agency* il satellite RADARSAT-2, che rimarrà in orbita per circa 7 anni. L'orbita è la stessa di RADARSAT-1, ma viene percorsa con un ritardo di 30 minuti, per permettere le applicazioni interferometriche durante il periodo in cui i due satelliti saranno entrambi operativi. Il satellite acquisisce dati in banda C, con un leggero *shift* nella frequenza centrale rispetto a quella di RADARSAT-1. Il tempo di rivisitazione sulla stessa area è di 24 giorni. La missione, permettendo tutte le modalità di acquisizione di RADARSAT-1, garantirà per il futuro una certa continuità con i dati ottenibili dal satellite precedente e in più offrirà diversi tipi di prodotti che apriranno nuove possibilità di applicazione. Le novità principali sono legate alle diverse angolazioni con cui il sistema potrà operare che permetteranno di arrivare fino a una risoluzione di 3 m, sia in *range* che in *azimuth*, di acquisire immagini da entrambi i lati della piattaforma rispetto alla direzione di volo (*dual-sided imaging*), e di emettere e acquisire il segnale in tutte le polarizzazioni. In più, tutte queste modalità di acquisizione dei dati, potranno essere scelte da terra in maniera molto flessibile e in un tempo molto rapido tale da permettere, in caso di emergenza, acquisizioni con particolari parametri.

### **Dati SAR in banda X**

La frequenza del segnale utilizzato nella banda X è compresa tra 8 e 12,5 GHz e, di conseguenza, la lunghezza d'onda varia tra 3,75 e 2,4 cm rispettivamente.

Le immagini SAR acquisite in banda X possiedono, al contrario di quelle in banda L, maggiori difficoltà di acquisizione in aree vegetate rispetto alla banda C, a causa della minore lunghezza d'onda utilizzata (2,4-3,75 cm per la banda X, contro 3,75-7,5 cm per la banda C). Tuttavia, i sistemi che operano in banda X sono stati progettati in modo da acquisire immagini su una stessa area con tempo di rivisitazione più ridotto, diminuendo quindi i fenomeni di decorrelazione temporale e consentendo di controllare fenomeni caratterizzati da velocità più elevate. La lunghezza d'onda più ridotta consente inoltre di ottenere una precisione maggiore nella stima delle deformazioni (calcolate come frazioni di  $\lambda$ ).

L'uso di una minore lunghezza d'onda, accentua i problemi legati all'ambiguità di fase, infatti, essendo minore il valore della semilunghezza d'onda relativa alla banda X rispetto a quella della banda C ( $\lambda = 1,55$  cm, invece di 2,83 cm), è maggiore la probabilità che le deformazioni che si verificano nell'intervallo di tempo che intercorre tra le acquisizioni superino tale valore.

I principali satelliti civili dotati di sensore SAR in banda X sono:

- TERRASAR-X (DLR)
- COSMO-SkyMed (ASI)

## TERRASAR-X

Il *German Aerospace Center* (DLR), in collaborazione con il *British National Space Center* (BNSC) ed altri partner inglesi, ha messo in orbita nel Giugno del 2007 il satellite TerraSAR-X (<http://www.infoterra.de/terrasar-x.html>), dotato di sensore SAR in banda X, con  $\lambda = 3,1$  cm e frequenza di 9,6 GHz. Il sensore può lavorare con diverse polarizzazioni ed ha un *repeat cycle* di 11 giorni. Il satellite fornisce immagini a elevata risoluzione, ha la possibilità di variare l'angolo di osservazione tra 15° e 60° e può ritornare sulla stessa area con un tempo inferiore o uguale a 2 giorni, caratteristica molto utile per l'osservazione di fenomeni caratterizzati da tassi di movimento rapidi.

Sono disponibili 3 diverse modalità di acquisizione (<http://www.infoterra.de/terrasar-x/radar-imagery/basic-imagery.html>) - Figura 9:

- SpotLight: l'area ripresa possiede *swath* di 10 km e risoluzione fino a circa 1 m;
- StripMap: l'area ripresa possiede *swath* di 30 km e risoluzione fino a circa 3 m;
- ScanSAR: l'area ripresa possiede *swath* di 100 km e risoluzione fino a circa 18m.

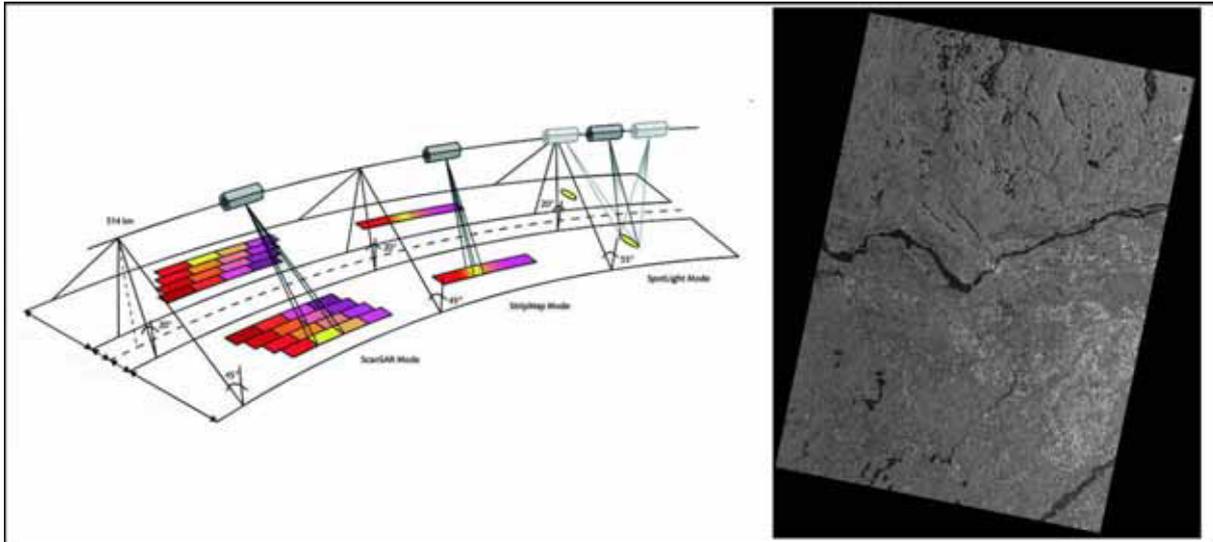


Figura 9 – Modalità di acquisizione del satellite TerraSAR-X ed un'immagine acquisita in modalità StripMap con risoluzione di 3m di Ottawa, Canada (<http://www.infoterra.de/terrasar-x.html>).

### COSMO-SkyMed

L'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) ed alcune società del Gruppo Finmeccanica come Telespazio (ora e-GEOS) ed Alenia Spazio, in collaborazione con il Ministero della Difesa, stanno portando avanti il programma COSMO-SkyMed, Constellation of small Satellites for the Mediterranean basin Observation ([http://www.asi.it/it/attivita/osservazione\\_terra/cosmoskymed](http://www.asi.it/it/attivita/osservazione_terra/cosmoskymed)). Si tratta di una costellazione di quattro satelliti per l'osservazione della Terra, per applicazione civile e militare. Ciascuno dei quattro satelliti sarà dotato di sensori SAR in banda X e *repeatcycle* di 16 giorni. In Figura 10 due esempi di immagini SAR acquisite sul territorio nazionale.

Saranno disponibili quattro diverse modalità di acquisizione ([http://www.e-geos.it/cosmo\\_prog.htm](http://www.e-geos.it/cosmo_prog.htm)):

- SpotLight: l'antenna viene puntata in modo che il fascio illumini sempre una stessa area a terra; l'aumento del contenuto informativo rispetto ad una ristretta area geografica si traduce nella possibilità di migliorare la risoluzione. L'area ripresa possiede *swath* di 10 km e risoluzione fino a circa 1 m.
- StripMap: il sensore acquisisce utilizzando un unico fascio e mantenendo l'angolo di incidenza costante per tutta la durata dell'acquisizione. L'area ripresa possiede *swath* di 30-40 km e risoluzione di circa 3-15 m.
- ScanSAR: il sensore acquisisce cambiando le caratteristiche del fascio durante l'acquisizione in modo da variare l'angolo di incidenza e aumentare la dimensione dell'area acquisita. L'area ripresa possiede *swath* di 200 km e risoluzione di circa 30-100 m.
- MultiPolar: simile alla modalità StripMap, ma la scena è acquisita cambiando periodicamente la polarizzazione di trasmissione e/o ricezione.

Il Sistema COSMO-SkyMed può operare nelle tre seguenti modalità:

- *Routine*: Modalità operativa nominale nella quale la pianificazione viene effettuata ogni 24 ore.
- *Crisi*: Modalità operativa nella quale la pianificazione viene effettuata ogni 12 ore. In tale modalità è possibile definire aree sulle quali tutte le richieste di ripresa hanno priorità assoluta.
- *Emergenza*: Modalità operativa asincrona attivata in circostanze eccezionali al fine di ottenere un'acquisizione nel più breve tempo possibile.

Tale flessibilità di acquisizione, soprattutto in condizioni di emergenza, costituisce una caratteristica molto utile per l'osservazione di fenomeni caratterizzati da tassi di movimento rapidi e per un uso operativo per scopi di protezione civile.

La costellazione viene realizzata gradualmente, infatti, i primi due satelliti sono stati messi in orbita nel 2007, il terzo nel 2008, e l'ultimo verrà lanciato nel 2010. La costellazione diventerà pienamente operativa entro la metà del 2010.

L'uso della costellazione COSMO-SkyMed permetterà di ridurre i tempi tra due acquisizioni successive relative alla stessa area, grazie al *repeat cycle* di ogni satellite e alla possibilità di acquisire su una stessa area mediante i diversi satelliti della costellazione. L'uso combinato dei 4 satelliti potrà infatti permettere di ottenere certamente una frequenza di rivisitazione più elevata.

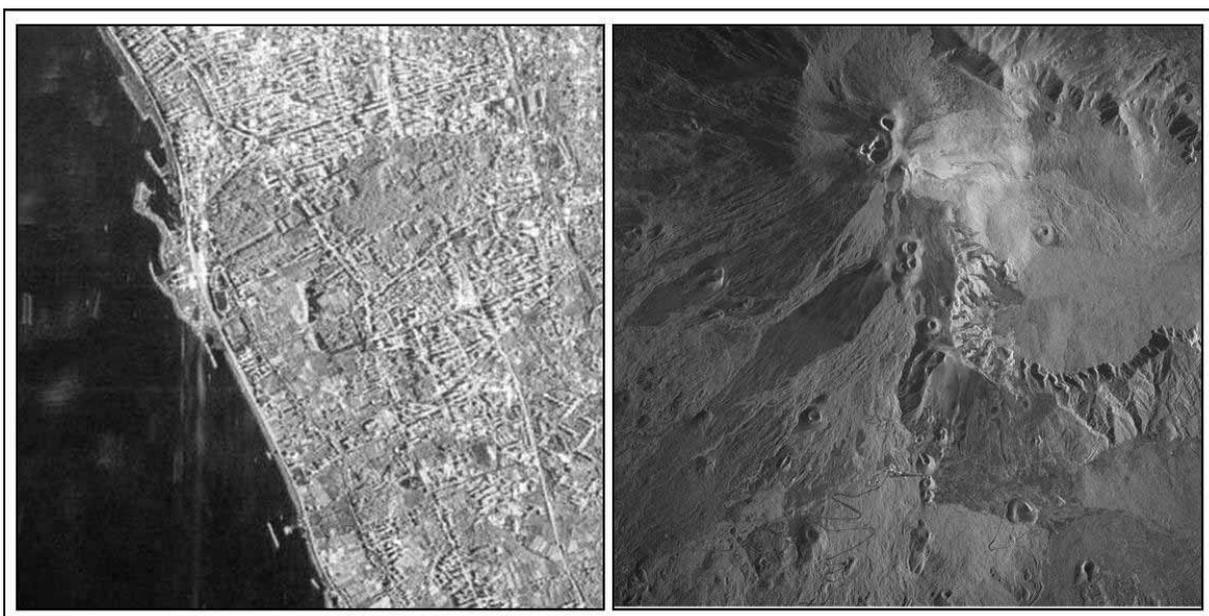


Figura 10 – Due tra le prime immagini dei satelliti COSMO-SkyMed: l'area di Pompei (NA) e la sommità del Monte Etna (<http://www.asi.it/>).

## 2.4 Tecniche di elaborazione

### 2.4.1 Interferometria differenziale (DInSAR)

La tecnica convenzionale per lo studio di dati SAR è l'interferometria differenziale (DInSAR), che si basa sull'analisi delle variazioni del valore di fase tra due distinte acquisizioni in modo tale da mettere in luce eventuali differenze riconducibili a fenomeni di deformazione, topografia o disturbi atmosferici (Massonnet e Feigl, 1998, Rosen et al., 2000).

L'interferogramma è la matrice di dati ottenuta dal confronto tra le due distinte acquisizioni della stessa area e racchiude in sé le informazioni relative ai vari contributi che generano il valore di fase.

Come accennato, il segnale radar relativo ad un bersaglio è caratterizzato da due valori: l'ampiezza e la fase. L'ampiezza individua la parte di campo elettromagnetico incidente riflessa verso il sensore. Nelle immagini radar di ampiezza appaiono particolarmente riflettenti le strutture metalliche (tralicci, antenne, linee ferroviarie), mentre bacini d'acqua e strade sono solitamente poco riflettenti: essi sono caratterizzati infatti da fenomeni di riflessione speculare in cui la quota di campo riflessa verso il satellite risulta molto contenuta. La fase racchiude invece l'informazione più importante ai fini delle applicazioni interferometriche: la distanza sensore-bersaglio. I termini che contribuiscono alla fase di una singola immagine SAR sono molteplici e possono essere riassunti nella seguente equazione:

$$\phi = \psi + \frac{4\pi}{\lambda} \cdot r + \alpha + n$$

dove  $\psi$  è il termine di fase dovuto alla riflettività del bersaglio (dipendente dal materiale e dalla sua geometria),  $\alpha$  è un contributo di fase dovuto all'atmosfera,  $r$  è la distanza sensore-bersaglio (questo valore, moltiplicato per il fattore riportato nell'equazione, viene indicato con il termine di propagatore) e  $n$  è un inevitabile rumore proprio del sistema di acquisizione.

L'obiettivo della tecnica interferometrica è quello di isolare gli effettivi contributi di fase dovuti al movimento del bersaglio e non imputabili a disturbi, ovvero di stimare accuratamente la differenza di cammino ottico  $\Delta r$  dell'onda elettromagnetica trasmessa in due successive acquisizioni e retrodiffusa dal bersaglio a terra.

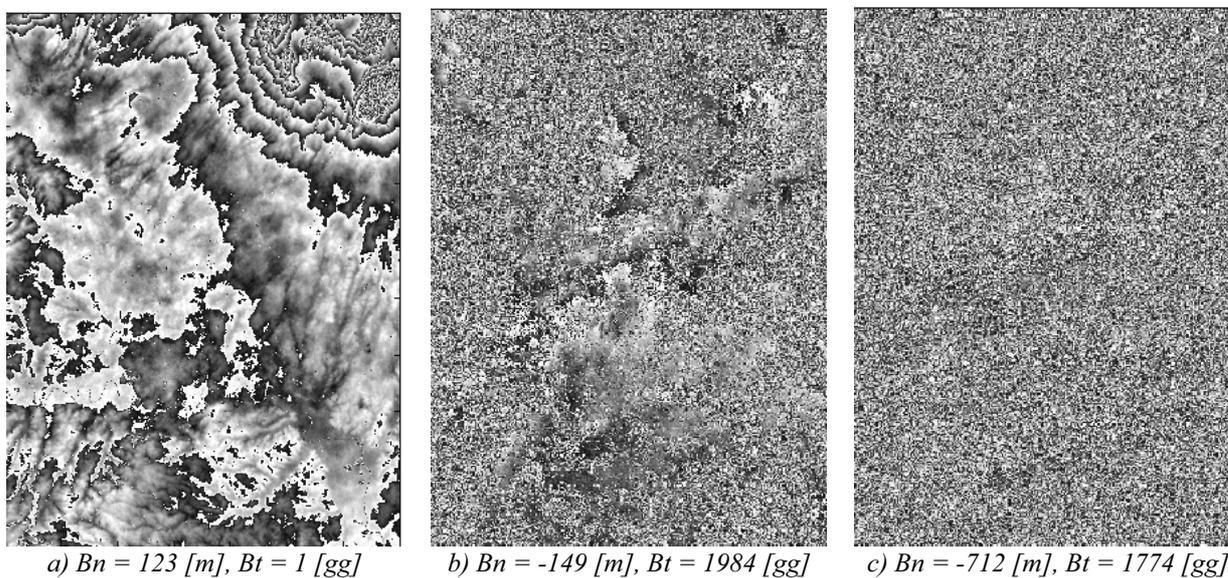
La fase di una singola immagine SAR non è di fatto utilizzabile, perché risulta impossibile discriminare un contributo dall'altro. Se si hanno, però, due acquisizioni relative alla stessa area, accuratamente registrate sulla stessa griglia di riferimento, è possibile utilizzare l'informazione contenuta in esse. In questo caso, infatti, si genera un interferogramma sottraendo la fase di un'immagine a quella dell'altra. Se non avvengono particolari cambiamenti nel periodo tra le due acquisizioni, i contributi dovuti alla riflettività si elidono e la fase dell'interferogramma dipende, con buona approssimazione, solo dalla distanza sensore-bersaglio e, quindi, da eventuali movimenti intercorsi tra le due acquisizioni (a parte i contributi spuri dovuti all'atmosfera e al rumore).

Diversi effetti riducono (o addirittura compromettono) la qualità dei risultati ottenuti con l'analisi DInSAR. In primo luogo i fenomeni di decorrelazione temporale. Questi sono causati dalla variabilità delle proprietà elettromagnetiche (riflettività) dei bersagli radar tra i diversi giorni di acquisizione del dato, indicati dal parametro *baseline* temporale: in questo caso l'ipotesi che il contributo  $\psi$  si elida generando l'interferogramma non è più verificata. Le zone coperte da vegetazione, facilmente influenzabili dal vento e di diverso aspetto a seconda della stagione, sono spesso fonte di decorrelazione, mentre i centri urbani e le rocce esposte rimangono maggiormente stabili nel tempo (cambiamenti possono essere causati anche da altri eventi atmosferici quali pioggia o neve).

La qualità dell'interferogramma dipende anche dalla distanza tra le due orbite effettivamente percorse dal sensore durante l'acquisizione delle due immagini (detta *baseline* normale o geometrica). Si può

dimostrare che maggiore è il valore assoluto della *baseline*, minore è la banda comune tra i due segnali e quindi minore è il rapporto segnale-rumore relativo all'interferogramma da esse generato. Questo disturbo è denominato decorrelazione geometrica.

Nella figura 11 è riportato un esempio dell'influenza dei fenomeni di decorrelazione temporale e geometrica sulla qualità dell'interferogramma. L'interferogramma a) è stato ottenuto utilizzando due acquisizioni a distanza di 1 giorno e con *baseline* normale pari a 123 m. Grazie al limitato intervallo di tempo che separa le due immagini della coppia interferometrica, le condizioni della scena non mutano sensibilmente, infatti, l'interferogramma presenta una buona coerenza, ovvero sono pressoché assenti nell'immagine fenomeni di rumore. Le frange interferometriche sono ben visibili e sono legate essenzialmente alla componente topografica della zona campione. Nell'interferogramma b) l'intervallo temporale tra le due immagini della coppia interferometrica è pari a 1984 giorni, ma la componente di *baseline* normale è quasi inalterata (149 m). In esso vengono registrati sensibili disturbi dovuti a decorrelazione temporale e la coerenza diminuisce rispetto al caso a). Nell'interferogramma c) i valori di *baseline* temporale e normale sono entrambi elevati e l'immagine appare completamente rumorosa e si perde completamente coerenza (TRE, 2008).



**Figura 11 - Interferogrammi e disturbi dovuti a decorrelazione temporale e geometrica (TRE, 2003).  $B_n$  = Baseline normale;  $B_t$  = Baseline temporale**

L'interpretazione dei dati interferometrici può essere ulteriormente complicata dalla variazione delle condizioni atmosferiche durante le due acquisizioni che si possono tradurre in un ulteriore termine di fase ( $\alpha$ ), difficile da discriminare dal contributo relativo al movimento (Figura 12). Un'attenta analisi bibliografica porta comunque alla conclusione che, con l'interferometria SAR tradizionale, si possono stimare movimenti con un'accuratezza dell'ordine del centimetro; inoltre, in genere non è possibile effettuare stime puntuali, ma solo analisi d'insieme per identificare fenomeni macroscopici in atto (estensione  $> 0.2 \text{ km}^2$ ).



Figura 12 - Componente atmosferica di fase sovrapposta all'immagine di ampiezza (TRE, 2003).

#### 2.4.2 Tecniche Multi-Interferogramma

Un'evoluzione dell'analisi interferometrica differenziale per lo studio delle deformazioni superficiali è costituita dalle tecniche interferometriche avanzate, le A-DInSAR (Advanced DInSAR), sviluppate a partire dagli anni '90. Queste tecniche permettono di superare alcuni dei limiti legati agli approcci più convenzionali dell'interferometria SAR, poiché consentono di contenere i fenomeni di decorrelazione temporale e geometrica e stimare i contributi di fase legati ai cambiamenti subiti dall'atmosfera tra le diverse acquisizioni.

Le tecniche A-DInSAR si basano su analisi di tipo multi-interferogramma o multi-immagine, cioè utilizzano una lunga serie di immagini radar relative a una stessa area, dalle quali vengono identificati alcuni bersagli radar, che vengono utilizzati per la misura degli spostamenti.

A differenza della tecnica interferometrica differenziale, per la quale è necessario selezionare solo coppie di immagini caratterizzate da bassi valori di *baseline* spaziale ( $< 200-300$  m) con la conseguente riduzione della frequenza di campionamento, l'utilizzo delle tecniche multi-interferogramma permette di selezionare quasi tutte le immagini SAR acquisite dal sensore prescelto sulla zona in esame. Infatti, per implementare un'analisi multi-interferogramma possono essere scelte anche immagini separate da *baseline* normale molto elevata (fino a 1200 m con immagini acquisite in banda C) (Colesanti et al., 2003a), con conseguente aumento del campionamento temporale dei fenomeni.

Grazie alla disponibilità di grandi archivi di dati acquisiti dalle agenzie spaziali, tali tecniche permettono di ottenere migliori risultati di quelli ricavabili con analisi interferometriche convenzionali, sia per la qualità delle misure di deformazione ottenute (precisione millimetrica), sia per la capacità di seguire la loro evoluzione temporale. Infatti, mentre l'interferometria differenziale campiona il fenomeno di deformazione in esame tramite lo studio di due acquisizioni (la *master*, *M*, e la *slave*, *S*), stimando soltanto la deformazione cumulata avvenuta tra le due acquisizioni o, in modo equivalente, la velocità di deformazione lineare registrata tra esse, l'analisi multi-interferogramma è capace di fornire la descrizione completa dell'evoluzione temporale delle deformazioni. Ovviamente, questa capacità è limitata dal numero e dalla distribuzione temporale delle acquisizioni disponibili.

Applicando tali tecniche si ottengono una serie di misure di deformazione su alcuni bersagli che rappresentano diffusori permanenti (*Persistent Scatterers* o *PS*), da cui qui la denominazione della tecnica *Persistent Scatterers Interferometry* (*PSI*). Di seguito vengono brevemente descritte le tecniche *PSI* utilizzate nell'ambito del presente progetto di dottorato.

#### 2.4.2.1 Permanent Scatterers Interferometry (PSInSAR)

La Tecnica *PSInSAR* è stata sviluppata e brevettata presso il Politecnico di Milano e concessa in licenza esclusiva a *TeleRilevamento Europa* s.r.l. (*TRE* – <http://www.treuropa.com>) nel 2000 (Ferretti et al., 2001; Colesanti et al., 2003a). Si tratta di uno strumento estremamente efficace per il monitoraggio con accuratezza millimetrica di fenomeni di deformazione della superficie terrestre, basato sull'impiego di serie temporali d'immagini radar satellitari. Questo approccio è basato sull'osservazione che un piccolo sottoinsieme di bersagli radar, costituito appunto dai diffusori permanenti (*Permanent Scatterers*), è praticamente immune agli effetti di decorrelazione. Essi mantengono la stessa "firma elettromagnetica" in tutte le immagini al variare della geometria di acquisizione e delle condizioni climatiche, preservando quindi l'informazione di fase nel tempo. I diffusori permanenti sono tipicamente parti di edifici, strutture metalliche, rocce esposte, comunque elementi già presenti al suolo, per i quali le caratteristiche elettromagnetiche non variano sensibilmente di acquisizione in acquisizione, mentre ciò non accade ad esempio per la vegetazione che muta di continuo.

La Figura 13 mostra una rappresentazione schematica della base teorica della tecnica interferometrica, di un *Permanent Scatterers* e dei disturbi presenti nelle acquisizioni SAR (variazione della componente di riflettività che dà luogo a decorrelazione temporale, variazioni della *baseline* normale che danno luogo a decorrelazione geometrica, disturbi atmosferici).

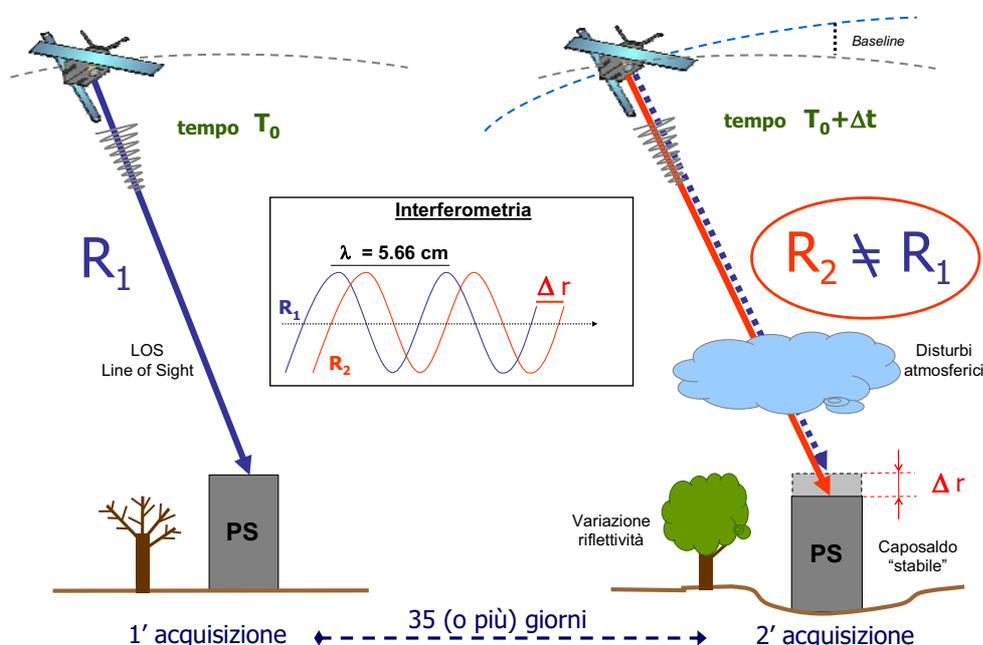


Figura 13: rappresentazione schematica della base teorica della tecnica PSInSAR (TRE)

L'elaborazione prende origine da un'analisi statistica delle immagini, che porta alla selezione dell'insieme dei diffusori permanenti, sostanzialmente immuni dai fenomeni di decorrelazione. Questa proprietà dei diffusori consente di superare gran parte delle limitazioni legate all'analisi DInSAR convenzionale.

Utilizzando le serie storiche delle acquisizioni, è possibile stimare sia l'entità del disturbo dovuto all'atmosfera terrestre, sia le possibili deformazioni superficiali della zona in esame. Dopo aver rimosso il disturbo atmosferico dai dati si è in grado di stimare accuratamente i movimenti dei diffusori permanenti utilizzando il SAR come un vero e proprio strumento di misura delle deformazioni del terreno.

Un aspetto fondamentale è la capacità di stimare correttamente e compensare il disturbo atmosferico, svolgendo un'analisi dettagliata solo sul sottoinsieme di punti selezionati secondo valutazioni statistiche. Stimato il contributo atmosferico è possibile eliminare i termini spuri dalla fase interferometrica ed isolare il termine che descrive la variazione di cammino ottico dell'onda elettromagnetica nelle varie acquisizioni, cioè descrivere i movimenti che ha subito il bersaglio in tutto l'arco temporale tra il primo e l'ultimo dato disponibile.

Per eseguire stime accurate dei disturbi atmosferici è necessario che la densità spaziale di diffusori permanenti sia sufficientemente elevata (maggiore di 5-10 punti/km<sup>2</sup>), vincolo sempre verificato in aree urbane avvalendosi di *dataset* consistenti in almeno 25-30 immagini ERS. In aree ad elevata urbanizzazione, la densità spaziale raggiunge valori molto alti: 100 – 400 punti/km<sup>2</sup>.

I diffusori permanenti vengono correttamente posizionati nella cella di risoluzione al suolo e in corrispondenza di ciascuno si effettua una misura di deformazione per ogni acquisizione disponibile, con accuratezza sino a 1-2 mm su ogni singola misura (per i punti migliori). Si è quindi in grado di ricostruire il *trend* medio di deformazione annua, con accuratezza compresa tra 0.1 e 1 mm/anno. L'accuratezza è funzione del numero di immagini e della "qualità" del diffusore stesso, cioè di quanto l'informazione di fase è immune ai fenomeni di disturbo.

#### 2.4.2.2 PSP-DIFSAR)

La tecnica PSP-DIFSAR è stata sviluppata da Telespazio S.p.A. (TPZ, <http://www.telespazio.it>), ora e-GEOS (<http://www.e-geos.it>).

La tecnica PSP-DIFSAR appartiene agli algoritmi che selezionano i pixel sui quali eseguire le misure di deformazione sulla base dell'analisi della coerenza del segnale, ovvero, all'interno di lunghi *dataset* di immagini acquisite sull'area di studio, la tecnica permette di selezionare pixel caratterizzati da elevati valori di coerenza, corrispondenti solitamente ad aree urbane, suburbane e industriali.

La tecnica PSP-DIFSAR consente di estrarre, in corrispondenza dei pixel coerenti, mappe di velocità media di deformazione dei capisaldi radar e le serie storiche di deformazione durante l'intervallo coperto dalle acquisizioni.

Le caratteristiche principali della tecnica sono:

- la possibilità di unire mappe di deformazione ottenute da coppie di acquisizioni, in un'unica serie temporale;
- l'implementazione della fase di srotolamento (*phase unwrapping*) a partire dai punti affidabili sparsi sul territorio (punti ad alta coerenza) e la successiva estensione dell'elaborazione alle aree parzialmente coerenti (Costantini & Rosen, 1999);

- l'ottimizzazione della *baseline*, che consiste nel miglioramento dell'accuratezza dei parametri orbitali del satellite effettuata a partire dalle caratteristiche delle immagini ottenute. Tale approccio è fondamentale per portare a termine l'analisi su vaste aree senza incorrere in errori dovuti alla conoscenza inaccurata dei parametri orbitali.

I primi test della catena di elaborazione PSP-DIFSAR sono stati condotti su alcune aree interessate da fenomeni di subsidenza, quali Bologna e Napoli (Costantini et al., 2000a e 2000b) e sulla frana di Maratea (Berardino et al., 2003), sulla quale le applicazioni hanno dimostrato che le deformazioni misurate dal SAR sono in buon accordo con le misure GPS.

Uno dei vantaggi della tecnica PSP-DIFSAR rispetto ad altre tecniche multi-interferogramma, è la possibilità di elaborare anche *dataset* composti da un ristretto numero di acquisizioni SAR e di ottenere un elevato numero di punti di misura.

### 3 MONITORAGGIO DI MOVIMENTI DI MASSA LOCALIZZATI CON TECNICA PSI

Negli ultimi anni l'utilizzo delle tecniche interferometriche satellitari si sta affermando come strumento per il monitoraggio e la valutazione dei dissesti idrogeologici. In questa sezione viene presentato uno stato dell'arte sull'utilizzo dei dati PS per la valutazione di movimenti di massa localizzati, focalizzando su dissesti idrogeologici quali fenomeni franosi, subsidenze e sprofondamenti. Per ogni tipologia di dissesto, vengono descritte le problematiche ed i risultati relativi alle applicazioni di analisi interferometriche emersi da un'indagine bibliografica a livello internazionale e vengono riportati esempi di applicazioni a livello nazionale.

#### 3.1 Dissesti idrogeologici monitorabili con tecnica PSI

Non tutte le tipologie di dissesto idrogeologico possono essere individuate ed interpretate con l'ausilio dei dati radar satellitari. L'utilizzo della tecnica multi-interferogramma come strumento per il controllo delle deformazioni superficiali e per l'interpretazione dei dissesti idrogeologici ha fornito in questi ultimi anni validi risultati in diverse applicazioni e, in particolare, per lo studio di fenomeni franosi (Berardino et al., 2003; Colesanti et al., 2003b; Farina et al., 2003; Colesanti & Wasowski, 2006; Hilley et al., 2004; Canuti et al., 2005a; Ferretti et al., 2005; Strozzi et al., 2005; Ambrosi & Crosta, 2006; Farina et al., 2006, 2007; Meisina et al., 2006, 2007; Pancioli et al., 2008; Righini et al., 2008; Casagli et al., 2008), subsidenza (Ferretti et al., 2000a e 2000b; Colombo et al., 2003; Ferretti et al., 2004; Canuti et al., 2005b; Colesanti et al., 2005; Manzo et al., 2005; Dixon et al., 2006; Bell et al., 2008; Stramondo et al., 2008), sollevamento, movimenti tettonici e faglie (Colesanti et al., 2003a; Musson et al., 2004; Bürgmann et al., 2006; Funning et al., 2007; Lanari et al., 2007; Parcharidis et al., 2009; Vilardo et al., 2009; Massironi et al., in stampa) e attività vulcanica (Lanari et al., 2004; Salvi et al., 2004; Tizzani et al., 2007).

All'interno di ciascuna tipologia di fenomeno non tutti i movimenti sono misurabili, in funzione delle caratteristiche del fenomeno stesso, ed in particolare della velocità di deformazione, dell'estensione, dell'uso del suolo e della dinamica di movimento.

In generale la tecnica multi-interferogramma si presta per l'analisi di frane lente, subsidenze, faglie attive e aree vulcaniche; tuttavia i fenomeni di dissesto idrogeologico che possono essere controllati variano in funzione dei dati SAR utilizzati poiché le capacità della tecnica sono strettamente connesse con la lunghezza d'onda del segnale utilizzato, il ciclo di rivisitazione del satellite, il numero di acquisizioni disponibili sull'area di interesse e la loro frequenza temporale.

Le aree con tettonica attiva e quelle vulcaniche possiedono caratteristiche tali da potere essere analizzate e monitorate mediante interferometria radar satellitare, infatti, queste sono caratterizzate da deformazioni superficiali estremamente lente e riguardano generalmente aree molto estese.

E' possibile analizzare l'applicabilità delle tecniche interferometriche satellitari in relazione alla tipologia di dissesto idrogeologico, alla loro dimensione, alla scala temporale e spaziale, all'uso del suolo e all'esposizione dei versanti. Di seguito vengono analizzati i fattori comuni alle diverse tipologie di dissesto, poi nei paragrafi successivi, l'applicabilità dei dati interferometrici viene analizzata in funzione dei diversi dissesti monitorabili.

In relazione alla **scala temporale**, la velocità di deformazione massima misurabile tramite interferometria satellitare implementata con sensori che hanno tempi di ricopertura dell'ordine del

mezzo, senza incorrere in problemi di ambiguità delle misure, risulta di circa 6 cm/anno. Non risultano quindi monitorabili i fenomeni ad evoluzione rapida o caratterizzati da accelerazioni repentine.

Dal punto di vista della **scala spaziale**, sia l'analisi a larga scala che l'analisi a scala di versante possono trarre beneficio dall'utilizzo dei dati PS. Infatti, grazie alla possibilità di coprire aree che superano i 100 km<sup>2</sup> con una singola acquisizione, l'interferometria radar può essere utilizzata sia per dissesti idrogeologici a piccola scala, che per portare avanti analisi di dettaglio (a scala di versante), grazie alla sua capacità di fornire misure di spostamento accurate relative a singole strutture o edifici.

L'applicabilità delle tecniche interferometriche satellitari alle diverse classi d'**uso del suolo** è riportata nella Tabella 1. L'interferometria SAR da satellite permette di ottenere ottimi risultati nel monitoraggio delle deformazioni soprattutto in aree urbanizzate che, per la presenza di edifici e infrastrutture, hanno elevate proprietà di riflessione del segnale radar. Nel caso di zone agricole la presenza di edifici sparsi e manufatti consente la presenza di bersagli radar e quindi il monitoraggio satellitare delle deformazioni. In aree con elevata copertura vegetale quali quelle boscate, la presenza di bersagli radar è limitata a rocce esposte o edifici isolati. La possibilità di individuare PS in tali aree è perciò bassa. Per i corpi idrici, e quindi anche ghiacciai, non hanno le caratteristiche elettromagnetiche necessarie per individuare PS.

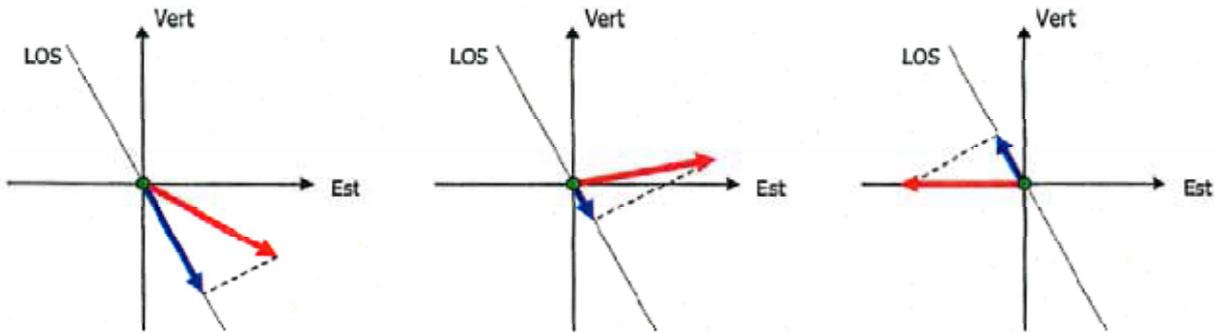
USO DEL SUOLO	MONITORAGGIO TECNICA PSI
Territori modellati artificialmente	SI
Territori agricoli	SI
Territori boscati e ambienti semi-naturali	BASSA
Zone umide e corpi idrici	NO

**Tabella 1 - Applicabilità della tecnica PSI alle diverse classi di uso del suolo, riferita al livello 1 della classificazione CORINE Land Cover del 2000.**

Laddove sono presenti dissesti monitorabili con tecnica PS, è necessario tener conto del fatto che le tecniche interferometriche consentono di misurare la componente della deformazione relativa alla direzione che congiunge il sensore con il bersaglio a terra, ovvero la linea di vista del satellite (LOS). Le misure di spostamento fornite dai dati PS sono perciò una **componente di deformazione** del vettore reale dello spostamento.

Quanto più la direzione del vettore di deformazione reale si discosta dalla linea di vista, tanto minore è la componente di deformazione rilevata dal satellite e, al limite, nel caso di deformazione che si sviluppa con direzione perpendicolare alla LOS, il valore misurato risulta nullo.

Nella Figura 14 è schematizzata la variabilità della componente di deformazione misurata per mezzo dell'interferometria radar in funzione dell'orientazione della direzione reale di deformazione.



**Figura 14- Componente di deformazione rilevabile dal sensore radar (in blu) in funzione della direzione reale (in rosso) di deformazione del bersaglio (Tele-Rilevamento Europa, 2008).**

In aree montuose e collinari dove si verificano dissesti di versante, al fine di valutare quale sia l'entità della componente di spostamento misurata con la tecnica interferometrica utilizzata e comprendere il significato e la bontà dei risultati ottenuti, può risultare particolarmente utile analizzare l'**esposizione del versante** in analisi.

Se è possibile ipotizzare che gli spostamenti che si verificano nell'area in esame siano caratterizzati da una componente principale diretta secondo la linea di massima pendenza del versante, per le zone in cui l'esposizione è vicina alla perpendicolare alla LOS del satellite, la componente del vettore spostamento misurabile per mezzo dell'interferometria è piuttosto bassa.

Per tale ragione è spesso necessario verificare l'eventuale presenza di zone in cui l'esposizione può mascherare eccessivamente la reale entità dello spostamento avvenuto nei periodi esaminati. A tale scopo può essere ricavata la mappa dell'esposizione relativa all'area oggetto di studio, a partire da un DTM di risoluzione adeguata.

Un altro elemento di cui tenere conto riguardo all'applicabilità delle tecniche interferometriche satellitari consiste nella presenza all'interno delle immagini radar delle **deformazioni prospettiche** causate dalla geometria di acquisizione dei sistemi radar satellitari e dalla topografia del terreno. La presenza dei fenomeni di *layover*, *foreshortening* o di *shadowing* provoca la sovrapposizione o l'assenza di segnali in alcune aree della scena e ciò comporta che la reale copertura dell'area analizzata con i risultati di un'analisi interferometrica non risulta uniforme.

### 3.2 Fenomeni Franosi

Sulla base delle caratteristiche della tecnica PSI e dei risultati ottenuti dalle diverse applicazioni effettuate è possibile sintetizzare i casi in cui si possono ottenere dei risultati soddisfacenti dall'interferometria SAR satellitare.

Per frane si intende un "movimento di una massa di roccia, terra o detrito lungo un versante" (Cruden, 1991) e con questo termine si include un ampio spettro di tipologia di dissesti, non tutti monitorabili con dati PS.

Facendo riferimento alle diverse **tipologie** di fenomeni franosi individuate nella classificazione di Cruden & Varnes (1994) e tenendo conto dei diversi tipi di materiale coinvolto, l'applicabilità delle tecniche interferometriche satellitari è schematizzata nella Tabella 2.

TIPOLOGIA	MATERIALE	MONITORAGGIO TECNICA PSI
<b>Crollo</b>	Roccia/detrito/terra	NO
<b>Ribaltamento</b>	Roccia/detrito/terra	NO
<b>Scivolamento</b>	Roccia	SI
	Detrito/terra	SI
<b>Colata</b>	Roccia	SI
	Terra	Parzialmente
	Detrito	NO
<b>Espansione</b>	Roccia/detrito/terra	Parzialmente

**Tabella 2 – Applicabilità della tecnica PSI alle diverse tipologie di frane individuate da Cruden & Varnes (1994).**

Nello specifico, i fenomeni di crollo e ribaltamento sono difficilmente osservabili mediante interferometria da satellite a causa della rapidità con cui si sviluppano. Benché in letteratura non esistano esempi di questo tipo di applicazione è ipotizzabile che la tecnica multi-interferogramma possa individuare i movimenti precursori di distacco del materiale.

Per il monitoraggio dei fenomeni di scivolamento, le tecniche interferometriche satellitari hanno dato ottimi risultati, sia per movimenti traslativi che rotazionali (Rizzo & Tesauro, 2000; Colesanti & Wasowski, 2004; Strozzi et al., 2005; Farina et al., 2006).

Per le colate, in funzione del materiale coinvolto, si possono ottenere risultati diversi. Le colate in roccia, caratterizzate da movimenti generalmente molto lenti distribuiti in maniera continua all'interno della massa spostata senza una ben definita superficie di dislocazione, risultano monitorabili mediante interferometria SAR da satellite. Le colate in terra lo sono soltanto fino a quando il contenuto d'acqua è limitato e i movimenti rimangono molto lenti (Squarzone et al., 2003). Le colate di detrito, a causa dell'estrema rapidità con cui si sviluppano, sono invece fuori dalle capacità di misura delle tecniche interferometriche.

I fenomeni di espansione laterale possono essere parzialmente controllati, infatti può essere misurata solo la componente sub-verticale delle deformazioni, legata alla subsidenza dei livelli competenti ed indotta dall'estensione sub-orizzontale di livelli sottostanti a minor competenza (Meisina et al., 2007). Chiaramente, le espansioni di terreni a seguito di fenomeni di liquefazione non sono misurabili mediante interferometria da satellite a causa della loro rapidità.

Inoltre, all'interno della stessa tipologia, si deve tener conto anche della velocità con cui il fenomeno evolve. Facendo riferimento alla scala delle **velocità** proposta dallo IUGS/WGL (1995) e da Cruden & Varnes (1994), è possibile delineare quali siano i fenomeni che possono essere monitorati, come riportato sinteticamente nella Tabella 3.

L'interferometria da satellite implementata con i sensori attualmente operativi, e quindi con tempi di ricopertura dell'ordine del mese, permette di misurare solamente le prime due delle sette classi di velocità dei fenomeni franosi, ossia le frane estremamente lente e quelle molto lente.

CLASSE	VELOCITÀ	MONITORAGGIO TECNICA PSI
Estremamente lento	< 16 mm/anno	SI
Molto lento	0,016 – 1,6 m/anno	SI
Lento	1,6 m/anno - 13 m/mese	NO
Moderato	13 m/mese – 1,8 m/h	NO
Rapido	1,8 m/h - 3 m/min	NO
Molto rapido	3 m/min - 5 m/s	NO
Estremamente rapido	> 5 m/s	NO

**Tabella 3 - Applicabilità della tecnica PSI alle classi di velocità delle frane proposte dal IUGS/WGL (1995) e da Cruden & Varnes (1994).**

Dal momento che spesso i fenomeni franosi si verificano in aree montuose, le difficoltà legate alla carenza o all'assenza di bersagli radar e le significative deformazioni prospettiche dovute alla topografia e alla presenza di copertura nevosa, fanno sì che si possano presentare notevoli difficoltà nel monitoraggio con tecnica PSI di tali aree.

Si ricorda inoltre che la possibilità di individuare sul territorio bersagli stabili nel tempo nei confronti del segnale radar dipende in primo luogo dall'uso del suolo, infatti, la presenza di strutture antropiche o bersagli naturali molto riflettenti quali le rocce esposte, favorisce durante l'elaborazione dei dati l'individuazione di numerosi punti di misura radar.

L'analisi dei dati satellitari per la valutazione dei fenomeni franosi può essere condotta a diverse scale spaziali, in funzione della finalità dello studio. Un'analisi condotta su area vasta, come a scala di bacino, può condurre all'aggiornamento della mappa inventario dei fenomeni franosi che riporta la distribuzione spaziale dei movimenti di versante passati ed ancora identificabili sul territorio al momento della realizzazione dell'inventario stesso, includendo spesso informazioni che riguardano la tipologia e lo stato di attività dei fenomeni. L'informazione fornita dall'analisi del dato interferometrico può essere inclusa in una mappa inventario come classificazione dei fenomeni in funzione dell'intensità e dello stato di attività (Figura 15). I risultati ottenuti da un'analisi volta all'individuazione e modifica dei limiti di fenomeni di dissesto e alla valutazione del loro stato di attività e della loro intensità, possono essere considerati parte integrante di una metodologia per l'aggiornamento delle mappe dei fenomeni franosi (Figura 16).

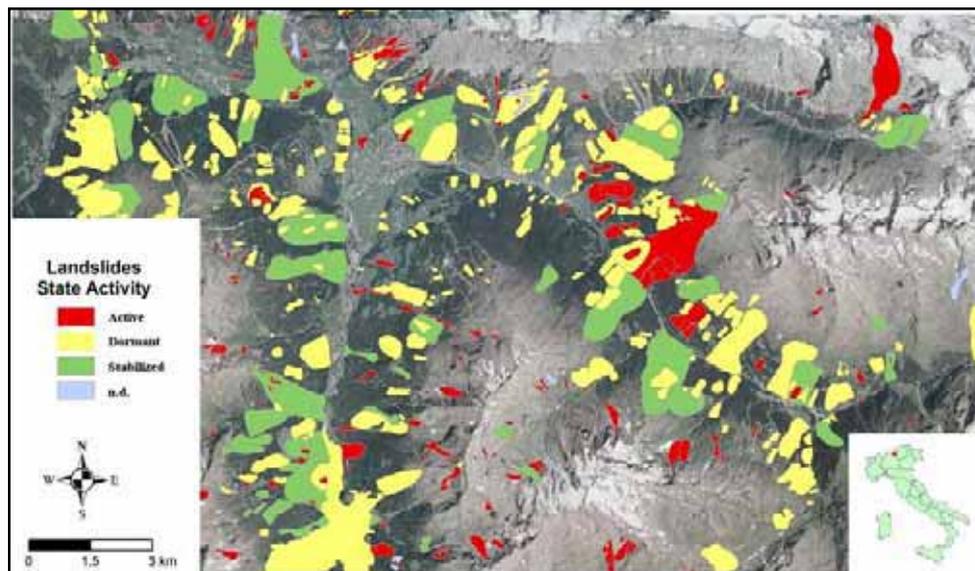


Figura 15 – Esempio di aggiornamento di una mappa dei fenomeni franosi classificati in funzione dello stato di attività, tramite l’utilizzo di dati PS ERS1/2 ed ENVISAT (Righini et al., 2008).

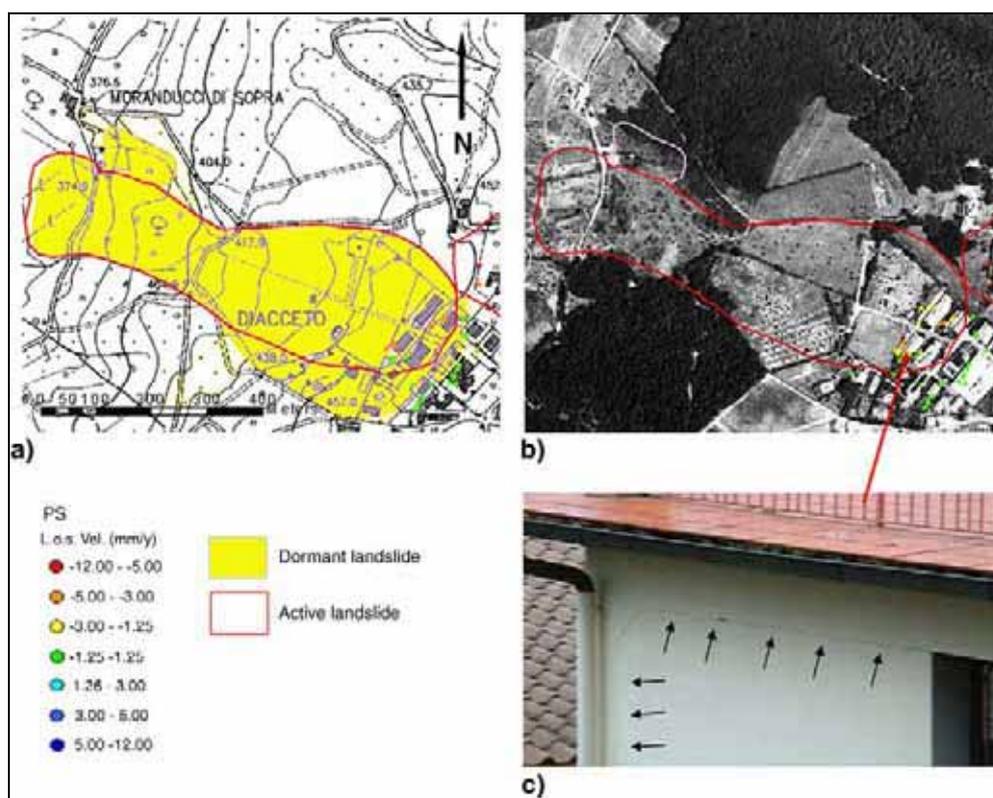


Figura 16 - Esempio di aggiornamento della mappa inventario delle frane del bacino dell’Arno effettuato mediante l’uso della tecnica PS: (a) il poligono giallo rappresenta la frana originariamente mappata mentre il poligono rosso indica la modifica del perimetro e dello stato di attività dopo l’analisi PS; (b) foto aerea del 1996 con la frana mappata; (c) crepe su un edificio localizzato nell’area in frana. L’inventario contiene i limiti e lo stato di attività dei fenomeni e, per ciascuno di essi, è segnalata l’eventuale modifica o conferma delle sue caratteristiche (frane già mappate all’interno dell’inventario) o la sua nuova individuazione grazie all’analisi PS (Farina et al., 2006, modificato).

L'analisi dei dati radar satellitari condotta a scala locale permette di effettuare analisi su singoli fenomeni franosi presenti nell'area investigata. Tali studi costituiscono attualmente la maggior parte dei casi riportati in letteratura in cui la misura della velocità misurata dai PS viene confrontata con le misure di spostamento acquisite tramite le tecniche convenzionali di monitoraggio in situ (GPS, inclinometri, livellazione ottica, ecc.). Le serie temporali dei PS possono essere confrontate con i dati di monitoraggio strumentale per ottenere una migliore caratterizzazione dei fenomeni analizzati. Il confronto temporale tra i dati PS e quelli strumentali consiste nella valutazione della correlazione tra le misure di deformazione ottenute dalle diverse tecniche di monitoraggio.

Un esempio di confronto tra dati di superficie e di sottosuolo per la valutazione del fenomeno franoso è riportato in Figura 17; nell'esempio i dati PS e dati inclinometrici sono stati comparati quantitativamente proiettando i dati PS lungo la direzione che ha per *azimuth* quella misurata alla testa dell'inclinometro, e come pendenza quella del terreno nel punto di installazione dello strumento.

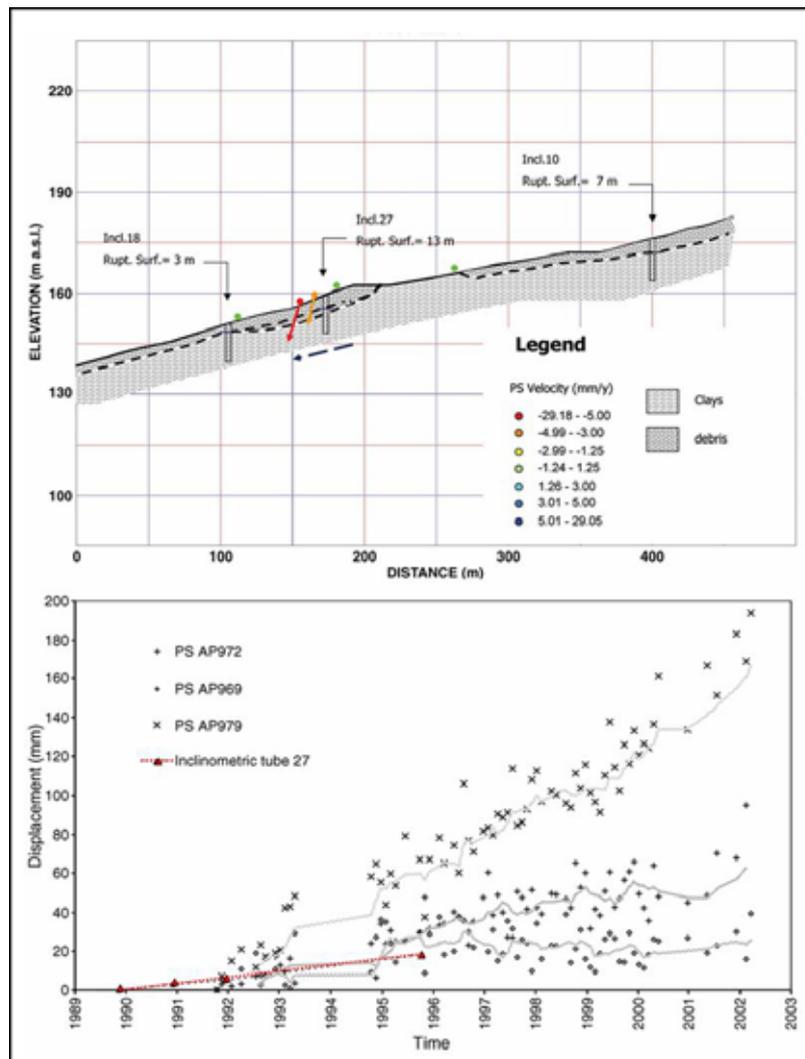


Figura 17 – Esempio di confronto quantitativo tra le misure inclinometriche e i dati PS per la frana di Carbonile (Farina et al., 2006, modificato).

Esempi di confronto fra dati PS e monitoraggio con reti GPS sono riportati in letteratura su fenomeni franosi ed aree interessate da movimenti tettonici (Colesanti et al 2001, Colesanti et al 2003b, Colesanti & Wasowski 2006, Elias et al. 2009).

### 3.3 Subsidenze

I fenomeni di subsidenza, legati a cause naturali (consolidazione di sedimenti, movimenti tettonici, ecc.) o antropiche (carico esercitato da manufatti artificiali, estrazione di fluidi dal sottosuolo, attività mineraria) possono essere monitorati agevolmente mediante l'uso delle tecniche multi-interferogramma, sia su area vasta che a scala locale, grazie alla velocità con la quale si evolvono, che sono normalmente molto basse (Figura 18). Le aree in subsidenza generalmente riguardano zone intensamente urbanizzate, dunque la densità di bersagli radar individuabili su di esse e l'accuratezza delle misure sono decisamente maggiori rispetto a qualunque altra metodologia di monitoraggio.

Attraverso l'utilizzo dei dati radar satellitari nelle aree in subsidenza è possibile effettuare un'accurata valutazione spaziale e temporale dei dissesti e l'elevata densità dei punti di misura consente di ottenere una mappatura di dettaglio dell'area (Figura 19).

Il prodotto ultimo è una mappa di sintesi delle deformazioni del terreno, realizzata a partire dai dati puntuali di deformazione forniti dall'analisi dei dati radar. A tal fine è utile applicare degli algoritmi di interpolazione spaziale dei dati.

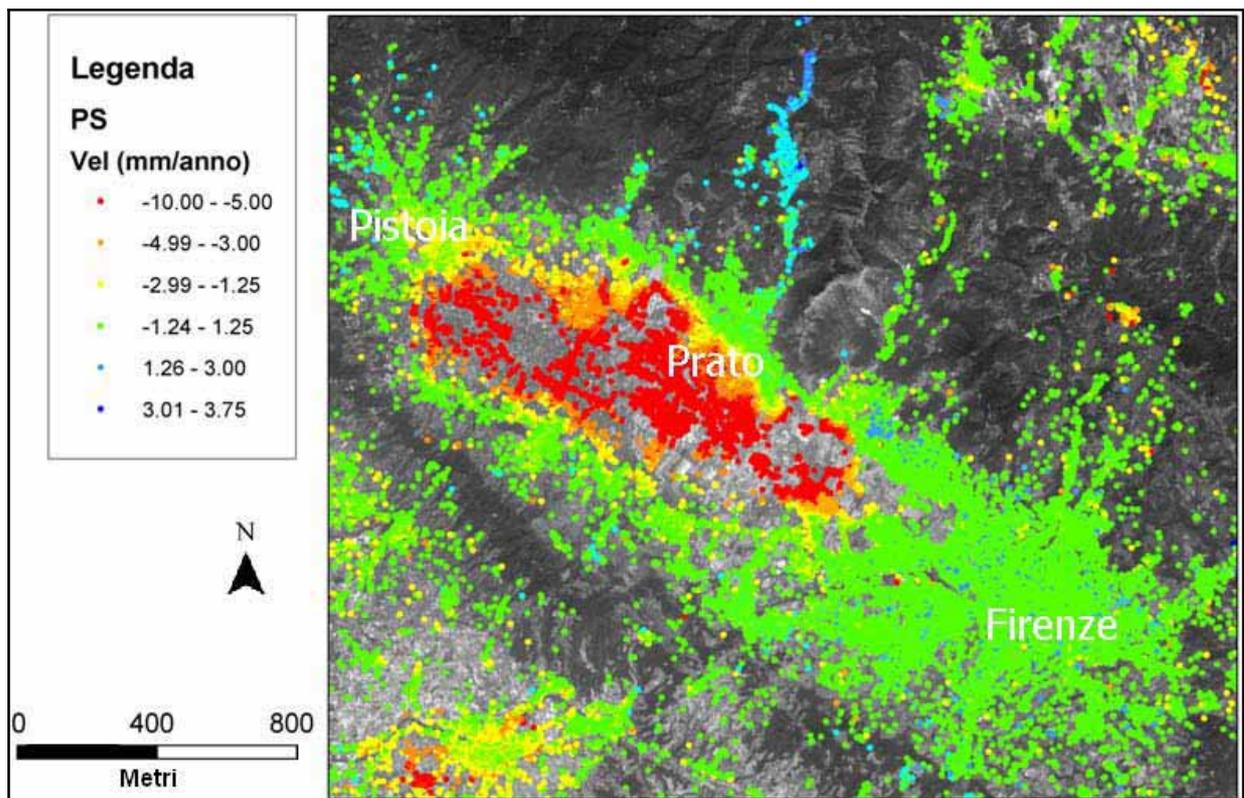
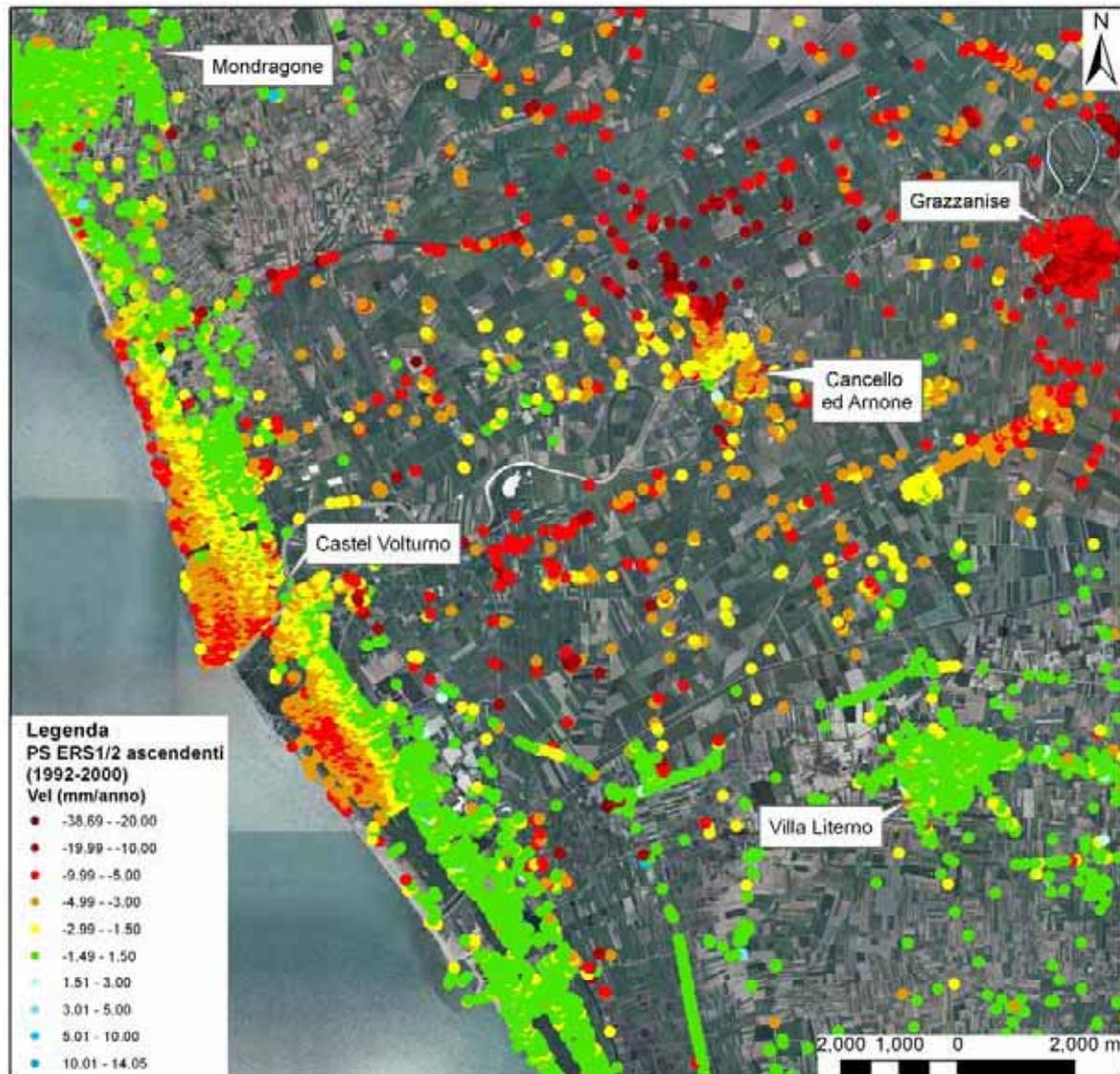


Figura 18 – Subsidenza nell'area di Prato e Pistoia, rilevata grazie all'analisi PS eseguita su dati ERS1/2 relativi al periodo 1992-2002 (Canuti et al., 2005b).



**Figura 19 – Distribuzione dei PS ERS1/2 ascendenti nella piana del Volturno (CE). In particolare, nel settore di Castel Volturno sono evidenti le nette differenze delle velocità dei PS in corrispondenza delle variazioni di *facies* in ambiente deltizio.**

Come è stato già discusso, la distribuzione spaziale delle misure radar satellitari ottenute mediante un'analisi multi-interferogramma non è omogenea, infatti, le misure di deformazione sono effettuate soltanto in corrispondenza di alcuni bersagli radar selezionati in fase di elaborazione.

Per facilitare l'interpretazione dei fenomeni in atto ed estendere spazialmente l'informazione sulle deformazioni anche alle aree prive di bersagli radar, i dati puntuali di velocità media forniti dai PS possono essere interpolati.

Chiaramente, questa operazione può essere effettuata soltanto nelle aree in cui:

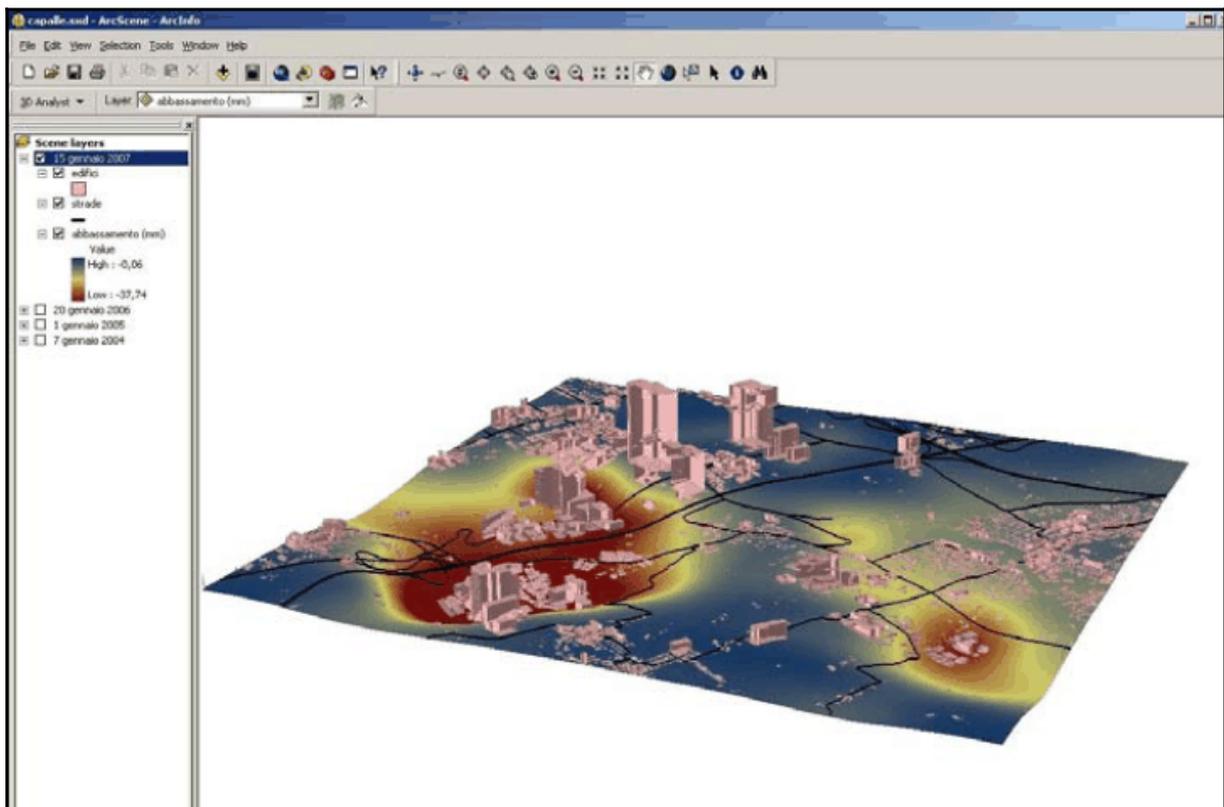
- la densità e la distribuzione dei PS sono tali da potere essere considerati rappresentativi dell'area stessa;
- la tipologia di fenomeno analizzato è caratterizzata da una distribuzione spaziale delle deformazioni correlata nello spazio.

L'**interpolazione delle velocità medie** di deformazione può essere effettuata mediante appositi algoritmi implementati in ambiente GIS, quali l'*IDW (Inverse Distance Weighted)* o il *Kriging*.

L'*IDW* è basato sulla similarità tra punti vicini ed opera a livello locale su un cerchio di determinato raggio centrato sul punto da interpolare. Nella stima del valore di velocità interpolato, pesa il contributo dei bersagli radar intorno al punto di interesse con il reciproco della loro distanza rispetto al punto stesso.

Il *Kriging* è un metodo di interpolazione spaziale che si basa sull'autocorrelazione della grandezza da stimare, cioè sull'assunzione che la grandezza in oggetto vari nello spazio con continuità. Il valore di velocità in un punto viene calcolato con una media pesata dei valori noti, utilizzando dei pesi che dipendono dalla relazione spaziale tra i valori misurati nell'intorno del punto stesso. L'utilizzo di questo metodo prevede lo studio del semivariogramma per vedere la relazione spaziale e quantitativa tra tutte le coppie di PS presenti nell'area in esame.

Nelle Figura 20 e Figura 21 sono riportati esempi di mappe di spostamento e di velocità derivanti dall'interpolazione dei dati PS. I risultati presentati riguardano fenomeni di subsidenza e sono tratti da progetti a scala di bacino e a scala regionale per lo studio dei dissesti con il contributo di tecniche interferometriche satellitari.



**Figura 20 –** Mappa degli abbassamenti (mm) nell'area di Capalle (FI), derivante dall'interpolazione dei valori di spostamento dei dati PS (Autorità di Bacino del fiume Arno, 2007).

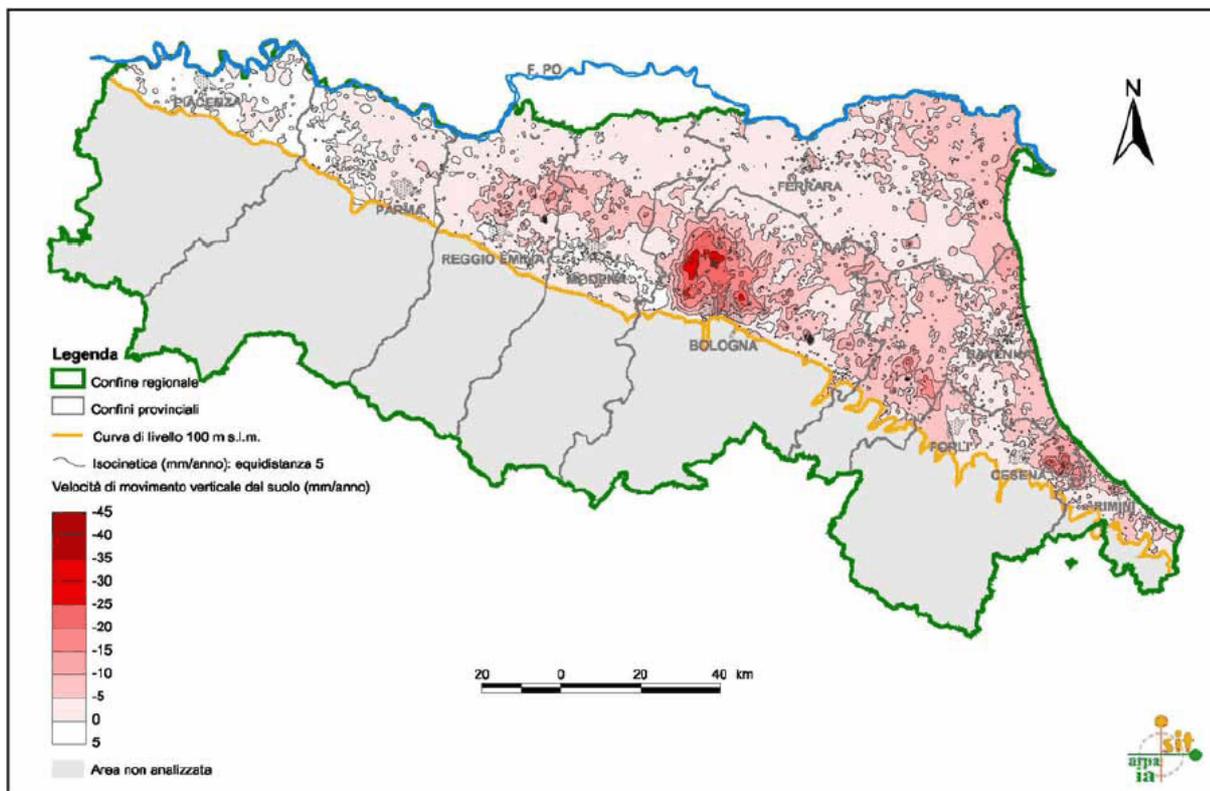
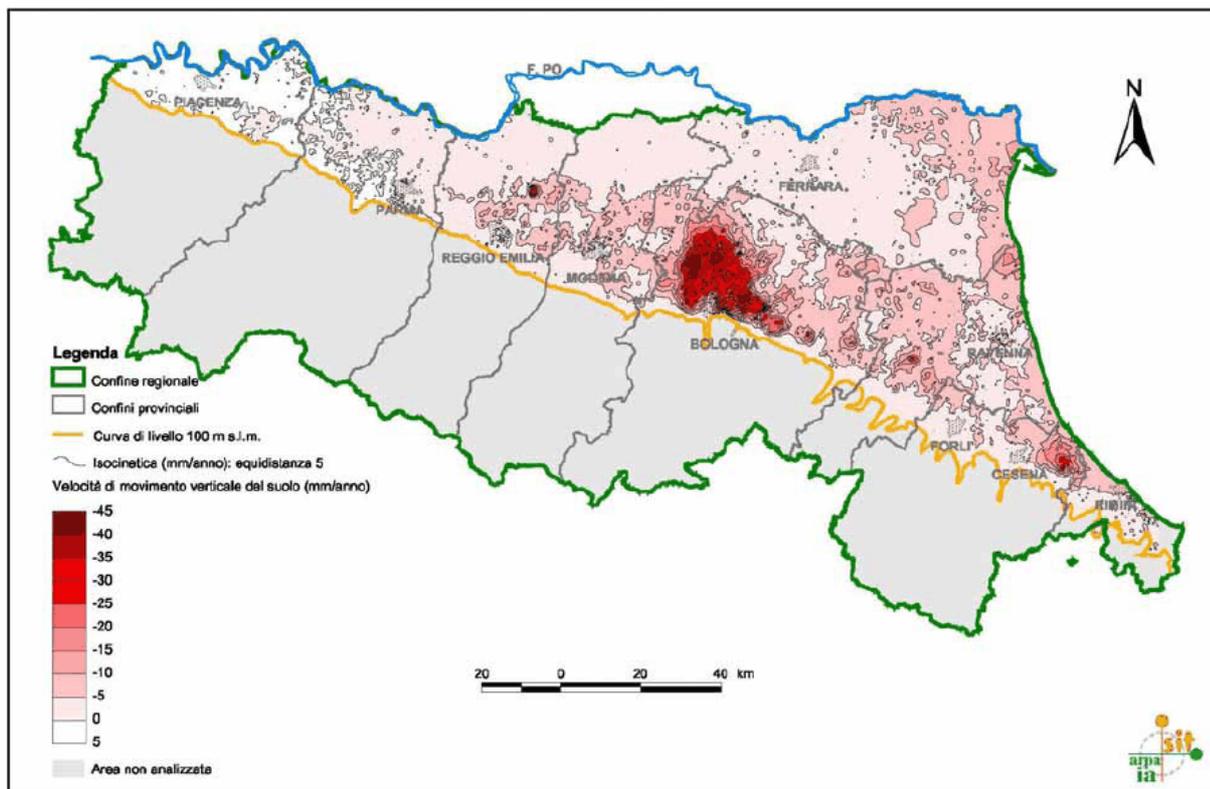


Figura 21 – Mappe delle velocità di movimento verticale del suolo nella Regione Emilia-Romagna nel periodo 1992 – 2000 (sopra) e 2002 – 2006 (sotto) – (ARPA Emilia-Romagna, 2007).

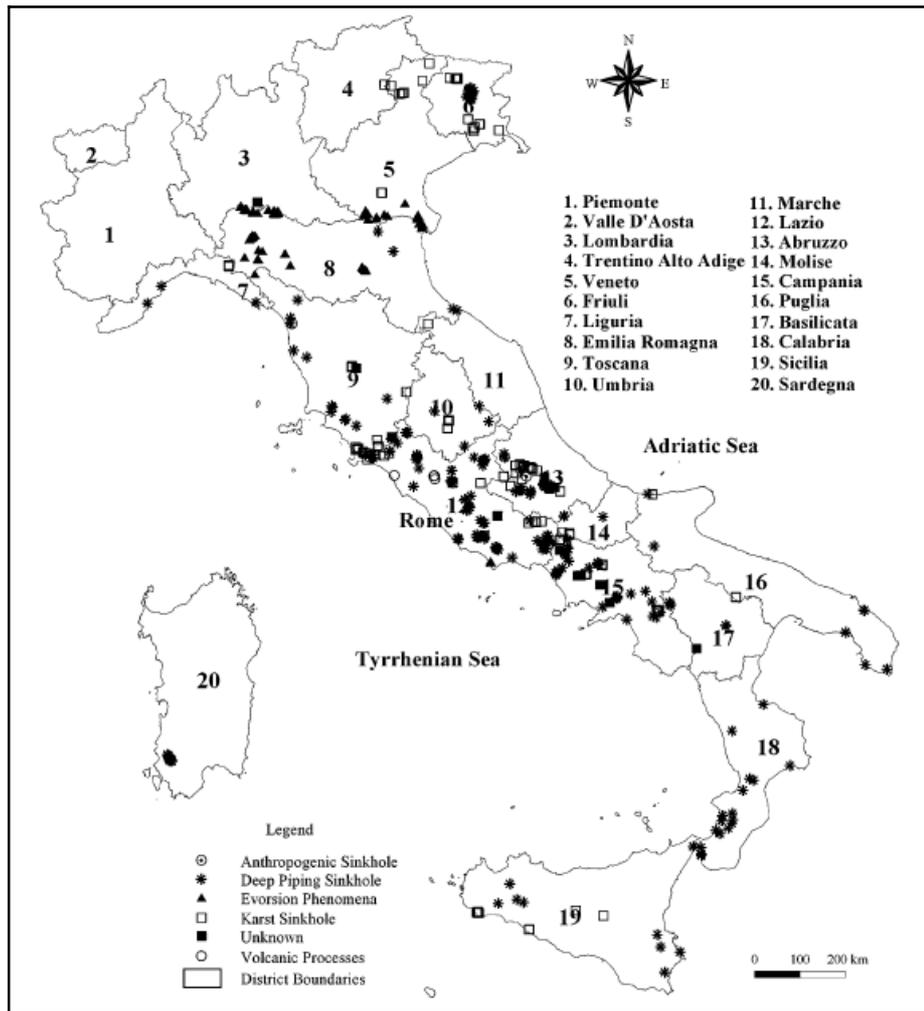
L'interpolazione dei valori di velocità media non tiene ovviamente conto delle diverse cause che determinano i fenomeni di subsidenza, accorpando tutte le aree soggette a movimenti verticali del terreno. La presenza di fenomeni di stagionalità o di incrementi nello spostamento potranno essere individuati solo dall'analisi delle serie temporali.

### 3.4 Sprofondamenti

I fenomeni di sprofondamento catastrofico, dovuti alla presenza nel sottosuolo di cavità di origine antropica o naturale, evolvono con velocità piuttosto elevate rispetto alla capacità di misura della tecnica PSI. Tuttavia, in alcune applicazioni delle tecniche multi-interferogramma per l'individuazione dei movimenti precursori di tali fenomeni sono stati raggiunti dei risultati significativi.

Gli sprofondamenti catastrofici sono diffusi nel territorio nazionale e possono avere fattori d'innescio, genesi e meccanismi di collasso molto diversi (Figura 22). In aree soggette a fenomeni di sprofondamento catastrofico per la presenza di specifiche condizioni geologiche (*sinkhole prone area*), l'analisi dei dati PS può fornire indicazioni riguardo l'individuazione di deformazioni superficiali legate a questa tipologia di dissesto.

Una classificazione generale dei fenomeni di sprofondamento catastrofici vede la suddivisione in tre principali classi di fenomeni, in relazione ai processi genetici che li hanno originati: 1) sprofondamenti dovuti all'attività antropica e legati al semplice collasso di volte originate dall'attività umana (cave, miniere, catacombe e scavi di varia origine), con formazione di cavità con morfologia varia, non necessariamente sub-circolare. 2) fenomeni carsici per acque d'infiltrazione, classificabili in base al tipo di dissoluzione dei materiali, al meccanismo che ha provocato la cavità in superficie (crollo o *collapse*, subsidenza o dissoluzione) ed all'eventuale presenza di una copertura al di sopra delle rocce carbonatiche interessate da carsismo.; 3) fenomeni di *sinkholes* in senso stretto.



**Figura 22 – Ubicazione dei sinkholes in Italia classificati sulla base del meccanismo di collasso (Caramanna et al., 2008).**

I dissesti che si verificano possono essere ulteriormente classificati in base all'origine, naturale o antropica, della cavità che li ha generati (Figura 23). Gli sprofondamenti che si verificano in aree urbanizzate, laddove le deformazioni sono più facilmente individuabili con la tecnica PSI, sono solitamente di origine antropica e non presentano una rilevante estensione in superficie. L'antropizzato coinvolto nelle deformazioni è perciò piuttosto limitato, per cui si hanno pochi PS che possono registrare le deformazioni pre-evento. Numerose città italiane, come Roma e Napoli, sono frequentemente coinvolte da dissesti correlati ad aperture di voragini. Tali fenomeni si intensificano ed ampliano nel tempo con la crescita dell'urbanizzazione ed interessano gran parte del territorio cittadino, seppur concentrandosi in alcune zone.

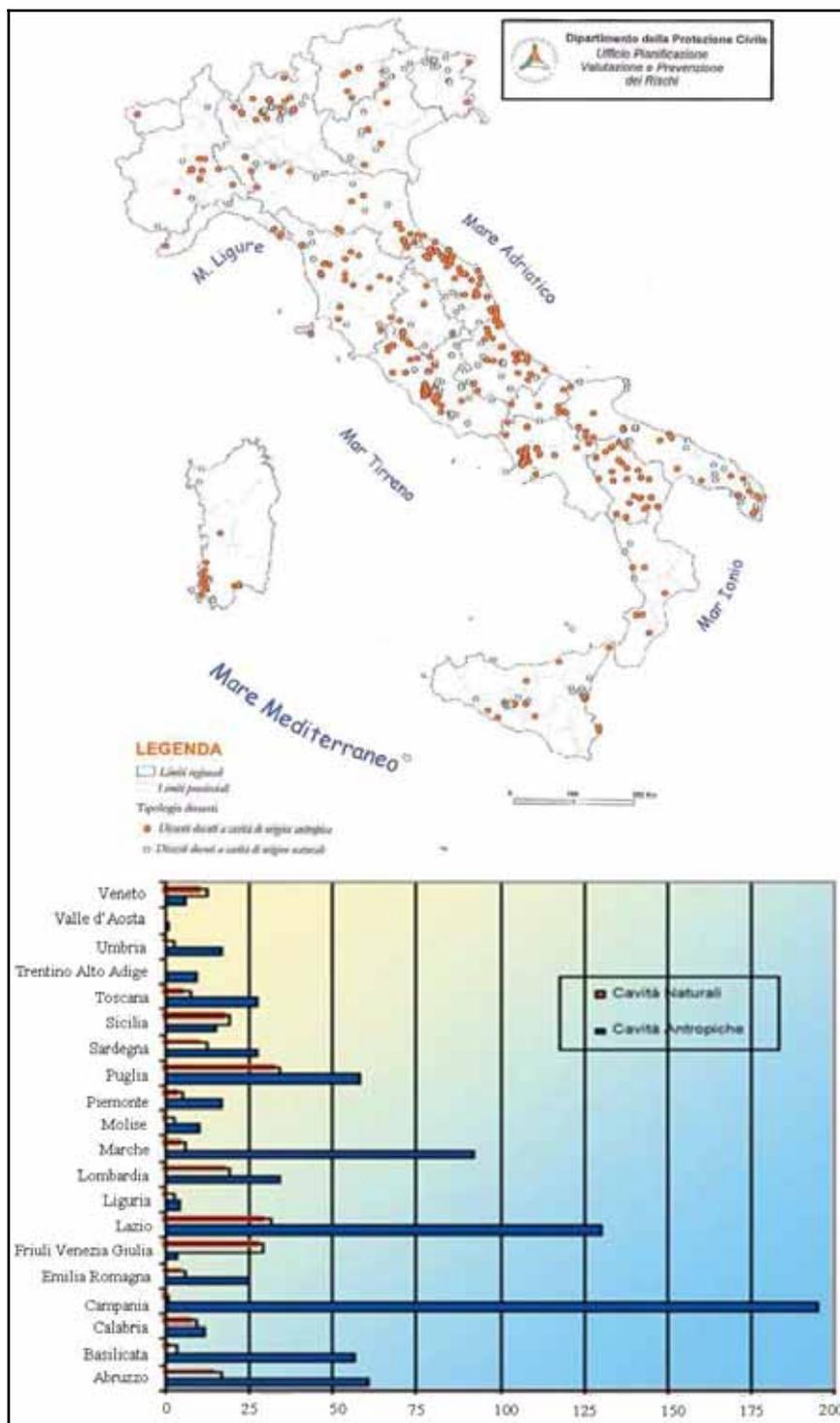


Figura 23 – Localizzazione dei dissesti legati alla presenza di cavità sotterranee, distinte in origine antropica e naturale, e relativa distribuzione regionale (Corazza, 2004).

La causa della frequenza degli sprofondamenti in area urbana è dovuta alla concomitanza di fattori predisponenti, quali la presenza di materiali sciolti che si assestano per semplice imbibizione e possono dar luogo a fenomeni di erosione sotterranea ed eventualmente a veri e propri fenomeni di sifonamento, le variazioni di profondità della falda, la diffusa presenza di cavità nel sottosuolo. Spesso

la causa dell'apertura di voragini sono le infiltrazioni d'acqua per la rottura di tubazioni dell'acquedotto o della rete fognaria che sversano nel terreno ingenti quantità di acqua e che innescano fenomeni di erosione e di trasporto di materiale.

I dissesti dovuti a cedimenti delle cavità sotterranee, spesso causati dalle notevoli sollecitazioni provocate dal traffico urbano e dall'incremento dei carichi dell'urbanizzato, sono certamente ulteriore causa di sprofondamenti catastrofici, anche se secondaria.

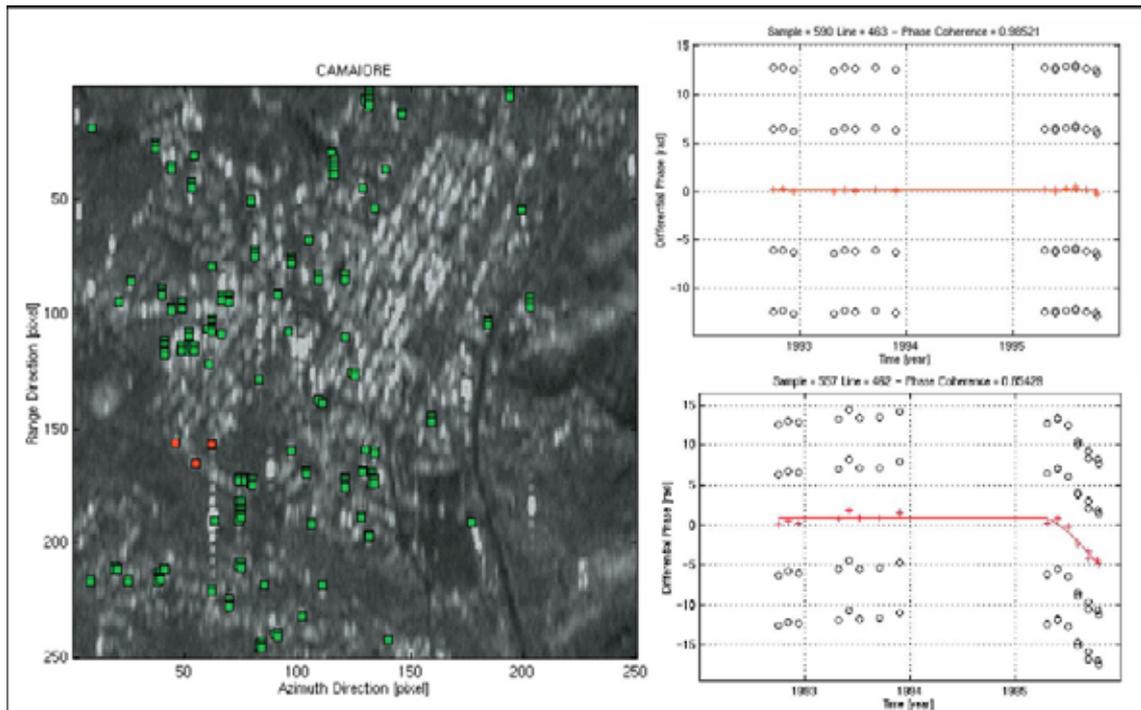
Nelle aree urbanizzate è possibile effettuare un confronto tra i dati PS e le mappa della distribuzione delle cavità sotterranee, al fine di individuare deformazioni riconducibili a fenomeni di sprofondamento catastrofico di origine antropica e definire possibili siti di indagine approfondita per il rischio voragini catastrofiche.

I fenomeni di sprofondamento catastrofico che interessano la superficie del suolo con improvvisi e repentini collassi che avvengono nel corso di un ristretto arco di tempo (6-24 ore), non possono essere monitorati con tecnica PSI date le elevate velocità di innesco e sviluppo. Per *sinkholes* che sono caratterizzati da velocità di evoluzione dei processi di cedimento superficiale monitorabili con dati interferometrici satellitari, come quelli che si sviluppano in litotipi soggetti a solubilizzazione (es. depositi evaporitici), è possibile utilizzare i dati PS per effettuare una mappatura delle aree interessate da deformazioni superficiali legate a fenomeni di sprofondamento.

Un esempio di applicazione di dati radar satellitari per lo studio dei fenomeni di sprofondamento catastrofico è quello del *sinkhole* di Camaiore (LU), verificatosi nell'ottobre del 1995 in località Le Funi, con conseguente crollo di alcuni edifici. L'origine del *sinkhole* è riconducibile a un collasso profondo nel substrato calcareo, i cui effetti si sono risentiti in superficie in quanto la cavità è progredita verso l'alto nella copertura alluvionale (D'Amato Avanzi et al., 2004 - Figura 24). Sull'area sono state elaborate le immagini radar relative all'intervallo 1992 – 1996 (Ferretti et al., 2004), al fine di individuare i moti precursori dello sprofondamento. Dall'analisi delle serie storiche di deformazione si nota come nell'area dove è avvenuto il dissesto, fin dall'inizio del 1995 gli edifici, inizialmente stabili, subiscono un incremento della velocità di deformazione. (Figura 25).



**Figura 24 – Il sinkhole di Camaiore (LU) avvenuto nell'ottobre 2005 che ha causato il crollo di alcuni edifici (D'Amato Avanzi et al., 2004).**



**Figura 25 – Distribuzione dei PS ERS su un’immagine SAR dell’area di Camaiore (LU). In verde i PS stabili le cui serie temporali sono riportate in alto a destra. In rosso i PS localizzati nella zona dove si è verificato il *sinkhole* e nelle cui serie temporali di deformazione (in basso a destra) si individua un incremento della velocità di deformazione a partire dall’inizio del 1995 (Ferretti et al., 2004, modificato).**

In sintesi, allo scopo di individuare possibili relazioni tra le deformazioni superficiali misurate dai dati PS e dissesti dovuti alla presenza di sprofondamenti catastrofici, i dati satellitari possono essere analizzati:

- spazialmente, confrontando le aree individuate come soggette a dissesto dai dati PS con la distribuzione delle “*prone area*”;
- temporalmente, analizzando le serie storiche dei PS in rapporto alle specifiche condizioni geologiche presenti nelle aree individuate.

## 4 UTILIZZO DI DATI RADAR SATELLITARI NEL SISTEMA DI ALLERTA NAZIONALE DI PROTEZIONE CIVILE

La gestione delle emergenze ambientali richiede una efficiente integrazione tra tutte le forze di protezione civile impiegate da una parte nella previsione e conoscenza dei fenomeni, dall'altra nel porre in essere le azioni di contrasto ed emergenza; a questa esigenza ha cercato di rispondere il nuovo sistema di allerta nazionale nato nel quadro della legge n. 183/1989 sulla difesa del suolo, e della legge n. 225/1992 che istituisce il Servizio Nazionale della Protezione Civile. Tale servizio ha il fine di “tutelare la integrità della vita, i beni, gli insediamenti e l'ambiente dai danni o dal pericolo di danni derivanti da calamità naturali, da catastrofi e da altri eventi calamitosi” (art.1). Vengono inoltre introdotti nella legislazione nazionale i concetti di previsione, prevenzione e gestione dell'emergenza (art. 3).

Gli indirizzi operativi per la gestione organizzativa e funzionale del sistema di allerta nazionale e regionale, adottati con **Dir. P.C.M. del 27 febbraio 2004** (Dir. P.C.M., 2004), prevedono che la gestione del sistema di allertamento sia assicurata dal Dipartimento Nazionale di Protezione Civile (DPC), dalle Regioni e dalle Province autonome attraverso la rete dei Centri Funzionali, nonché dalle strutture regionali ed i centri di competenza chiamati a concorrere funzionalmente ed operativamente.

Il Sistema di Allerta della Protezione Civile è attualmente incentrato sul rischio idraulico, in termini di previsione di eventi meteorologici e sul contrasto e mitigazione degli effetti idrogeologici al suolo. Un supporto per l'estensione del Sistema di Allerta al rischio idrogeologico, includendo anche i movimenti di massa localizzati non strettamente connessi ad eventi pluviometrici, può essere fornito dall'utilizzo di dati radar satellitari. Negli ultimi anni l'interferometria SAR satellitare si sta dimostrando un valido strumento nelle attività di protezione civile grazie alla capacità di fornire misure di spostamento del suolo, utili in fase di valutazione dei dissesti idrogeologici.

La validità dimostrata da tale strumento nei diversi casi di studio permette di ipotizzare la realizzazione di un sistema di monitoraggio satellitare che utilizza dati radar e ottici telerilevati, per l'individuazione, la mappatura e l'interpretazione di movimenti di massa localizzati in aree ad elevato rischio idrogeologico, per scopi di protezione civile. L'integrazione dei dati PS all'interno del Sistema di Allerta necessita di stabilire le piene potenzialità ed i limiti dell'uso dei dati interferometrici e ciò può avvenire solo grazie a costanti e mirate applicazioni in aree test e a diverse scale di analisi. E' difatti essenziale che le attività di pianificazione di Protezione Civile per cui è stata ampiamente dimostrata l'utilità dei dati PS (come nell'aggiornamento di carte inventario dei dissesti redatte all'interno dei Piani stralcio di bacino per l'assetto idrogeologico – PAI – messi a punto dalle Autorità di bacino) siano costantemente in funzione altrimenti il patrimonio di informazione ottenuto negli anni perderebbe in poco tempo la propria efficacia.

Le diverse attività di pianificazione di protezione civile devono essere sempre calibrate alla scala spaziale e temporale appropriata, in funzione dello scopo delle analisi che si vanno ad effettuare. Proprio a tal fine, si ricorda che indagini orientate alla gestione del rischio alla sola scala di bacino e quindi su area vasta, non consentono il livello di dettaglio necessario alla pianificazione di protezione civile che, come è noto, si esplica spesso su scenari fortemente concentrati nel tempo e nello spazio.

Di seguito viene descritto il Sistema di Allerta Nazionale e vengono dettagliate le specifiche attività di interpretazione dei dati interferometrici satellitari per la valutazione dei dissesti ai fini di protezione civile, in funzione della scala temporale definita all'interno della direttiva.

## 4.1 Il Sistema di Allerta Nazionale

La Dir. P.C.M., 2004 (e successive modifiche introdotte dalla Dir. P.C.M. del 25 febbraio 2005) fornisce gli indirizzi operativi per la gestione organizzativa e funzionale del Sistema di Allerta Nazionale per il rischio idrogeologico ed idraulico ai fini di protezione civile.

La Direttiva sottolinea la necessità di un efficace e proficuo coordinamento tra le attività di protezione civile nel tempo reale e quelle di pianificazione e prevenzione nel tempo differito. A tal proposito vengono definiti i concetti di:

- **tempo reale:** quel periodo misurabile in mesi, in cui deve svilupparsi e determinarsi l'efficacia dell'azione urgente e generalmente non permanente di protezione civile. Tale periodo comprende:
  - la previsione del manifestarsi di un evento, ancorché complesso, sia esso di origine naturale e/o antropica;
  - il contrasto ed il contenimento dei conseguenti effetti soprattutto sulla popolazione ed i suoi beni;
  - la gestione, quando del caso, dello stato di emergenza;
  - il ripristino delle condizioni di vita preesistenti all'evento stesso, perseguendo anche, ove possibile e attraverso opportuni interventi, la riduzione della pericolosità;
- **tempo differito:** quel periodo misurabile in anni, decenni e secoli, in cui le azioni di studio e previsione, nonché di pianificazione, programmazione e realizzazione di interventi, sono volte a garantire condizioni permanenti ed omogenee sia di salvaguardia della vita umana e dei beni, che di tutela ed uso sostenibile delle risorse ambientali.

Questa suddivisione permette di inquadrare in una scala temporale definita le diverse attività di interpretazione dei dati radar satellitari, suddividendole in funzione della finalità dell'analisi all'interno delle diverse operazioni di protezione civile.

La direttiva definisce inoltre le fasi principali di gestione del rischio idrogeologico, che corrispondono a quelle convenzionalmente utilizzate a livello internazionale:

1. fase di previsione: costituita dalla valutazione, sostenuta da una adeguata modellistica numerica, della situazione meteorologica, nivologica, idrologica, idraulica e geomorfologica attesa, nonché degli effetti che tale situazione può determinare sull'integrità della vita, dei beni, degli insediamenti e dell'ambiente. Le attività di previsione si attivano in seguito ad una fase conoscitiva del territorio e sono volte all'analisi e alla determinazione delle cause dei fenomeni calamitosi basandosi sullo studio del territorio, sui parametri che li controllano e sul loro modo di evolversi nel tempo;
2. fase di monitoraggio e sorveglianza: articolata in: i) osservazione qualitativa e quantitativa, diretta e strumentale, dell'evento meteo-idrologico ed idrogeologico in atto; ii) previsione a breve dei relativi effetti e/o modelli inizializzati da misure raccolte in tempo reale. Questa fase include le attività di sorveglianza di parametri e grandezze, identificati in fase conoscitiva come precursori ed indicatori del manifestarsi di prefigurati scenari d'evento, o dei conseguenti effetti laddove non vengano realizzate azioni di contenimento o contrasto. Ovviamente nella direttiva questa fase si riferisce esclusivamente ai dati meteo, ma con il recente utilizzo e conoscenza delle potenzialità dei dati radar satellitari, è possibile definire un utilizzo di tali dati all'interno della fase di monitoraggio e sorveglianza, in funzione della scala temporale di riferimento.

Queste due fasi prevedono attività svolte sia nel tempo differito che nel tempo reale ed in particolare queste ultime sono svolte dalla rete dei Centri Funzionali, che ha il compito di far confluire, concentrare ed integrare tra loro i dati qualitativi e quantitativi rilevati dalle reti meteo-idro-

pluviometriche, dalla rete radar-meteorologica nazionale, dalle diverse piattaforme satellitari disponibili, i dati territoriali, geologici e geomorfologici e le modellazioni meteorologiche, idrologiche, idrogeologiche ed idrauliche.

Dalle fasi di previsione e di monitoraggio e sorveglianza si attivano poi altre 2 fasi:

3. fase di prevenzione: si attua attraverso sia azioni, anche di contrasto dell'evento, incluse nei Programmi regionali di previsione e prevenzione del rischio idrogeologico, che interventi urgenti anche di natura tecnica, così come previsto dall'art. 108 del decreto legislativo n. 112/1998. Questa fase è diretta ad evitare o ridurre al minimo le possibilità che si verifichino danni conseguenti agli effetti calamitosi;
4. fasi di gestione dell'emergenza: attuazione dei Piani d'emergenza regionali, provinciali e comunali, redatti sulla base di indirizzi regionali, relativi anche all'organizzazione funzionale degli stessi interventi urgenti. Le attività relative a questa fase sono quelle di sorveglianza del manifestarsi di eventi potenzialmente distruttivi, la preparazione dell'emergenza e la gestione vera e propria della crisi fino al suo superamento, con la fase di post-crisi; sono quindi incluse le azioni di monitoraggio necessarie per la determinazione dei livelli di criticità legati al possibile verificarsi di scenari d'evento, previsti o meno, potenzialmente distruttivi. E' importante in questa fase il continuo aggiornamento degli scenari previsti, e ciò avviene con la raccolta, la trasmissione e la concentrazione nelle sale operative delle autorità di protezione civile di tutti i dati necessari per la sorveglianza dell'evento, nonché tramite le notizie non strumentali reperite in loco.

Nella direttiva, le diverse attività da svolgere all'interno delle fasi sopra descritte sono definite temporalmente in base all'utilizzo dei dati meteo. Al fine di delineare il supporto dei dati interferometrici satellitari all'interno del Sistema di Allerta Nazionale, è fondamentale suddividere le diverse attività di analisi dei dati PS per la valutazione dei dissesti idrogeologici in funzione della scala temporale.

In Figura 26 vengono schematizzate le attività di analisi dei dati radar satellitari per un loro utilizzo operativo all'interno del Sistema di Allerta Nazionale di Protezione Civile relative alla gestione del rischio idrogeologico. Dallo schema si evidenzia come l'interferometria radar da satellite risulta utilizzabile sia nel campo del tempo differito, per la misura degli spostamenti nel tempo pregresso per l'individuazione e caratterizzazione dei dissesti, sia nel tempo reale, per la sorveglianza su area vasta ed a scala locale dei movimenti del terreno.



**Figura 26 – Schema relativo all'utilizzo operativo dei dati radar satellitari all'interno del Sistema di Allerta Nazionale nelle principali attività di Protezione Civile connesse con la gestione dei rischi idrogeologici.**

In particolare le attività di analisi dei dati PS nel tempo differito sono finalizzate alla conoscenza, previsione e prevenzione delle aree soggette a dissesti idrogeologici e possono essere suddivise in:

- Individuazione e Mappatura (*Detection and Mapping*): identificazione delle aree soggette a deformazione del suolo e conseguente mappatura della porzione di territorio soggetta a dissesti. Questa attività si realizza con la stesura della mappa inventario dei dissesti che descrive lo stato della natura riportando la distribuzione spaziale dei dissesti passati ed ancora identificabili al momento della realizzazione dell'inventario stesso.
- Caratterizzazione (*Characterization*): interpretazione di dettaglio delle aree soggette a dissesti precedentemente individuate per la valutazione spaziale (*Spatial Characterization*) e temporale (*Back-monitoring*) dei processi e dei meccanismi evolutivi, per consentire una miglior definizione di programmi di mitigazione del rischio. Per effettuare la caratterizzazione del dissesto sono necessari dati di superficie, di sottosuolo e di monitoraggio *in situ* che variano a seconda della tipologia del fenomeno.

Le informazioni fornite dai dati PS possono essere inserite inoltre all'interno di modelli predittivi per una completa comprensione dei fenomeni di interesse e una loro rappresentazione quantitativa al fine di prevedere l'evoluzione dei fenomeni stessi e comprendere i meccanismi di genesi dei geoprocessi in atto. Queste attività comprendono tutti gli aspetti modellistici in senso lato, non solo fisico-matematico, ma anche logici, legati ai fenomeni, come ad esempio l'individuazione di parametri significativi che, al verificarsi di determinate condizioni, possono condurre verso la modifica della situazione di stabilità.

Le attività di analisi dei dati interferometrici satellitari che possono essere inserite nel Sistema di Allerta Nazionale in tempo reale sono volte al controllo aggiornato e costante del territorio, al fine di individuare quelle che sono le aree del territorio nazionale più sensibili e predisposte ai dissesti idrogeologici. Dal punto di vista operativo, queste attività si articolano in:

- Monitoraggio (*Monitoring*): misura nel tempo di particolari grandezze e dei relativi valori, identificati come precursori ed indicatori del manifestarsi di prefigurati scenari d'evento, nonché dei conseguenti effetti qualora non venga realizzata nessuna azione di contenimento o contrasto. In particolare le azioni di monitoraggio sono necessarie per la determinazione dei livelli di criticità legati al possibile verificarsi di scenari di evento. A tal fine, la possibilità attraverso le tecniche interferometriche satellitari di monitorare le deformazioni del suolo su area vasta consente di poter definire le potenzialità ed i possibili criteri per un loro utilizzo di sorveglianza operativo a scala nazionale.
- Early-Warning: individuazione e segnalazione delle aree dove vengono raggiunte o superate le soglie degli indicatori tenuti sotto controllo che, nel caso specifico di un sistema di monitoraggio basato su dati radar satellitari, consiste nella rapida variazione del *trend* di deformazione fornito dai dati di spostamento dei PS.

Di seguito vengono dettagliate le attività di analisi dei dati satellitari in funzione della diversa scala temporale (tempo reale e tempo differito) in cui vanno ad inserirsi. Vengono descritte prima le attività che si svolgono nel tempo differito e poi quelle nel tempo reale in quanto queste ultime si basano su una metodologia di analisi messa a punto nel tempo differito e sintetizzata per il tempo reale, al fine di rendere più rapidi i tempi di analisi.

## 4.2 Tempo Differito

Le attività svolte nel tempo differito sono mirate a consentire l'identificazione e la valutazione dei movimenti di massa presenti nell'area, attraverso lo studio e la determinazione delle cause dei fenomeni calamitosi, all'identificazione dei rischi ed all'individuazione delle zone del territorio soggette ai rischi stessi. In modo operativo si procede con le attività di individuazione e mappatura, di caratterizzazione spaziale e temporale dei dissesti.

Le attività di analisi dei dati PS si collocano nelle fasi di previsione e prevenzione del rischio idrogeologico. I risultati ottenuti da tale analisi costituiscono uno strumento di supporto per la caratterizzazione dei dissesti individuati.

### 4.2.1 Individuazione e Mappatura (*Detection and Monitoring*)

L'individuazione e la mappatura di aree soggette a dissesti sono il fondamento per tutte le attività di pianificazione e prevenzione del rischio idrogeologico. Le tecniche tradizionalmente utilizzate per l'individuazione e la mappatura possono beneficiare dei dati interferometrici satellitari grazie alla possibilità di rapide acquisizioni su aree vaste ed al continuo aggiornamento delle informazioni ottenibili. Tali caratteristiche inducono una forte riduzione dell'impiego di rilievi di campagna e l'installazione di sistemi *in situ*, riducendo di conseguenza i costi.

L'utilizzo delle tecniche InSAR multi-interferogramma permette di lavorare a diverse scale spaziali. La tecnica può essere infatti un valido strumento per analisi sia su area vasta, grazie all'elevata copertura areale delle immagini, ma allo stesso tempo consente di effettuare analisi a scala locale, in virtù dell'elevata accuratezza delle misure che si possono ottenere.

La necessità di effettuare un controllo a vasta scala sulla presenza di movimenti di massa, come nella redazione e nell'aggiornamento di una carta inventario del dissesto, può trarre beneficio dall'utilizzo dei dati satellitari provenienti dall'analisi interferometrica. Infatti, la possibilità di coprire grandi estensioni spaziali con una singola immagine radar monitorando con una frequenza di acquisizione mensile le deformazioni del terreno, permette di rilevare la presenza di dissesti a cinematica lenta (fino a circa 6 cm/anno) o movimenti precursori relativi a fenomeni ad evoluzione più rapida.

Lo scopo finale di questa attività è la produzione di una mappa inventario dei dissesti idrogeologici che, riportando lo stato della natura con la distribuzione spaziale dei fenomeni passati ed ancora individuabili sul territorio al momento della realizzazione dell'inventario stesso, costituisce la base per qualsiasi attività di mitigazione del rischio. I dissesti devono essere suddivisi sulla base della tipologia ed il contributo fornito dai dati PS nel caso dei dissesti di versante, può dare indicazioni anche sullo stato di attività e sull'intensità dei fenomeni franosi mappati. Alla stesura dell'inventario seguirà poi l'integrazione con dati di superficie, di sottosuolo e di monitoraggio e soprattutto una validazione con un controllo di campagna, al fine di caratterizzare spazialmente e temporalmente i dissesti individuati.

### 4.2.2 Caratterizzazione (*Characterization*)

La valutazione di dettaglio delle aree soggette a dissesti precedentemente individuate deve essere mirata alla caratterizzazione spaziale e temporale dei processi e dei meccanismi evolutivi. Infatti, solamente avendo una conoscenza approfondita del fenomeno è possibile la stesura quanto più realistica di scenari di evento per una miglior definizione di programmi di mitigazione del rischio.

Per questa attività sono necessari dati di superficie, di sottosuolo e di monitoraggio *in situ* che variano a seconda della tipologia del fenomeno, ma che devono essere il più dettagliati possibile per consentire

una completa caratterizzazione delle cause e delle variazioni nel tempo e nello spazio delle deformazioni misurate.

#### 4.2.2.1 Caratterizzazione spaziale (*Spatial Characterization*)

L'analisi dei dati interferometrici satellitari permette di valutare l'estensione e la geometria del fenomeno analizzato, attraverso l'analisi e la combinazione delle componenti di deformazione superficiale osservate lungo le diverse geometrie ed il confronto spaziale delle misure satellitari con i dati rilevati *in situ*. I dati di spostamento possono essere inseriti all'interno di modelli predittivi che, attraverso il miglioramento delle conoscenze sul dissesto in esame e la comprensione del cinematiso che lo contraddistingue, sono finalizzati alla previsione dell'evoluzione spaziale del fenomeno di interesse e a ricostruire la geometria dei fenomeni attraverso la combinazione delle modalità di acquisizione ascendente e discendente.

#### 4.2.2.2 Caratterizzazione temporale (*Back-monitoring*)

La caratterizzazione temporale dei dissesti individuati avviene attraverso la consultazione delle serie storiche o temporali dei PS. Le serie storiche riportano, per ogni PS, gli spostamenti (in mm) del bersaglio misurati lungo la LOS per ogni immagine elaborata. I valori di spostamento sono in funzione del tempo trascorso tra la prima acquisizione della serie, che viene utilizzata come riferimento, e le successive immagini acquisite.

L'analisi delle serie temporali di spostamento dei PS permette di valutare le variazioni nel tempo delle deformazioni ottenendo informazioni non direttamente intuibili dalla visualizzazione delle velocità medie. E' infatti possibile individuare all'interno dei valori di spostamento dei fenomeni di stagionalità del moto, andamenti di tipo non lineare o incrementi nelle velocità di spostamento (accelerazioni).

Dall'analisi di dettaglio delle serie temporali è inoltre possibile estrarre valori di velocità di spostamento che permettono l'integrazione delle misure del campo deformativo superficiale all'interno di modelli per la previsione dell'evoluzione dei fenomeni in esame.

Un'analisi storica delle deformazioni pregresse avvenute sull'area in esame precedentemente ad un evento, può essere effettuata grazie alla disponibilità degli archivi di immagini SAR satellitari acquisite sul territorio nazionale. A partire dal 1992, è possibile infatti effettuare un monitoraggio a ritroso (*back-monitoring*) del fenomeno di interesse, caratterizzandolo sia dal punto di vista temporale che spaziale.

Le tecniche interferometriche consentono di studiare l'evoluzione dei dissesti e di valutare la loro risposta nei confronti dei fattori di innesco.

Il *back monitoring*, mediante l'utilizzo di informazioni di deformazione ad alta accuratezza, permette di analizzare l'evoluzione nel tempo dei fenomeni, individuare eventuali *trend* deformativi rilevanti, riconoscere aree instabili, stimare lo stato di attività dei dissesti, riconoscere eventuali movimenti precursori e valutare la risposta del fenomeno alle variazioni dei fattori predisponenti.

Un ulteriore obiettivo della caratterizzazione temporale consiste nella determinazione delle eventuali correlazioni temporali tra l'occorrenza dei fenomeni e nello sviluppo dei fattori di innesco (quali terremoti, precipitazioni particolarmente intense, estrazione di fluidi dal sottosuolo, interventi antropici ecc.), ottenuta tramite il confronto e l'integrazione dei dati telerilevati con i dati *in situ*.

Le tecniche multi-interferogramma offrono la possibilità di studiare fenomeni le cui velocità sono estremamente ridotte (mm/anno) e per i quali le tecniche convenzionali richiederebbero anni prima di poter fornire misure significative.

### 4.3 Tempo Reale

Le attività di analisi dei dati PS che si svolgono nel tempo reale riguardano essenzialmente le fasi di monitoraggio e sorveglianza e di gestione dell'emergenza ed in pratica sono volte alla sorveglianza di eventi potenzialmente distruttivi, alla preparazione di un'emergenza e alla previsione a breve termine del verificarsi di una crisi e alla successiva gestione fino al suo superamento.

I dati interferometrici satellitari, al pari di tutta la strumentazione in grado di fornire misure di deformazione del suolo, possono essere utilizzati per valutare in tempi brevi l'evoluzione spaziale e temporale dei movimenti di massa localizzati, fornendo un valido supporto nell'aggiornamento di scenari di evento e nella stesura di piani di emergenza. Dalla rapida interpretazione dei dati radar satellitari aggiornati all'ultima immagine acquisita dal sensore, è possibile monitorare le deformazioni pregresse e produrre una mappatura rapida delle aree soggette a dissesti (*rapid mapping*). L'analisi dei dati PS nel tempo reale costituisce un contributo per la valutazione rapida dei dissesti, volta ai fini di Protezione Civile.

#### 4.3.1.1 Monitoraggio (*Monitoring*)

Le attività che riguardano la sorveglianza delle deformazioni superficiali attraverso l'utilizzo dei dati radar satellitari permettono di connettere le analisi effettuate nel tempo differito, attraverso lo storico delle misure delle deformazioni, e quelle effettuate nel tempo reale, in quanto è possibile ottenere dati di spostamento dei bersagli radar aggiornati all'ultima immagine acquisita dal sensore.

Le azioni di monitoraggio con dati satellitari nel tempo reale possono essere effettuate su area vasta, grazie alla copertura sinottica dei sensori che permettono di osservare con una singola ripresa aree di 100x100 km<sup>2</sup>, ma allo stesso tempo ottenendo di spostamento accurate relative anche alla scala di singole strutture o edifici, fondamentali ai fini di protezione civile in quanto gli eventi da monitorare nel tempo reale sono concentrati nello spazio e richiedono quindi analisi a scala locale.

In fase di gestione di un'emergenza, l'utilizzo dei dati PS consente di ottenere informazioni sulle condizioni di stabilità prima del verificarsi di un evento catastrofico, potendo verificare la presenza o l'assenza di spostamenti pregressi (moti precursori) e le possibilità di eventuali correlazioni del fenomeno con fattori innescanti, grazie alla possibilità di ottenere lo storico delle deformazioni che ormai coprono più di 15 anni partendo dai dati ERS1/2. L'analisi dei dati PS nel tempo reale consente la mappatura rapida delle aree interessate da deformazioni superficiali e, nel caso l'analisi venga effettuata in seguito al verificarsi di un evento, di individuare le aree instabili in cui si verificano movimenti millimetrici non riconoscibili ad occhio nudo, ma che sono da considerarsi come aree a rischio per il verificarsi di ulteriori collassi.

L'utilizzo dell'interferometria SAR da satellite come sistema di monitoraggio operativo in continuo per la sorveglianza su area vasta dei movimenti del terreno è tutt'ora in fase di studio. E' infatti fortemente condizionato da diversi fattori, sia legati alle caratteristiche dei dati satellitari stessi, partendo dall'acquisizione a frequenza attualmente mensile delle immagini SAR sino ai tempi di *processing*, ma anche ai criteri di analisi del dato PS per l'individuazione delle aree soggette a dissesti.

#### 4.3.1.2 *Early Warning*

Dal monitoraggio satellitare delle deformazioni superficiali è possibile individuare, per alcune tipologie di dissesto, le aree in cui si verificano degli incrementi anomali nelle misure di spostamento, che possono essere associati a moti precursori di un evento che può evolvere o meno in fenomeno catastrofico, ma che comunque necessita di essere monitorato a scala locale.

Il monitoraggio ai fini di protezione civile è funzionale alla determinazione di livelli di criticità legati al possibile verificarsi di scenari di eventi potenzialmente distruttivi. Le situazioni di criticità sono articolate su più livelli, un livello di base relativo alla situazione ordinaria, in cui le criticità sono ritenute comunemente accettabili per la popolazione, ed altri livelli, da moderata ad elevata, atti a predisporre le adeguate azioni di contenimento dell'evento. Una volta infatti raggiunte o superate le soglie stabilite degli indicatori tenuti sotto controllo, identificate nel tempo differito, devono essere attivati i sistemi di contrasto preventivo degli eventi e soprattutto dei loro effetti nella fase precedente al manifestarsi dell'evento atteso, in preparazione all'emergenza. L'allertamento rapido consente quindi attivare quelle operazioni volte a ridurre gli effetti di eventi calamitosi, soprattutto in aree urbanizzate dove magari non evita di prevenire perdite materiali, ma almeno consente di ridurre l'impatto dell'evento in termini di perdita di vite umane.

Un sistema satellitare di *early-warning* operativo su area vasta è al momento in fase di definizione in quanto devono essere affrontate diverse problematiche, oltre a quelle previste per il sistema di monitoraggio, inerenti la definizione dei criteri di segnalazione delle aree in cui si verificano delle accelerazioni anomale nella velocità di spostamento dei bersagli radar.

Nelle sezioni successive verranno descritte le applicazioni delle tecniche InSAR da piattaforma satellitare a supporto delle diverse attività descritte in Figura 26, inserite nella scala temporale della Protezione Civile in cui tali attività si espletano, mediante l'analisi dei casi di studio effettuata all'interno del presente lavoro di ricerca.

## 5 UTILIZZO DATI PS NEL TEMPO DIFFERITO

I dati PS si stanno rivelando un valido strumento da integrare alle tecniche tradizionalmente usate per la mappatura ed il monitoraggio di movimenti di massa localizzati, grazie alla possibilità di rapide acquisizioni su aree vaste ed al continuo aggiornamento delle informazioni ottenibili. Tali caratteristiche inducono una forte riduzione dell'impiego di strumentazione di monitoraggio *in situ*, riducendo di conseguenza i tempi ed i costi necessari per effettuare un monitoraggio a parità di area investigata, proprietà rilevanti in ambito di attività con fini di protezione civile.

L'utilizzo di tecniche InSAR da piattaforma satellitare permette di lavorare a diverse scale spaziali e temporali. Con riferimento alla scala spaziale, la tecnica consente di individuare e monitorare tipologie di geoprocessi molto diverse, soprattutto per quello che riguarda l'estensione areale. Effettuare analisi su tutto il territorio nazionale consente di identificare dissesti quali subsidenze legate ad estrazione di fluidi dal sottosuolo o a consolidazione di sedimenti che interessano intere pianure alluvionali, deformazioni legate ad attività vulcanica, ecc. Analisi condotte su area vasta consentono di effettuare indagini a scala di bacino o di area d'allerta come l'aggiornamento di inventari di fenomeni franosi. Analisi condotte a scala locale permettono di mappare con elevato dettaglio le aree interessate da dissesti e di caratterizzare spazialmente e temporalmente i diversi dissesti individuati.

Con riferimento alla scala temporale, la disponibilità di oltre 15 anni di acquisizioni di immagini satellitari consente di poter effettuare una valutazione dei dissesti che tenga conto delle evoluzioni spaziali e temporali su un periodo di tempo che risulta attendibile per scopi di pianificazione territoriale, di individuazione delle aree a rischio, della stesura dei relativi scenari e della redazione di piani di protezione civile.

Nei casi di studio affrontati durante il progetto di dottorato, sono state effettuate analisi a diverse scale spaziali, proprio per evidenziare i limiti e le potenzialità di valutare diverse tipologie di movimenti di massa localizzati tramite l'interpretazione di dati radar satellitari.

L'interpretazione dei dati PS condotta nell'ambito di diversi progetti di ricerca su diverse scale spaziali ha permesso di valutare l'applicabilità della tecnica alle diverse tipologie di dissesti e per diversi obiettivi. Ciò ha consentito di sviluppare sia una metodologia per l'analisi dei dati radar satellitari nel tempo differito, sia di iniziare a valutare l'applicabilità dell'utilizzo di dati PS in un sistema di monitoraggio satellitare.

In Figura 27 viene riportata la mappa con l'ubicazione dei casi di studio analizzati. I dati PS sono stati analizzati a:

- **Scala nazionale:** il Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale (PST-A) nell'ambito del quale sono stati acquisiti dati PS dei satelliti ERS1/2 e ENVISAT sull'intero territorio nazionale con lo scopo di fornire uno strumento operativo e conforme per la pianificazione ambientale;
- **Area vasta:** le aree test di Roma e Napoli sono state selezionate per il progetto SAR.net promosso dal DPC per la realizzazione di un sistema nazionale di sorveglianza basato sull'utilizzo di dati telerilevati da satellite ed elaborati con tecniche interferometriche avanzate, per l'individuazione, la mappatura, il monitoraggio e l'analisi degli scenari di rischio connessi a movimenti di massa localizzati;
- **Scala locale:** il settore costiero tra Scilla e Palmi (RC) è stato scelto nell'ambito di un progetto PRIN per l'integrazione di dati telerilevati e tecniche di modellazione dinamica per lo studio dei fenomeni di instabilità costieri.



**Figura 27 – Ubicazione delle aree test per la valutazione nel tempo differito di movimenti di massa localizzati con dati PS (<http://maps.google.it/maps>). I dati PS sono stati analizzati per l'individuazione e la mappatura dei dissesti a scala nazionale, su area vasta (Roma e Napoli) e a scala locale (Scilla – RC). A scala locale sono stati caratterizzati i dissesti individuato nelle aree test di Roma e Napoli.**

Di seguito viene descritta la metodologia per l'interpretazione dei dati radar satellitari e successivamente vengono presentati i casi di studio sui quali tale metodologia è stata applicata e perfezionata.

Nei paragrafi successivi vengono poi caratterizzati spazialmente e temporalmente alcuni dei dissesti individuati, ovviamente a scala locale, in quanto la caratterizzazione presuppone una valutazione in dettaglio del fenomeno individuato.

## 5.1 Metodologia per l'interpretazione dei dati PS

Viene qui proposta una metodologia per l'interpretazione di dati radar satellitari volta all'individuazione, mappatura e caratterizzazione di dissesti idrogeologici. Tale metodologia è stata sviluppata e approfondita nell'ambito di numerosi progetti e aree test, al fine di avere un'ampia

casistica di tipologie di dissesti idrogeologici e della letteratura inerente applicazioni di tecniche interferometriche satellitari allo studio di movimenti di massa localizzati.

In Figura 28 è riportato il diagramma di flusso che illustra la metodologia proposta con i dati di ingresso, le principali attività ed i risultati attesi. Tale metodologia ha lo scopo di fornire elementi di supporto alla creazione e all'aggiornamento delle mappe inventario dei dissesti idrogeologici monitorabili con tecnica PS (es. frane, subsidenze, sprofondamenti, sollevamenti).

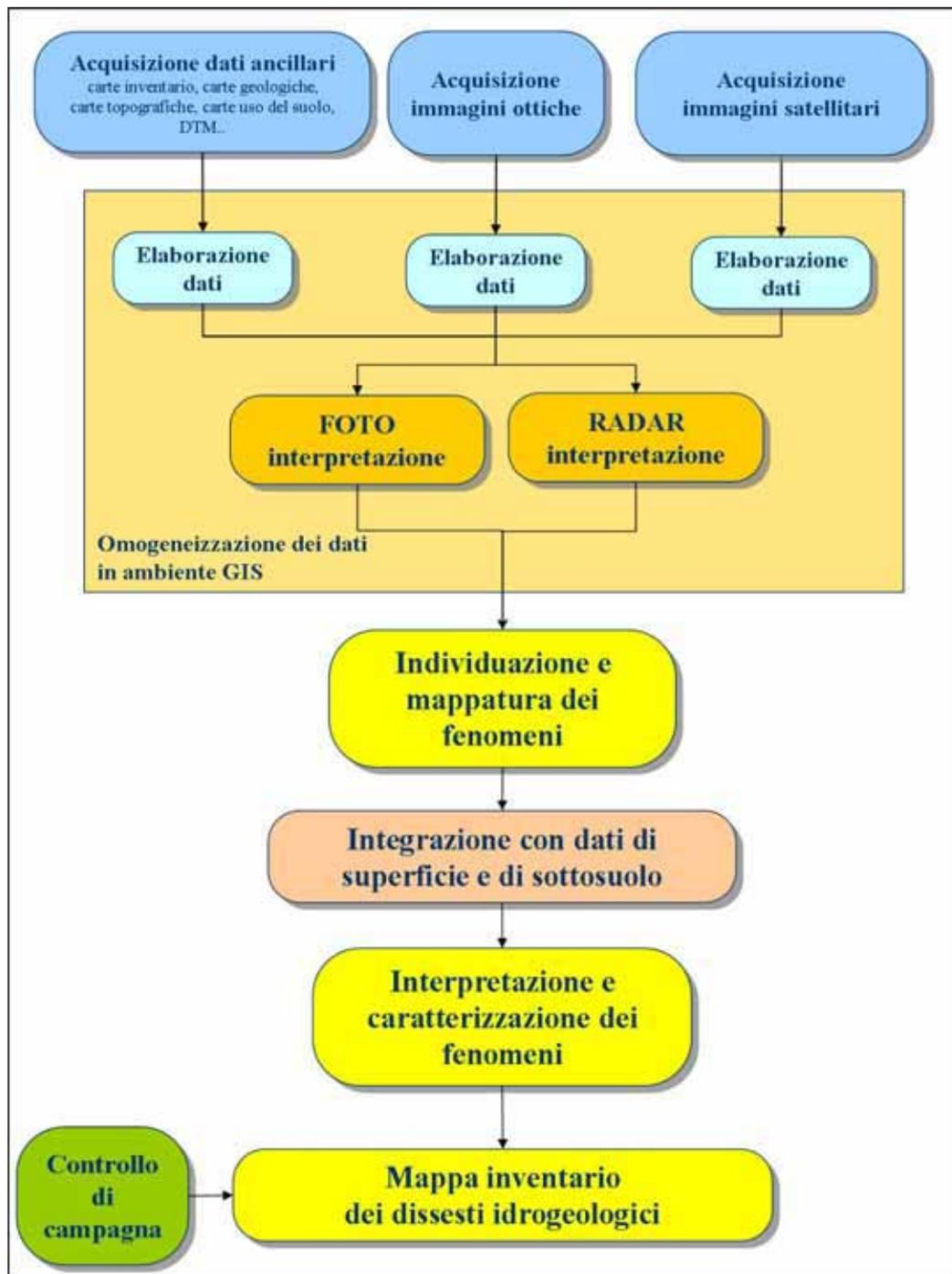


Figura 28 – Metodologia per l'interpretazione dei dati PS allo scopo di fornire elementi di supporto alla creazione e all'aggiornamento delle mappe inventario dei dissesti idrogeologici.

Nel dettaglio la metodologia si articola come segue:

1. Acquisizione dati:

- Acquisizione dati ancillari

Questa attività consiste nella raccolta di tutti i dati ancillari disponibili e quanto più omogenei sull'area oggetto d'indagine, quali dati geologici, topografici, di copertura del suolo, modelli digitali del terreno, carte inventario dei fenomeni franosi ecc. Tali dati, e le cartografie derivate (ad esempio carte della pendenza e della curvatura dei versanti), costituiscono base di partenza indispensabile per identificare possibili morfologie e caratteristiche del terreno connesse ai movimenti deformativi ed estendere così spazialmente l'informazione puntuale fornita dai dati satellitari.

- Acquisizione immagini ottiche

Questa attività consiste nell'acquisizione di foto aeree ed immagini ottiche satellitari disponibili sull'area di interesse.

- Acquisizione immagini satellitari

Questa attività consiste nell'acquisizione dei immagini satellitari disponibili nell'area in esame.

2. Elaborazione dati:-

- Elaborazione dati ancillari

In questa attività vengono elaborati alcuni dei dati ancillari per generare carte derivate utili in fase interpretativa.

Da un DTM, ad esempio, è possibile produrre la mappa delle pendenze, dell'esposizione, la curvatura dei versanti, l'area drenata ed immagini di falso rilievo, utili nelle fasi interpretative dei dissesti per risalire alla direzione di movimento e riconoscere eventuali corpi di frana.

La mappa delle pendenze dei versanti è utile per evidenziare possibili anomalie nella morfologia o riconoscere nel versante eventuali accumuli di frana, caratterizzati da bassi valori di pendenza, e nicchie di distacco, rappresentate da bruschi incrementi del gradiente.

La mappa dell'esposizione dei versanti può essere utile nella fase interpretativa delle misure radar satellitari ottenute per mezzo di un'analisi interferometrica.

Le immagini di rilievo ombreggiato (*shaded relief*) sono invece immagini della topografia con falsa illuminazione del sole, create per generare ombre che mettano in risalto le geometrie di eventuali corpi di frana.

- Elaborazione immagini ottiche

In questa attività le foto aeree e le immagini ottiche satellitari acquisite sull'area di interesse vengono corrette geometricamente attraverso la georeferenziazione e l'ortorettifica.

La georeferenziazione consiste nella proiezione del dato in un sistema cartografico di riferimento e permette soltanto di collocare l'immagine nel sistema di proiezioni cartografiche utilizzato. L'ortorettifica invece tiene conto anche delle distorsioni dovute all'angolo di ripresa del sensore ed alla topografia del rilievo mediante l'uso del modello digitale del terreno, e permette di trasformare la proiezione dell'immagine in modo che, nell'immagine corretta, ciascun *pixel* appaia come osservato da una posizione ad esso perpendicolare. Per effettuare l'ortorettifica delle immagini ottiche sono necessari i dati di calibrazione interni del sensore ed il modello digitale del terreno dell'area analizzata.

Mentre la semplice georeferenziazione può essere sufficiente in aree pianeggianti, l'ortorettifica è importante in aree collinari e montuose, per un elevato grado di accuratezza a terra.

Una volta corrette geometricamente, le immagini ottiche possono essere elaborate dal punto di vista radiometrico e spettrale con operazioni di miglioramento del contrasto e analisi su tutte le bande disponibili (visibile ed IR vicino), visualizzando ed elaborando le bande con composizioni a falsi colori o con la composizione in colori naturali.

- Elaborazione immagini radar satellitari  
Le immagini satellitari vengono elaborate con la tecnica multi-interferogramma scelta.

### 3. Omogeneizzazione dei dati in ambiente GIS:

Una volta conclusa l'attività di elaborazione, i dati ancillari, ottici e radar vengono importati in un unico sistema di riferimento cartografico in modo da poterli sovrapporre, confrontare ed integrare. Prima di procedere con l'analisi dei dati PS, questi devono essere: i) visualizzati e classificati in funzione della velocità media e delle caratteristiche dei geoprocessi presenti nell'area; ii) sovrapposti ai dati ancillari quali, ad esempio, carte topografiche, cartografiche e ortofoto; iii) analizzati in funzione della distribuzione spaziale delle misure di velocità media, al fine di valutare se l'informazione fornita può essere considerata attendibile o soggetta ad errori in fase di *processing* come ad esempio la presenza di contributo atmosferico o l'errata scelta del *reference point*. Nell'ultimo caso si procede con la stima e successiva rimozione dell'offset dai valori di velocità media del *dataset*. Talvolta in fase di processing può essere selezionato un *reference point* soggetto a movimenti ed evidentemente la sottrazione del valore di velocità del punto di riferimento alle velocità medie di deformazione dei bersagli radar modifica anche i valori di deformazione contenuti in ciascuna serie storica.

### 4. Interpretazione:

- Foto-interpretazione  
Questa attività consiste nell'interpretazione delle foto aeree e delle immagini ottiche satellitari, focalizzata soprattutto all'individuazione ed alla mappatura di fenomeni franosi.

Il tradizionale utilizzo di tali dati in configurazione stereoscopica permette di effettuare la mappatura dei fenomeni di dissesto idrogeologico attraverso l'individuazione delle geometrie di eventuali corpi di frana e l'analisi delle condizioni della copertura vegetale (anomalie di copertura vegetale possono essere indicatori di movimento).

La fotointerpretazione necessita del supporto dei dati ancillari, quali carte topografiche, DTM e cartografie derivate. L'analisi delle foto aeree o delle immagini ottiche satellitari, insieme alla morfologia deducibile dalle curve di livello e dall'immagine in *shaded relief* dell'area, permettono di evidenziare la presenza di indicatori di movimento e di perimetrare l'area instabile.

Oltre ai prodotti ottenibili mediante le tradizionali analisi stereoscopiche, le immagini ottiche satellitari, grazie alla multispettralità delle riprese ed alle diverse bande dello spettro elettromagnetico analizzate, permettono di discriminare diverse tipologie di superficie e di riconoscere gli aspetti tessiturali del territorio, quali lineazioni tettoniche e morfologiche. Per evidenziare la presenza delle aree instabili possono dunque essere utilizzate diverse composizioni delle bande dello spettro o algoritmi di estrazione di informazioni correlabili con la presenza di variazioni nella morfologia o nella copertura vegetale, possibili indicatori di instabilità di versante (*change detection*).

- Radar-interpretazione

Il termine radar-interpretazione comprende l'uso combinato delle analisi interferometriche e delle tecniche convenzionali per lo studio dei fenomeni di dissesto idrogeologico (Farina et al. 2007). Tale attività rappresenta uno strumento fondamentale per estrarre informazioni non solo sulla tipologia, sull'estensione e sulle cause dei fenomeni analizzati, ma soprattutto sulla loro evoluzione spaziale e temporale.

5. Individuazione e mappatura dei fenomeni

Tutte le attività sopra descritte conducono alla localizzazione e perimetrazione dei fenomeni deformativi in atto nell'area oggetto.

6. Integrazione con dati di superficie e di sottosuolo

Tutte le analisi ed elaborazioni fatte devono essere integrate con i dati di superficie e di sottosuolo disponibili nell'area, per poter formulare una caratterizzazione completa dei fenomeni deformativi individuati.

7. Interpretazione e caratterizzazione dei fenomeni

L'interpretazione di dettaglio delle aree soggette a dissesti precedentemente individuate deve essere mirata alla caratterizzazione spaziale e temporale dei processi e dei meccanismi evolutivi, che consente una miglior definizione di programmi di mitigazione del rischio.

8. Controllo di campagna

All'individuazione, interpretazione e caratterizzazione dei dissesti deve seguire un controllo con dati di verità a terra, per verificare, confermare o eventualmente migliorare le valutazioni effettuate sui fenomeni deformativi presenti nell'area di indagine.

9. Mappa inventario dei dissesti idrogeologici

Il prodotto finale di questa metodologia per l'analisi dei dati satellitari consiste in una mappa inventario dei dissesti idrogeologici individuati nell'area in esame contenente le informazioni derivanti dall'analisi dei dati PS integrati con le informazioni ricavate dagli altri dati a disposizione.

## 5.2 Individuazione e Mappatura (*Detection and Mapping*)

L'individuazione di aree soggette a deformazione deve poter rispondere ai seguenti quesiti:

- dove il dissesto è avvenuto (o sta avvenendo);
- quanto è estesa l'area interessata dal dissesto.

In funzione dello scopo dell'analisi e dell'estensione dell'area da investigare, l'informazione fornita dai dati PS può variare sensibilmente. Vengono di seguito presentati esempi di individuazione e mappatura di movimenti di massa a scala nazionale, su area vasta e a scala locale.

Nelle aree analizzate, i dissesti individuati sono poi caratterizzati al fine di valutare le cause e gli effetti che determinano le deformazioni misurate. La caratterizzazione del fenomeno viene effettuata ovviamente a scala locale, determinandone anche la sua evoluzione spaziale e temporale.

L'analisi dei dati PS condotta a differenti scale consente l'individuazione di diverse tipologie di geoprocessi, soprattutto per l'estensione del territorio che vanno ad interessare. Come è facilmente

intuibile, più si restringe la scala di indagine, più si può analizzare nel dettaglio il fenomeno individuato, sino ad arrivare al dissesto a scala di versante.

In Tabella 4 vengono riportati i diversi valori delle scale spaziali per l'analisi dei dati interferometrici satellitari:

Scala Spaziale	Scala di analisi
Scala Nazionale	<1:100.000
Area Vasta	1:25.000
Scala Locale	1:10.000

**Tabella 4 - Valori delle scale spaziali di analisi dei dati PS.**

Come è intuibile, per la scala nazionale la variabilità è notevole ma, per parlare di analisi dei dati satellitari e non di una semplice visualizzazione dei PS classificati in funzione della velocità media, si deve poter effettuare una preliminare comprensione della tipologia dei geoprocessi individuati. Per effettuare tale analisi è consigliabile attenersi a scale comprese tra 1:100.000 e 1:250.000. Ciò consente inoltre di poter compiere le valutazioni inerenti i dissesti individuati attenendosi quanto più possibile all'area coperta da una sola unità di *processing*, limitando così di analisi su settori adiacenti coperti da diverse unità indipendenti e non confrontabili tra loro, in quanto facenti riferimento a *reference point* diversi.

### 5.2.1 Scala Nazionale

La disponibilità di dati PS su tutto il territorio nazionale consente la rapida individuazione di aree estese soggette a deformazioni superficiali legati principalmente a fenomeni di subsidenza (compattazione di sedimenti nelle piane alluvionali e negli ambienti deltizi dei principali fiumi italiani, ingenti estrazione di fluidi dal sottosuolo) o di sollevamento (tettonica attiva e processi vulcanici).

Non è possibile individuare a tale scala di indagine singoli fenomeni franosi o riuscire a determinare se nella stessa area soggetta a movimenti del suolo vi possono essere settori che presentano un diverso tasso deformativo legato a delle variazioni spaziali negli stessi geoprocessi o nelle cause che li determinano.

Viene di seguito presentato il progetto del Piano straordinario di Telerilevamento Ambientale (PST-A), primo progetto al mondo che prevede una copertura dell'intero territorio nazionale con dati interferometrici satellitari. Vengono affrontate e descritte in dettaglio anche la copertura spaziale e temporale dei dati, ma soprattutto il processo di produzione dei dati in quanto i criteri che sono stati stabiliti costituiscono la base per un piano di monitoraggio satellitare a scala nazionale che preveda anche l'aggiornamento dei dati PS secondo intervalli di tempo stabiliti.

#### 5.2.1.1 Il Piano Straordinario di Telerilevamento Ambientale (PST-A)

Il PST-A è un Accordo di Programma tra Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM), Presidenza del Consiglio dei Ministri – Dipartimento della Protezione Civile (DPC) e Ministero della Difesa (MD) d'intesa con le Regioni e le Province Autonome ed ha come obiettivo quello di avviare la costituzione di una base dati ad alta risoluzione del territorio nazionale per la

pianificazione del rischio idrogeologico, tramite l'utilizzo delle tecnologie più evolute che le piattaforme satellitari (dati PS) e su aeromobili (dati LiDAR) rendono attualmente disponibili. A supporto delle Pubbliche Amministrazioni (PA) e degli utenti che si occupano di pianificazione territoriale, tali dati saranno fruibili sul sito del Portale Cartografico Nazionale (PCN).

In questi ultimi anni, 3 regioni (Piemonte, Emilia-Romagna e Campania) ed un'Autorità di Bacino nazionale (AdB Arno) hanno acquisito ed elaborato dati interferometrici coprendo, ove possibile, il territorio di propria competenza. Hanno così dato inizio ad attività di gestione del rischio idrogeologico che prevedono anche le informazioni fornite dall'analisi dei dati radar satellitari. Sulla base delle esperienze maturate e dei risultati conseguiti nell'ambito dei diversi progetti effettuati, il MATTM ha avviato l'acquisizione e l'elaborazione dei dati PS dei satelliti ERS1/2 ed ENVISAT per tutta l'Italia.

Lo scopo del PST-A è quello di fornire un dato quanto più omogeneo su tutto il territorio nazionale, al fine di dotare le PA e gli operatori esperti del settore di un ulteriore strumento per la pianificazione territoriale e per il supporto ai processi decisionali in tutte le aree soggette a dissesti idrogeologici.

La copertura spaziale dei dati PS non sarà però omogenea su tutto il territorio nazionale in funzione di diversi fattori quali le aree coperte dalle acquisizioni dei satelliti ERS ed ENVISAT, il numero di immagini disponibili e la presenza di bersagli radar.

I PS ottenuti dall'elaborazione dei dati ERS ed ENVISAT coprono tutte le aree dove, secondo l'archivio ESA (DescW - <http://earth.esa.int/descw/>), al 28-11-2008 erano disponibili un numero di almeno 35 immagini. Il numero minimo di 35 immagini è stato scelto dai *data provider*, per garantire l'affidabilità del risultato. Tale valore è un compromesso affinché si ottengano punti con un'elevata probabilità che la misura sia effettivamente spostamento e non rumore. Con un numero di immagini maggiore di 35 l'incertezza dovuta alla presenza di rumore si ritiene sufficientemente bassa.

I dati di archivio dei satelliti ERS1/2 consentono l'elaborazione sull'intero territorio italiano nella geometria discendente e quella quasi completa nella geometria ascendente, secondo quanto riportato nella Figura 29. La copertura con i dati del satellite ENVISAT del territorio nazionale è parziale sia in orbita discendente e che ascendente.

La copertura temporale dei dati PS e le misure corrispondenti di velocità e spostamento è relativa al periodo 1992 – 2000 per i dati ERS1/2, elaborati con la tecnica PSInSAR, ed al periodo 2003 – 2008 per i dati ENVISAT, elaborati applicando la tecnica PSP-DIFSAR.

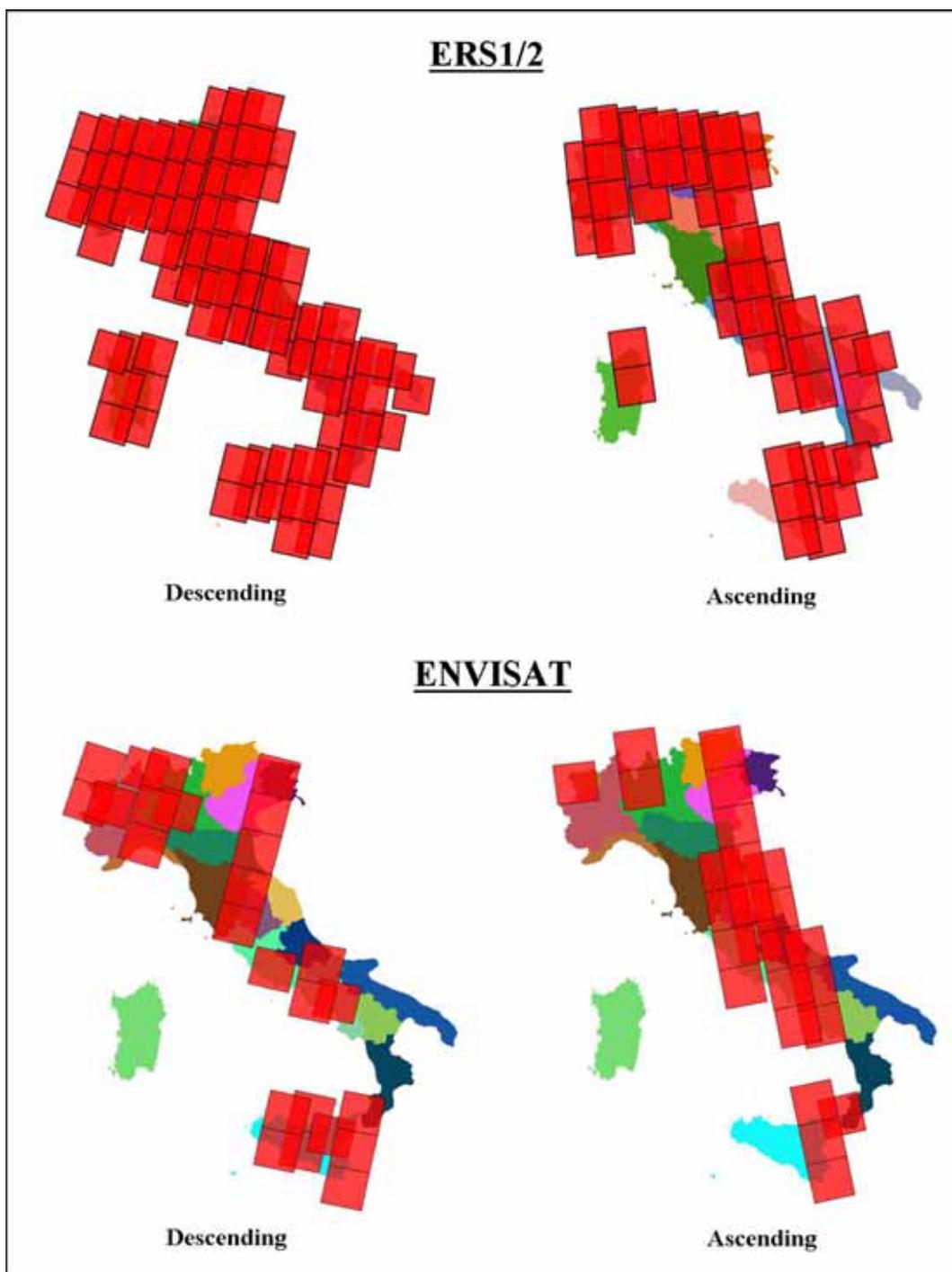


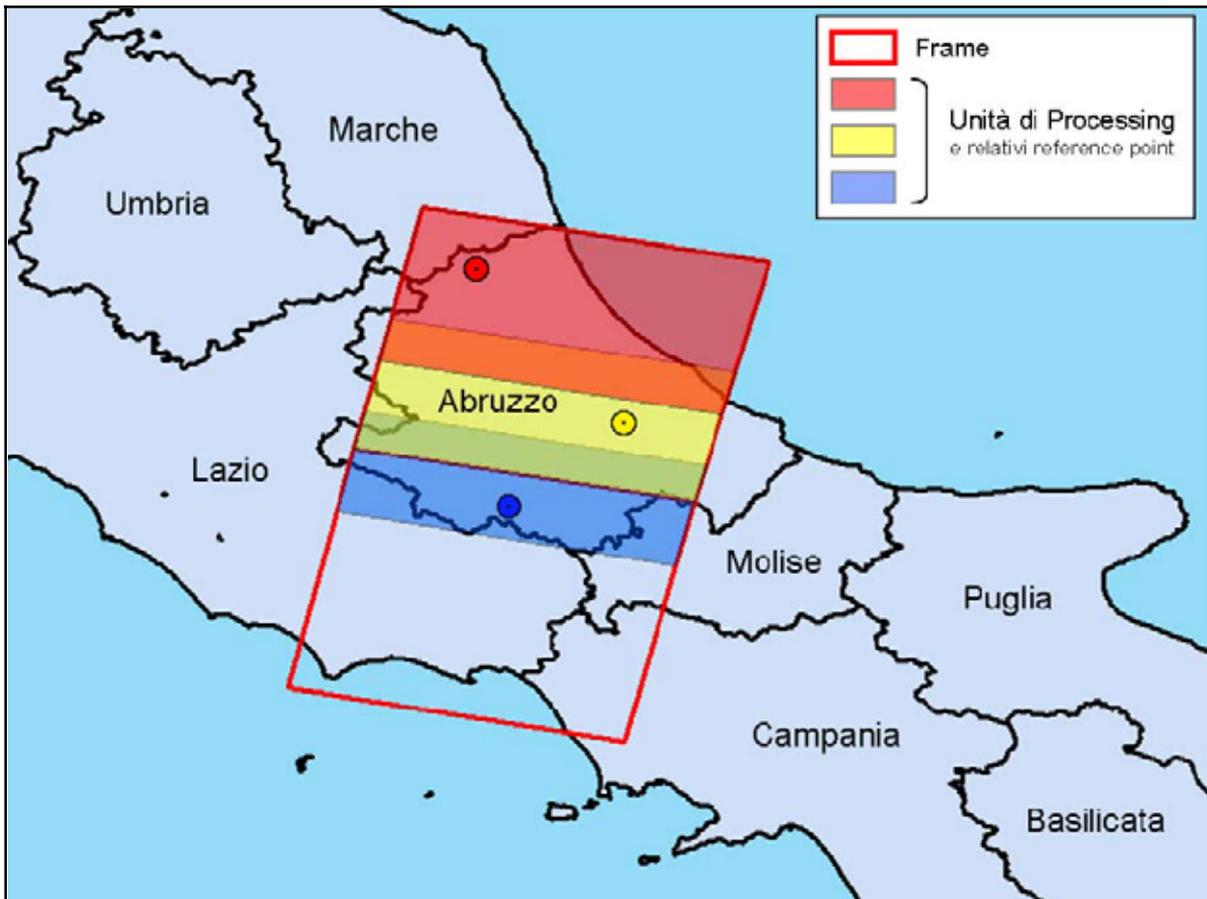
Figura 29– Copertura spaziale del territorio nazionale con i dati PS ERS1/2 ed ENVISAT nel PST-A (da Linee Guida per l'analisi dei dati interferometrici satellitari in aree soggette a dissesti idrogeologici, modificata).

Il progetto PST-A sta consentendo di stabilire alcuni punti chiave per il processo di produzione dei dati interferometrici satellitari a scala nazionale e per la determinazione di quali dissesti idrogeologici possono essere effettivamente valutati tramite l'utilizzo dei dati PS a questa scala. Ovviamente, essendo 2 i *data provider*, sono stati anche scelti differenti criteri per la produzione del dato PS, in

funzione delle rispettive tecniche di elaborazione e dei tempi di analisi, cercando di trovare soluzioni quanto più possibili in comune.

I punti possono essere così riassunti:

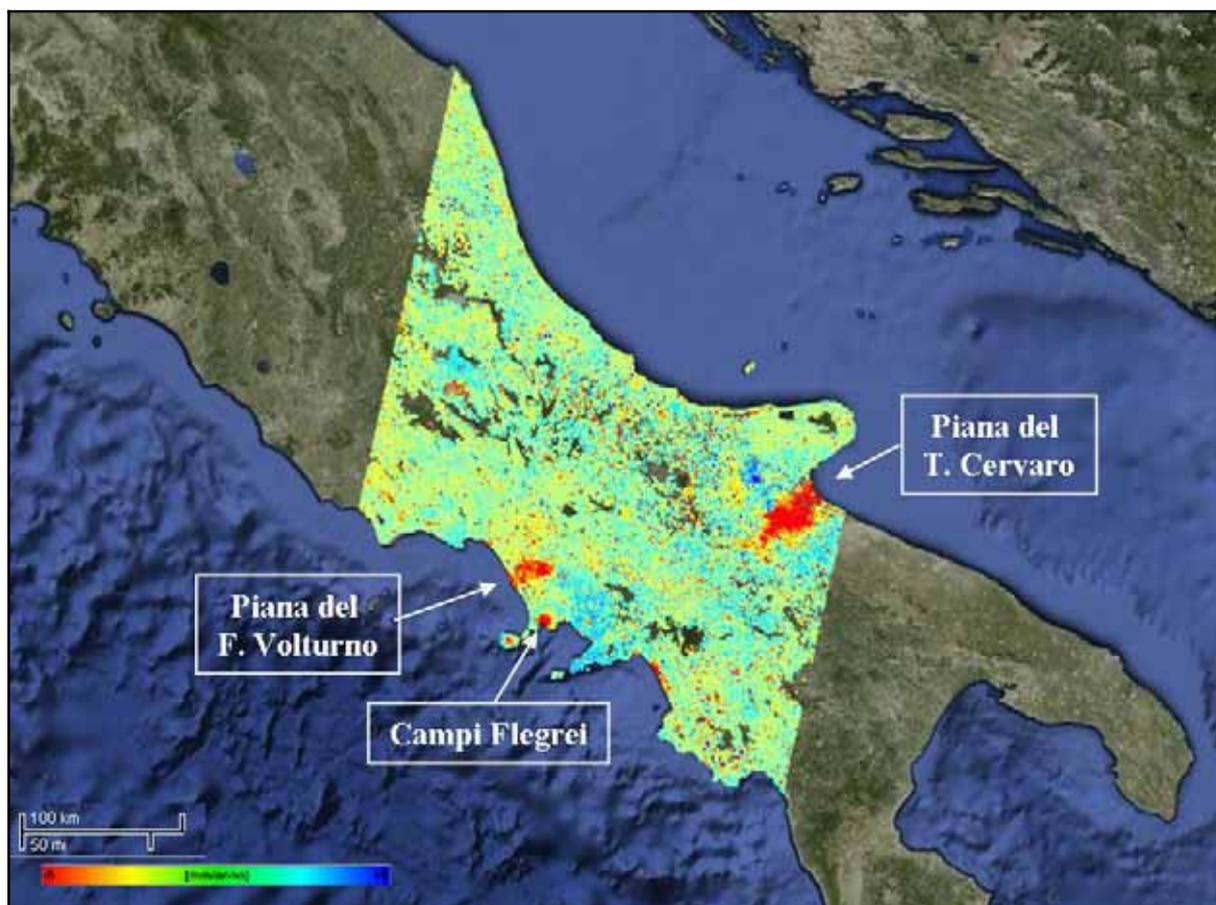
- Processing dei dati: sono stati stabiliti i criteri per l'elaborazione interferometrica dei *datastack* disponibili (relativi ad orbite sia ascendenti che discendenti), per la produzione di dati PS a scala nazionale compatibilmente con l'obiettivo ed i fondi stanziati per il progetto. Tali criteri sono stati definiti in accordo tra i *data provider* (TRE e e-GEOS), in accordo con il tavolo tecnico costituito da esperti di interpretazione dei dati PS. Nello specifico in questa fase sono stati elaborati tutti i *datastack* a disposizione, dividendo eventualmente in più "unità di *processing*" (ove necessario) le *frame* satellitari originali, che coprono ciascuna un'area di circa 100x100 km. Per poter coprire per intero il territorio nazionale, i dati PS sono stati prodotti anche sulle aree di confine tra *frame* adiacenti. Sono state elaborate tutte le immagini disponibili, acquisite sia lungo orbite ascendenti, sia lungo orbite discendenti del sensore. Tutte le unità di *processing* sono state definite in modo da avere una ricopertura rispetto a quelle adiacenti (ove disponibili) di almeno di 5 km.
- Individuazione dei punti di misura: L'individuazione dei punti di misura PS e l'estrazione delle informazioni di spostamento lungo la linea di vista del sensore sono state effettuate selezionando i punti con le caratteristiche elettromagnetiche più idonee per misure di spostamento all'interno di celle di circa 40x40 m. Questa è una caratteristica specifica dei dati del PST-A per ottimizzare la quantità di punti di misura in funzione dell'estesa area da coprire.
- Omogeneizzazione dei dati PS: è stato scelto un criterio di omogeneizzazione delle misure dei dati PS risultanti dalla fase di *processing* allo scopo di una miglior visualizzazione su area vasta. Al termine delle elaborazioni interferometriche operate sulle varie unità di *processing*, è stata effettuata una omogeneizzazione su area vasta dei risultati PS che sono assimilabili a reti geodetiche indipendenti, ognuna con un suo punto di riferimento indipendente. A tal fine sono state utilizzate le zone di ricopertura tra unità di *processing* (Figura 30). L'operazione effettuata ha consentito di:
  - individuare i punti di riferimento che minimizzano le differenze (e quindi le discontinuità) tra i valori di velocità media di spostamento nelle zone di ricopertura;
  - selezionare, ove una data area era disponibile su due *frame* adiacenti, i risultati migliori, soprattutto in termini di densità di punti di misura.
- Tempi di elaborazione: le ultime immagini satellitari per l'elaborazione dei dati ENVISAT sono state acquisite dal satellite nel novembre 2008. Al momento della stesura della presente tesi di dottorato sono ancora in fase di elaborazione le immagini satellitari dell'Italia settentrionale.



**Figura 30 -** Suddivisione delle frame ERS discendenti in unità di *processing* con indicazione dei rispettivi *reference point* scelti per l'elaborazione interferometrica. Da evidenziare le aree di ricopertura tra le unità adiacenti utilizzate nella fase di omogeneizzazione (da Linee Guida per l'analisi dei dati interferometrici satellitari in aree soggette a dissesti idrogeologici).

I criteri che sono stati stabiliti per il primo piano di telerilevamento a scala nazionale costituiscono la base per un piano di monitoraggio satellitare che preveda anche l'aggiornamento dei dati PS secondo intervalli di tempo stabiliti, futuro obiettivo del Piano di Telerilevamento Ordinario..

In Figura 31 viene mostrata la distribuzione dei dati PS ERS1/2 discendenti in un settore del centro – sud Italia. Si nota come dal processo di produzione dei dati non risultino nette variazioni spaziali dei valori di velocità medie dovute alla visualizzazione di diversi *dataset* confinanti. Da una semplice proiezione del dato di velocità media, è possibile individuare estese aree soggette a deformazione superficiale. In particolare si identificano, data la loro estensione, le aree in subsidenza della piana del T. Cervaro (FG), la piana del Volturno (CE) ed i Campi Flegrei (NA). Le cause dei dissesti sono diverse: le prime due sono riconducibili alla compattazione di depositi comprimibili in un'area di piana alluvionale, mentre gli spostamenti in allontanamento nell'area dei Campi Flegrei sono dovuti al fenomeno del bradisismo (5.2.2.2).

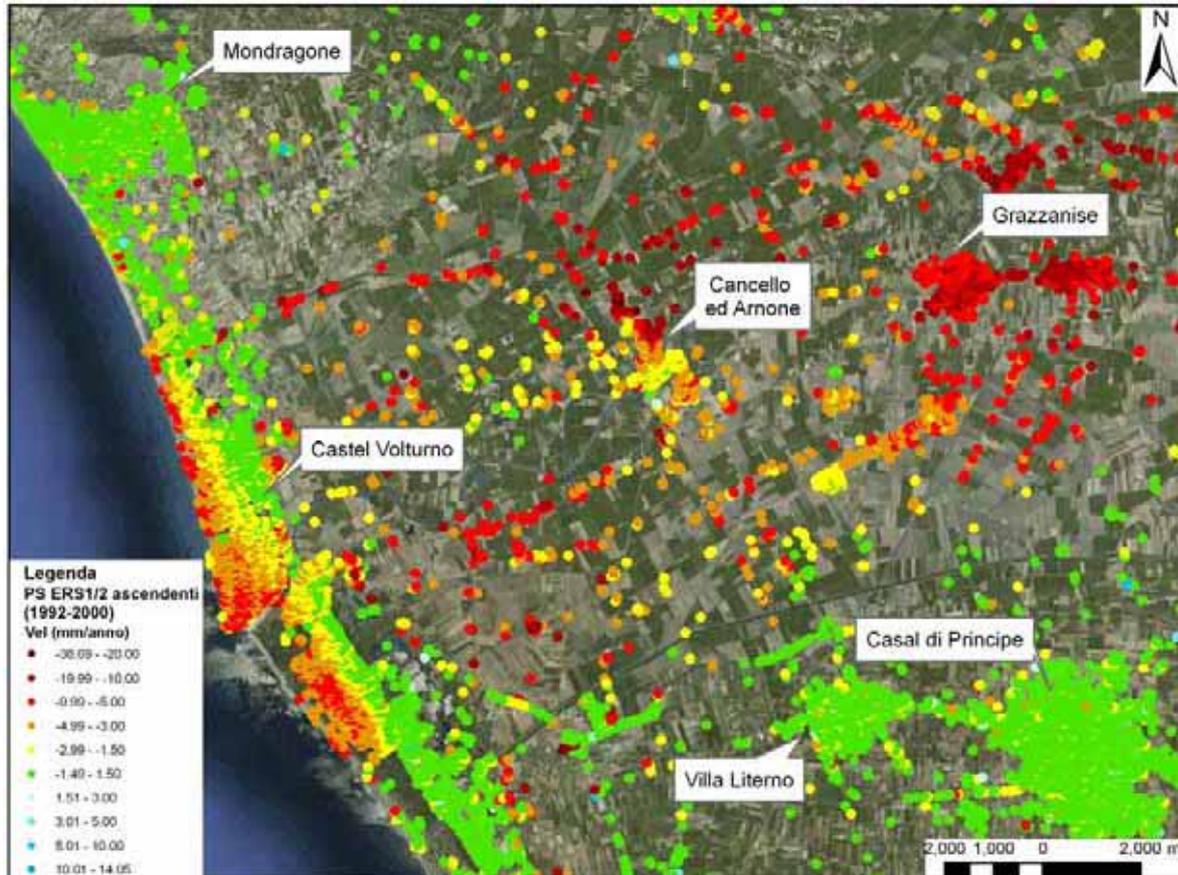


**Figura 31 – Distribuzione dei dati PS ERS1/2 discendenti del PST-A classificati in unzione ai valori di velocità media (da Linee Guida per l’analisi dei dati interferometrici satellitari in aree soggette a dissesti idrogeologici, modificata). Dopo la fase di processing o omogeneizzazione del dato PS non si notano nette variazioni di velocità in corrispondenza delle aree di confine tra 2 dataset di PS indipendenti. Inoltre si individuano 3 aree estese con velocità in allontanamento rispetto al satellite.**

L’utilizzo dei dati PS permette di lavorare a diverse scale di analisi e per le aree individuate, si può procedere con un’analisi sempre più dettagliata. Dalla classificazione e visualizzazione dei dati PS in funzione dei valori di velocità media in una delle aree individuate a scala nazionale, quella della piana del Volturno, è possibile effettuare una mappatura dell’area in subsidenza in cui si possono andare ad individuare le variazioni delle *facies* deposizionali di ambiente deltizio in base alle nette variazioni laterali delle velocità di spostamento (Figura 32). Inoltre nell’area della piana alluvionale è possibile riconoscere i settori in cui si registrano le maggiori velocità di spostamento in valore assoluto laddove vi sono i maggiori spessori di depositi comprimibili. Come è intuibile, per parlare di analisi dei dati PS a scala nazionale si devono poter evidenziare le variazioni spaziali delle deformazioni osservate si deve procedere ad un’analisi ad una scala compresa tra 1:250.000 e 1:100.000.

La capacità dei dati PS di fornire informazioni puntuali di spostamento con accuratezza millimetrica e l’elevato numero di bersagli radar presenti nell’area consente di effettuare un’analisi ancora più di dettaglio dei dissesti individuati, centrando così l’obiettivo del PST-A quale fornire uno strumento di supporto alle PA ed ai tecnici del settore per la pianificazione territoriale, che operi a diverse scale di indagine, arrivando sino alla scala del singolo edificio. Al momento della stesura della presente tesi sono in svolgimento le analisi dei dati PS nel sito di Castelpagano (BN), scelto come area test in cui

mostrare le potenzialità del dato interferometrico processato a scala nazionale per la caratterizzazione dei dissesti.



**Figura 32 – Distribuzione dei dati PS ERS1/2 discendenti nell’area della piana del F. Volturno. E’ possibile individuare dalle nette differenze nei valori di velocità di spostamento le variazioni di facies deposizionali in ambiente deltizio presso Castel Volturno e le aree della piana alluvionale dove si registrano i maggiori tassi di subsidenza, come il settore di Grazzanise in riva sinistra e il settore a N di Canello ed Arnone in riva destra.**

### 5.2.2 Area Vasta

L’analisi dei dati PS condotta su area vasta consente di individuare e mappare movimenti di massa localizzati ad una scala spaziale che può essere stabilita di 1:25.000. Una scala minore, e quindi con livello intermedio di dettaglio, infatti non consentirebbe di parlare di analisi dei dati su area vasta, in quanto non verrebbero sfruttate tutte le informazioni estraibili dai dati per la valutazione spaziale e temporale dei dissesti.

Il confronto tra i diversi *dataset* di PS, provenienti da diversi sensori ed elaborati in diversi intervalli temporali, consente di identificare le aree in cui si verificano variazioni delle velocità medie di spostamento o le nuove aree soggette a deformazioni superficiali.

Di seguito vengono presentati i casi di individuazione e mappatura di dissesti in grandi aree urbane, quali Roma e Napoli. Queste 2 aree test sono state selezionate nell’ambito del progetto SAR.net in collaborazione con il DPC per lo sviluppo di una rete per il monitoraggio dei movimenti del terreno

mediante radar ad apertura sintetica nell'ambito del sistema di sorveglianza nazionale per il rischio idrogeologico. Per tale progetto è stato scelto di utilizzare i dati satellitari ERS1/2 per lo storico delle deformazioni, dal 1992 al 2000, ed i dati RADARSAT, per il periodo 2003-2007. Questi ultimi sono stati preferiti ai dati ENVISAT per l'elevata risoluzione spaziale delle immagini SAR acquisite dal sensore che ha permesso di ottenere un numero elevato ed accurato di informazioni.

In queste aree, visto l'intenso grado di urbanizzazione e quindi l'elevata densità di bersagli radar, è stato possibile effettuare una mappatura di dettaglio delle zone interessate da deformazioni superficiali. L'integrazione con dati bibliografici ha consentito di individuare le cause di tali dissesti. Di tutti i dissesti individuati, sono stati selezionati i casi più significativi, sui quali è stata effettuata una caratterizzazione a scala locale, integrando dati di superficie e di sottosuolo. Queste valutazioni di dettaglio vengono presentate nelle sezioni successive.

Nelle aree test nelle quali è stata effettuata l'analisi dei dati satellitari, sia su area vasta che a scala locale, viene inizialmente presentato un inquadramento geologico in quanto la comprensione delle deformazioni superficiali osservate, legate alla presenza di geoprocessi in atto o passati, può avvenire solo in seguito alla conoscenza delle caratteristiche geologiche e geomorfologiche del territorio. I dati PS costituiscono un valido strumento di supporto per l'individuazione e la caratterizzazione dei dissesti che non può però prescindere da una conoscenza delle peculiarità del territorio che avviene tramite l'integrazione dei dati cartografici, le immagini ottiche, i dati *in situ*, ecc. Tale conoscenza viene via via approfondita in funzione della maggiore scala spaziale di indagine. Per ogni area esaminata vengono successivamente descritti i dati PS elaborati ed analizzati. In funzione delle tecniche di *processing* dei dati PS e dell'estensione dell'area su cui vengono elaborate le immagini, fattori che determinano una variazione notevole in termini di quantità ed accuratezza dei dati estratti, è possibile analizzare quali movimenti di massa localizzati possono essere individuati ed inoltre è possibile determinare i rispettivi livelli di dettaglio di analisi.

### 5.2.2.1 Roma

L'analisi dei dati PS ERS1/2 e RADARSAT condotta su area vasta nella zona urbana di Roma ha mostrato che la città presenta numerose aree interessate da dissesti, principalmente legati a cedimenti dovuti alle caratteristiche stratigrafiche e geotecniche dei sedimenti. Per l'area alluvionale del Fiume Tevere e dei suoi affluenti l'analisi dei PS mostra chiaramente che i depositi alluvionali sono caratterizzati da velocità negative con spostamenti in allontanamento rispetto al satellite.

Grazie all'elevata densità dei PS (si raggiunge il valore di 270 PS/km<sup>2</sup> con i RSAT F3), è stato possibile mappare in dettaglio le aree interessate da deformazioni superficiali interpolando i valori di velocità media dei PS nell'intero periodo di acquisizione.

In particolare i depositi alluvionali degli affluenti in sinistra del Tevere, contrariamente a quelli in destra, mostrano velocità negative rilevanti. Dall'analisi dei dati satellitari ERS1/2 (periodo 1992-2000) i valori massimi si riscontrano nella zona dell'E.U.R., in corrispondenza dello sbocco dei fossi "Tre Fontane" e "Acquacetosa" nel Tevere. Le velocità aumentano in valore assoluto procedendo verso la foce raggiungendo valori al di sopra dei 10mm/anno nella zona della "Muratella-Magliana", tra Ponte Galeria e l'E.U.R., sulla riva destra del corso del Tevere.

I dati del periodo 2003-2007 mostrano come, procedendo verso la foce del Tevere, si è ampliata l'area soggetta a subsidenza nella zona Muratella – Magliana, e come nella zona di Malafede i dissesti si sono approfonditi lungo il corso del fosso. Le cause dell'aumento delle aree affette da subsidenza sono da ricercare nelle recenti urbanizzazioni avvenute nella zona. Difatti, tutte le recenti opere antropiche costruite su terreni alluvionali sono soggette a subsidenza per compattazione dei sedimenti.

### Inquadramento geologico

La città di Roma è ubicata sul margine tirrenico laziale che è stato interessato da un regime tettonico estensionale sin dal Miocene superiore in connessione con l'apertura del Bacino Tirrenico. Questo processo è stato accompagnato da una coeva compressione nella catena appenninica che è andata migrando verso E, verso l'avampaese padano-adriatico-ionico (Boccaletti et al., 1990a,b; Patacca et al., 1990). Lungo il margine interno della catena, questo regime estensionale ha dato luogo ad una serie di bacini *half-graben*, principalmente orientati NNW-SSE/NW-SE e subordinatamente NE-SW, che sono stati riempiti con sedimenti clastici sin- e post-rift durante il Pliocene e il Pleistocene (Funicello et al., 1976; Barberi et al., 1994) (Figura 33).

Nell'area laziale la tettonica estensionale è stata accompagnata da un'intensa attività vulcanica, iniziata a partire dal Pliocene superiore (De Rita et al., 1997), che ha raggiunto la sua massima intensità durante il Pleistocene medio-superiore, dando luogo alla formazione dei complessi vulcanici della provincia magmatica potassica romana (Locardi et al., 1976; Fornaseri et al., 1985; Cioni et al., 1993; De Rita et al., 1993,1995; Karner et al., 2001) (Figura 34). La maggior parte dei prodotti è legata ad un'attività prevalentemente esplosiva e, subordinatamente, effusiva.

Negli ultimi anni diversi Autori hanno investigato i terreni plio-pleistocenici dell'area romana, pervenendo a ricostruzioni paleogeografiche piuttosto dettagliate ed evidenziando come l'assetto geologico e stratigrafico dell'area rappresenti il risultato della stretta interazione tra le fluttuazioni glacio-eustatiche del livello marino, l'attività vulcanica e la tettonica di sollevamento del margine tirrenico laziale (Malatesta & Zarlenga, 1998; De Rita et al., 1991, 1994; Milli & Zarlenga, 1991; Cavinato et al., 1992; Milli, 1992, 1994, 1997, 2001; Bellotti et al., 1993; Marra & Rosa, 1995; Alvarez et al., 1996; Basili & Bosi, 1996; Marra et al., 1998; Karner & Marra, 1998; Karner & Renne, 1998; Karner et al., 2001; Funicello & Giordano, 2005).

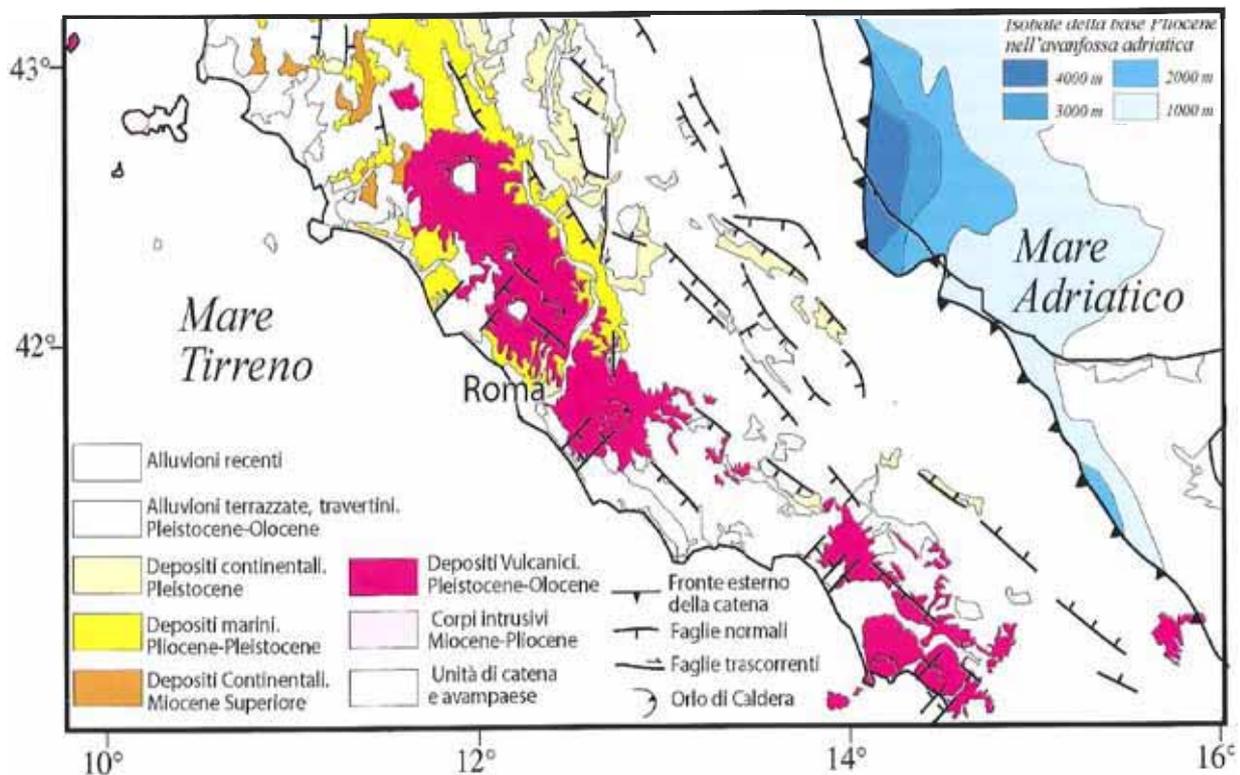
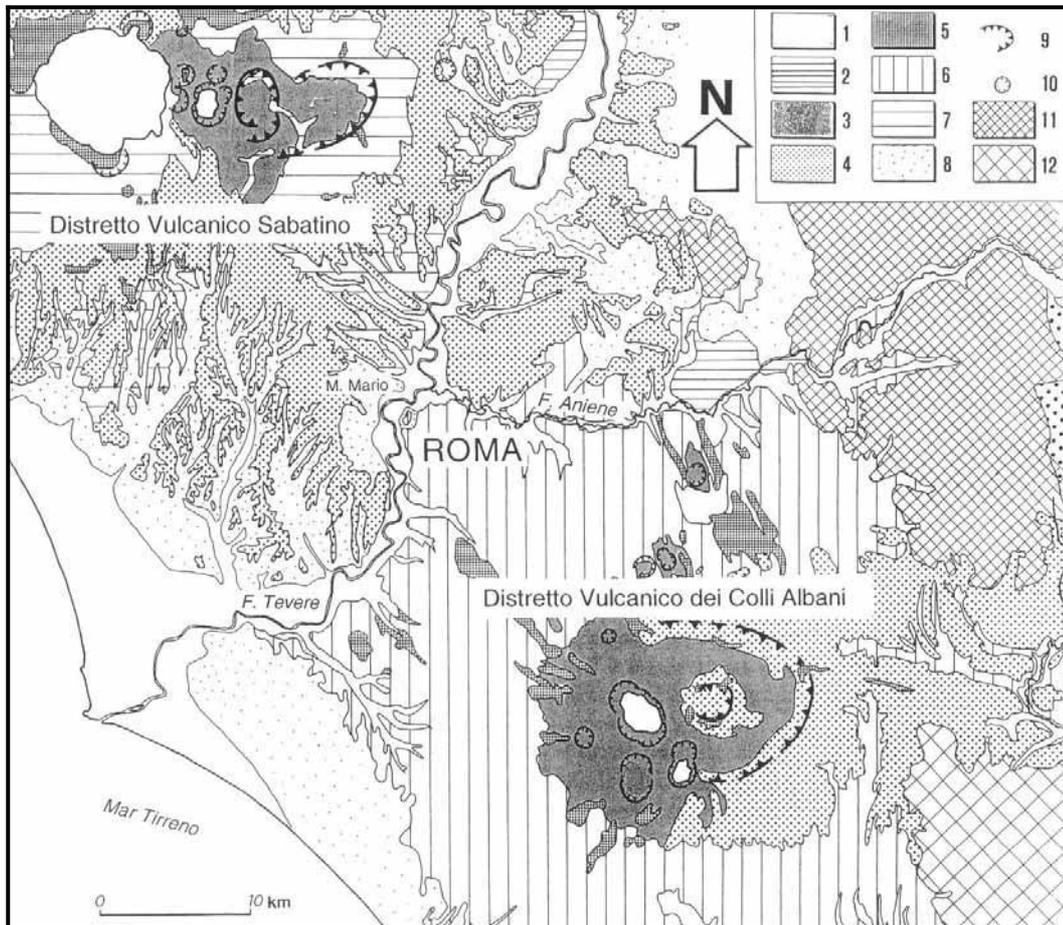


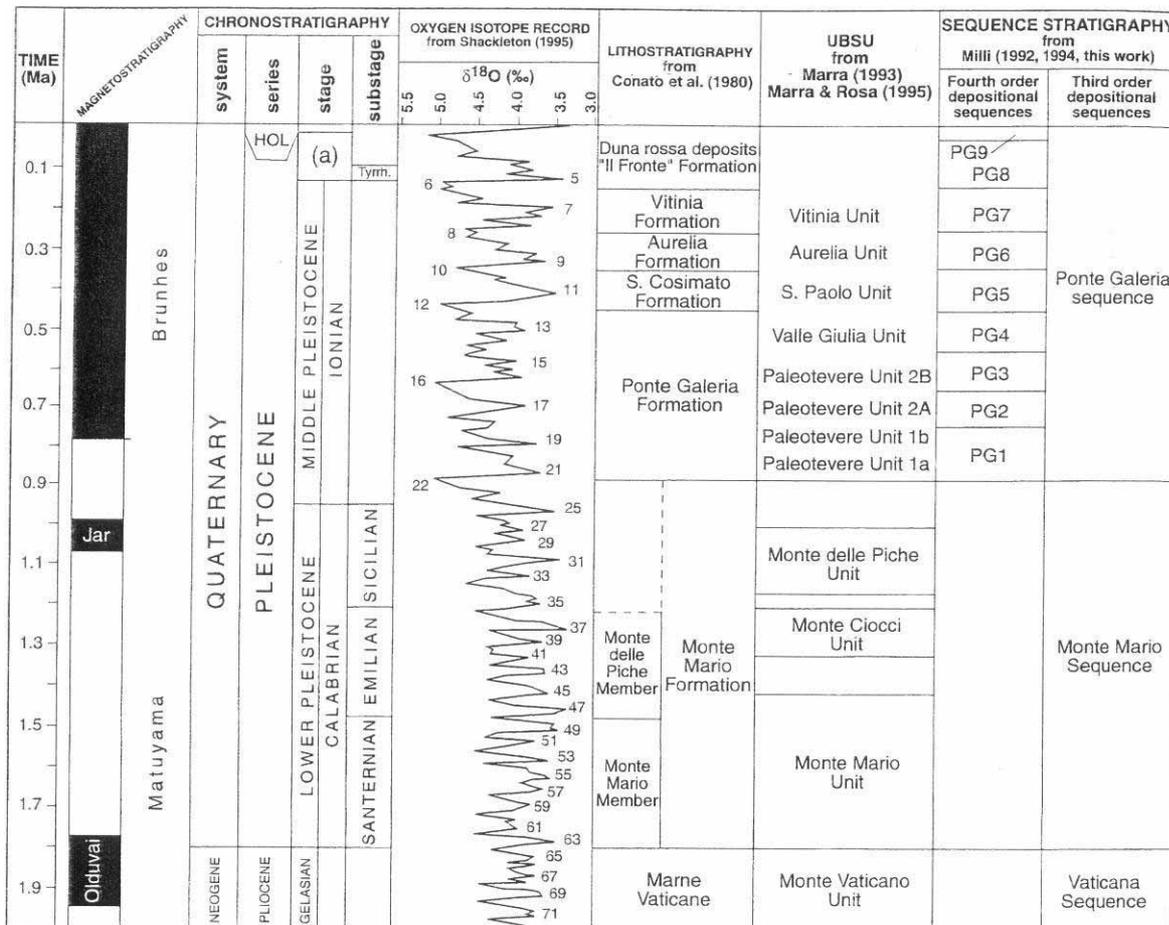
Figura 33: Schema strutturale del margine tirrenico centro-settentrionale della penisola italiana (da Mattei et alii, 2008, modificato).



**Figura 34:** Area romana con localizzazione dei distretti vulcanici sabatino ed albano. 1) depositi alluvionali recenti ed attuali; 2) travertini; 3) unità idromagmatiche; 4) depositi piroclastici di ricaduta; 5) colate di lava; 6) unità ignimbratiche sabatine; 8) unità sedimentarie plio-pleistoceniche; 9) orlo di caldera; 10) orlo di cratere; 11) unità sedimentarie pelagiche meso-cenozoiche; 12) unità sedimentarie meso-cenozoiche di piattaforma carbonatica (da Marra & Rosa; 1995).

L'unità stratigrafica più vecchia affiorante nell'area romana, è l'Unità di Monte Vaticano (Funicello & Giordano, 2005), conosciuta anche come "Argille Azzurre" o "Marne Vaticane" (Figura 35), depositasi durante il Pliocene quando tutto il margine tirrenico era invaso dalle acque marine. E' costituita da argille più o meno siltose, consolidate, con uno spessore che può raggiungere anche gli 800 m. Questi depositi, notevolmente interessati da deformazioni tettoniche (Figura 37), costituiscono il *bedrock* di tutta l'area romana e l'aquitardo per le unità idrogeologiche di Roma.

I depositi Pleistocenici sovrastanti sono stati recentemente suddivisi in due sequenze stratigrafiche: La "Sequenza di Monte Mario" del Pleistocene inferiore (1.795-0.87 Ma) e la "Sequenza di Ponte Galeria" del Pleistocene Medio-Olocene (0,87 Ma- Attuale) (Milli, 1997) (Figura 35).

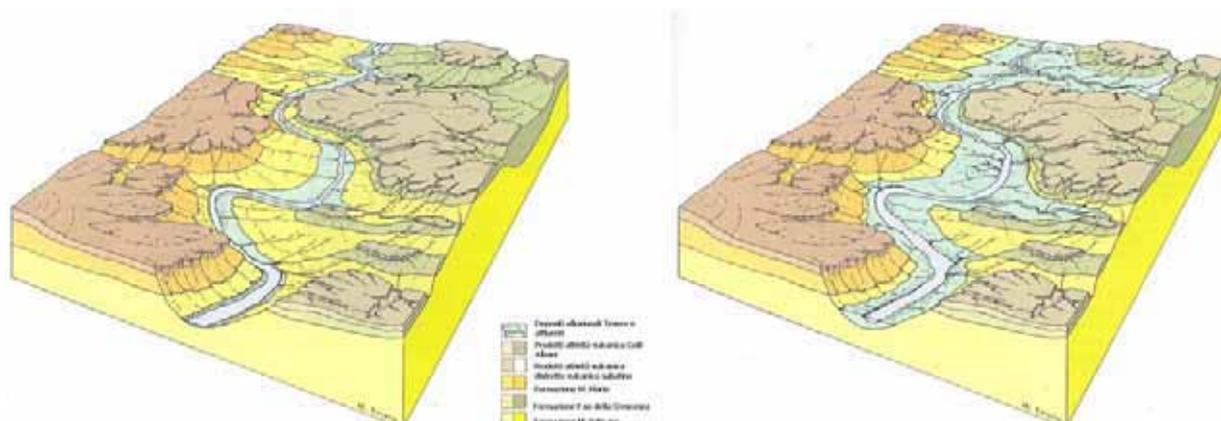


**Figura 35: Suddivisioni stratigrafiche di Alcuni Autori dei depositi Plio-Pleistocenici dell'area Romana e record isotopico dell'ossigeno (Milli, 1997).**

Senza entrare nel dettaglio dell'analisi sequenziale di tali successioni, il cambiamento paleogeomorfológico e paleo-idrografico piú importante si è verificato nel Pleistocene Medio (0,87 Ma), al passaggio attraverso una superficie fortemente erosiva, tra le due sequenze stratigrafiche di "Monte Mario" e di "Ponte Galeria": a seguito di un'intensa attività tettonica dei distretti vulcanici Albani e Sabatini, il paleo-Tevere, che scorreva precedentemente parallelo alla costa verso SE, viene deviato nell'attuale posizione, costretto nell'area di Roma tra le pendici della dorsale Plio-Pleistocenica di Monte Mario-Gianicolo ed il *plateau* ignimbrítico albano (Faccenna et al., 2005; Campolunghi et al., 2007).

Le fasi deposizionali ed erosive successive sono legate in maniera complessa alle variazioni climatiche che hanno accompagnato l'alternarsi dei periodi glaciali ed interglaciali nel Quaternario ed all'intensa attività tettonica che ha interessato l'area in esame. Rimandando alla bibliografia per un maggior approfondimento, durante il Pleistocene medio-Attuale si osserva una generale tendenza alla sostituzione dei depositi di ambiente marino pliocenici con depositi costieri e continentali, correlata principalmente dal sollevamento dell'Appennino e del margine Tirrenico (Milli, 1997).

Durante l'ultima glaciazione, il livello del mare scese progressivamente di oltre 110 m (ultima fase Würm). L'attività erosiva si intensificò ed il Tevere ed i suoi affluenti incisero profonde valli nei depositi vulcanici e pre-vulcanici, fino a raggiungere le formazioni marine plio-pleistoceniche. Con la fine della fase glaciale e la progressiva risalita del mare, le incisioni fluviali vennero progressivamente colmate da sedimenti fluviali e lacustri-palustri (Figura 36).



**Figura 36 – Evoluzione paleogeografica dell’area romana nella fase glaciale del Würm (a sinistra) e la successiva deposizione di sedimenti alluvionali nella fase post-glaciale (a destra) (disegni di Parotto M., CNR 1991).**

I depositi alluvionali del Tevere e dei suoi tributari sono costituiti da litologie e facies fortemente eterogenee che riflettono gli eventi tettonici, vulcanici, climatici ed eustatici che hanno interessato l’area in esame durante l’ultimo ciclo glacio-eustatico (Pleistocene superiore-Olocene - Milli, 1997). Le superfici di discontinuità stratigrafiche e le superfici di erosione presenti nella successione sono state ricostruite da diversi Autori (Figura 37) con grande dettaglio in un’area estremamente vasta, in base ai dati forniti da migliaia di sondaggi (Ventriglia, 2002).

Lo spessore di questi depositi può variare da <1 m a 30-40 m nelle aree più a monte ad esclusiva deposizione fluviale, fino ad 80 m di spessore al di sotto dell’attuale piana deltizia del Tevere, dove l’ambiente di deposizione passa da fluviale a lagunare-deltizio.

Campolunghi et al., 2007 riportano i risultati delle più recenti indagini geotecniche sui depositi alluvionali del Tevere e in particolar modo dei suoi tributari (Figura 38) ed hanno fornito ottimi spunti per l’interpretazione dei dati satellitari.

In Figura 39 (Campolunghi et al., 2007) vengono confrontati i grafici di tre prove penetrometriche statiche effettuate sui depositi del Fiume Tevere, del Fosso Maglianella, tributario di destra, e del Fosso “Grotta Perfetta”, tributario di sinistra. Si osserva che i depositi del Tevere e del Fosso Grotta perfetta mostrano valori notevolmente più bassi di resistenza alla penetrazione rispetto ai depositi Fosso Maglianella.

In Figura 40 vengono riportate le stratigrafie dei depositi alluvionali dei principali tributari del Tevere in area romana: i depositi degli affluenti di sinistra mostrano una maggiore presenza di materiale organico e spessori più elevati dei livelli torbosi.

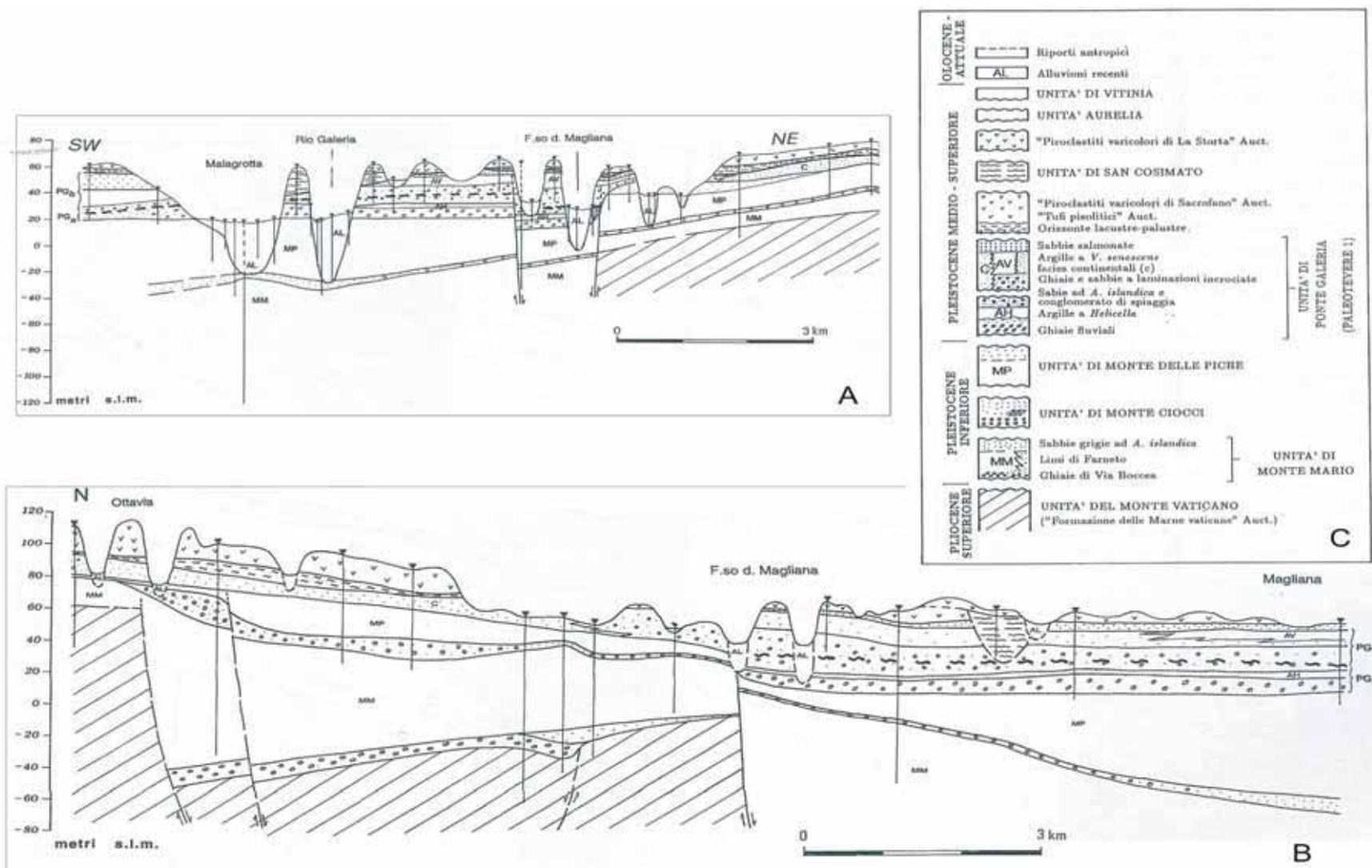


Figura 37 - A) Profilo SW-NE dell'area tra Malagrotta e l'area urbana di Roma (da Marra & Rosa, 1995); B) Profilo N-S nell'area tra Ottavia e Ponte Galeria (da Marra & Rosa, 1995); C) Colonna litostratigrafica relativa all'area di Ponte Galeria (da Marra, 1993). Nei profili viene riportata la posizione dei sondaggi utilizzati dagli Autori per la ricostruzione proposta. Le figure mettono in evidenza le faglie normali che interessano il substrato pliocenico ed in parte i depositi Pleistocenici.

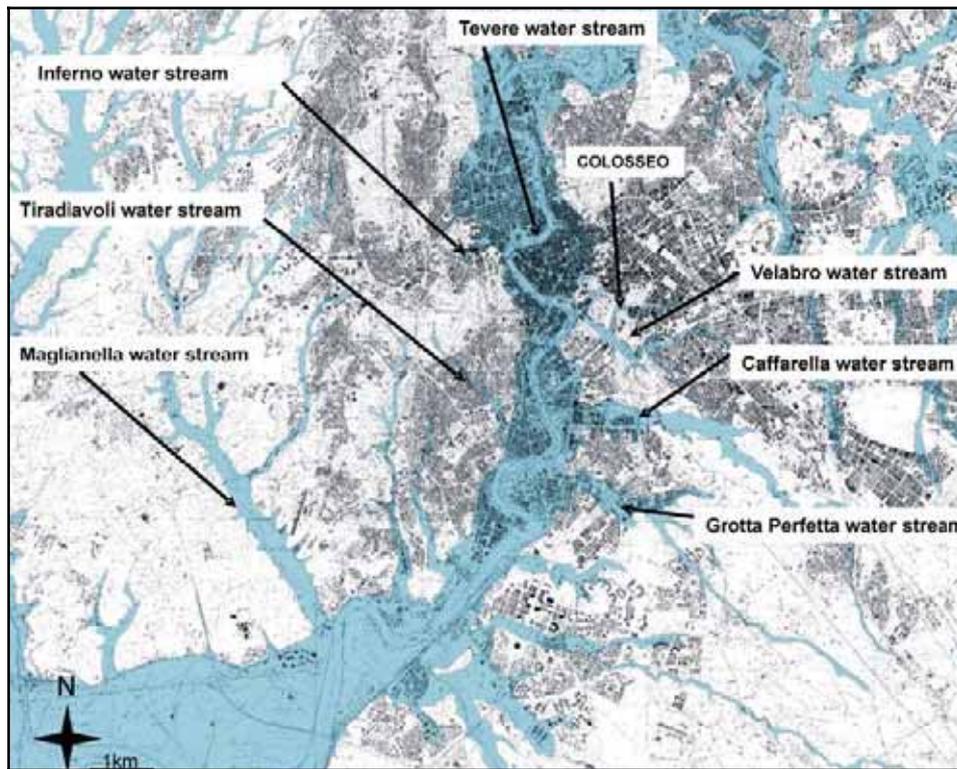


Figura 38 - Mappa di Roma con localizzazione dei tributari del Tevere oggetto di indagini geotecniche in Campolunghi et al., 2007.

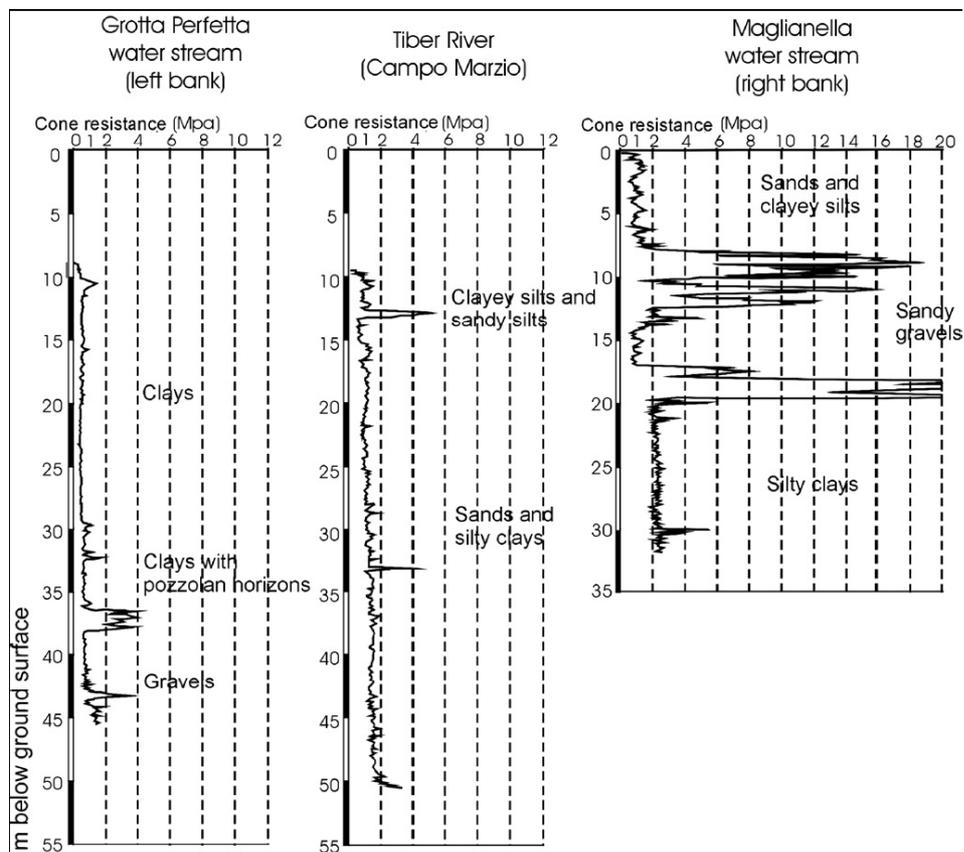


Figura 39 - Confronto tra tre test di penetrazione statica (CPT) sui depositi alluvionali del Tevere e di due affluenti di destra (Magliarella) e di sinistra (Grotta Perfetta) (da Campolunghi et alii, 2007).

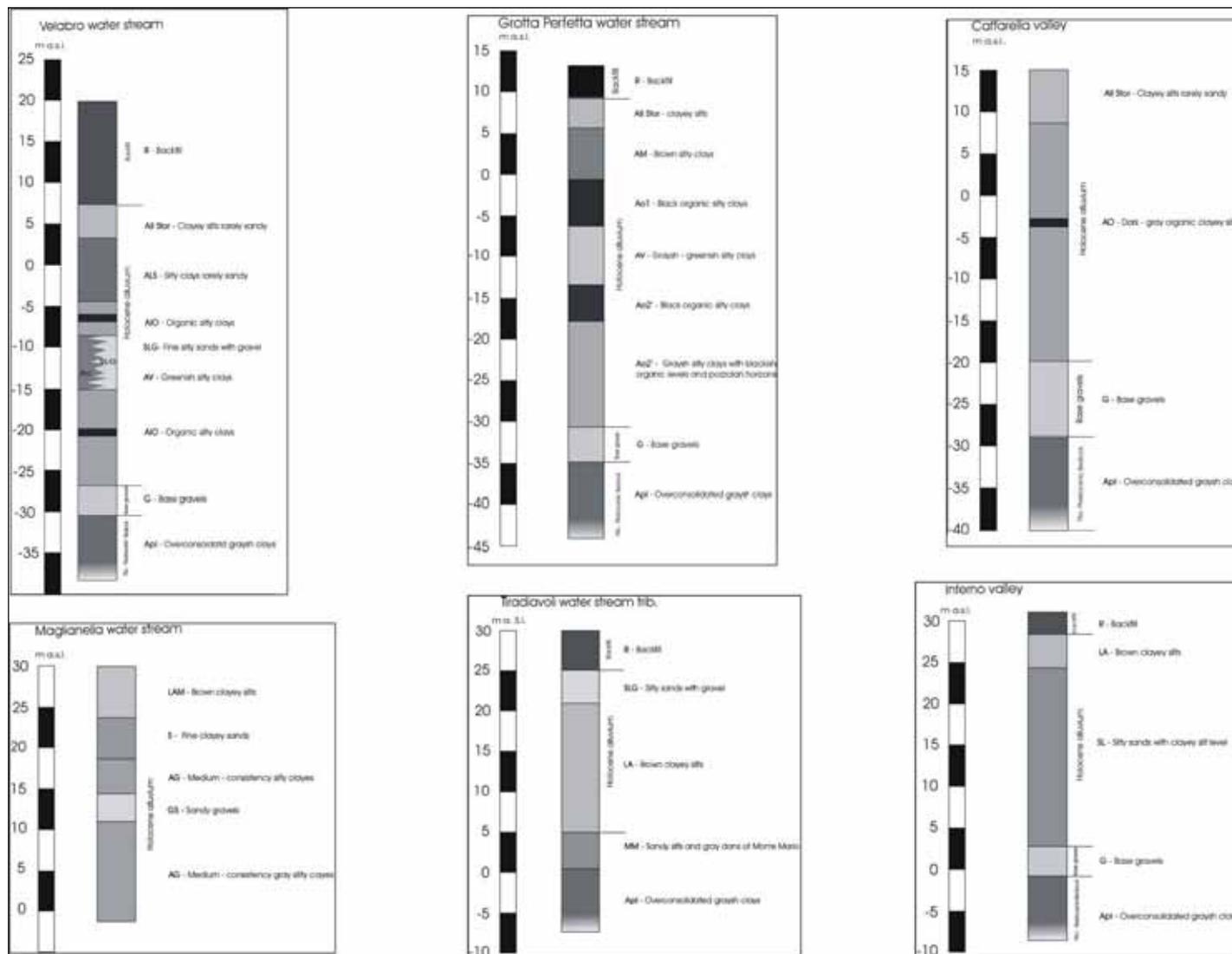


Figura 40 - Stratigrafie schematiche dei depositi alluvionali dei tributari del Tevere (da Campolunghi et alii, 2007).

In Figura 41 Campolunghi et alii (2007) mostrano l'alta plasticità dei depositi pelitici, ricchi di sostanza organica, del Fosso Grotta Perfetta.

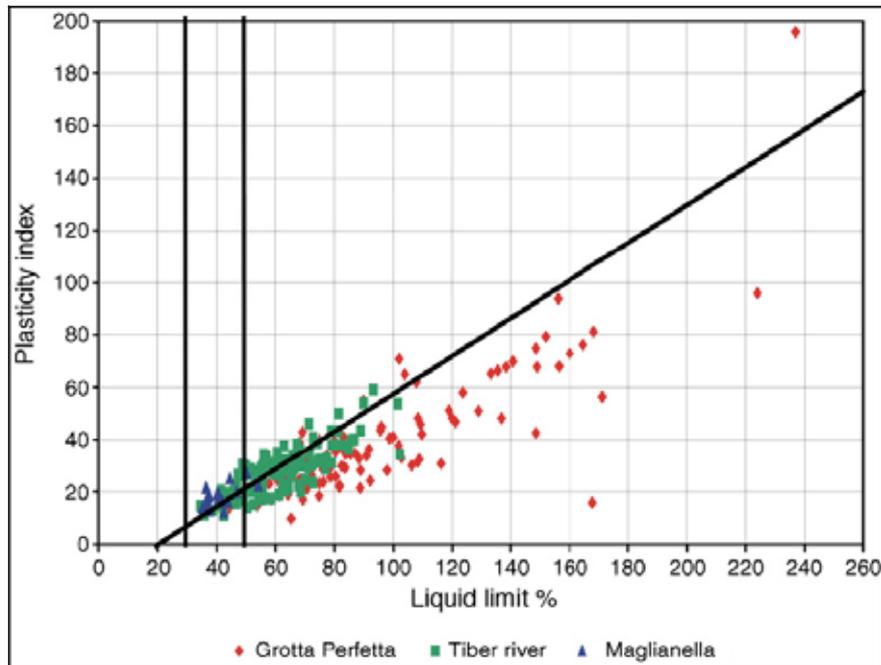


Figura 41 - Confronto tra gli indici di plasticità e limite liquido dei depositi alluvionali del Fiume Tevere, del Torrente di destra Maglianella e di sinistra Grotta Perfetta (da Campolunghi et alii, 2007).

In Figura 42 Campolunghi et alii (2007) mettono in evidenza l'alta deformabilità dei depositi del tributario di sinistra Grotta Perfetta, comparata con i valori di deformabilità del Tevere e dell'affluente di destra Maglianella.

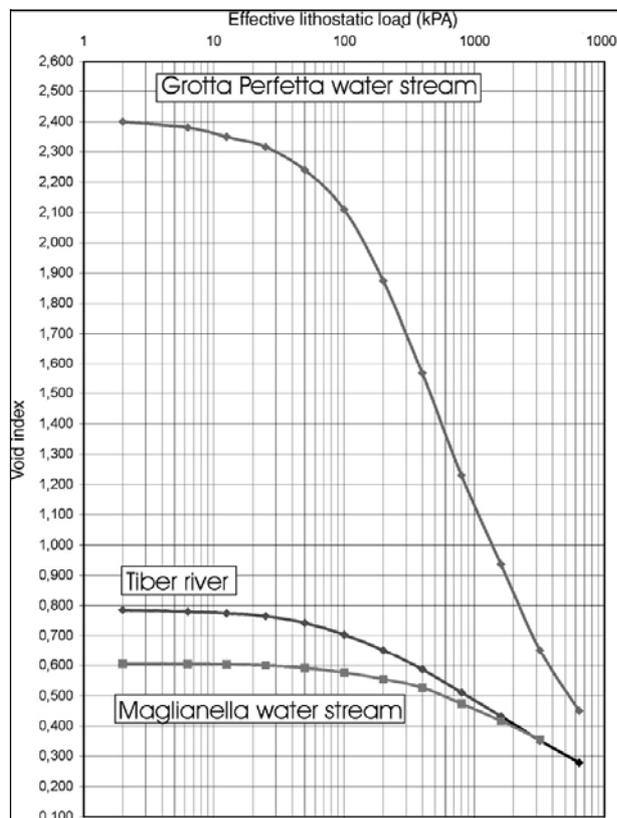


Figura 42 - Confronto tra i grafici edometrici del Fiume Tevere e di due affluenti di destra (Maglianella) e di sinistra (Grotta perfetta) (da Campolunghi et alii, 2007).

In conclusione le analisi condotte da Campolunghi et alii (2007) hanno mostrato che i depositi dei tributari di destra del Tevere risultano mediamente grossolani, mancano quasi completamente di materia organica e presentano parametri geotecnici tipici di depositi normalmente consolidati con deformabilità media. Al contrario i depositi degli affluenti di sinistra sono principalmente costituiti da silt ed argille, sedimenti derivanti dall'alterazione di minerali contenuti nei depositi vulcanici del distretto dei Colli Albani e sono ricchi di sostanza organica che conferisce caratteri geotecnici di alta deformabilità come suggerito da Malkawi et alii (1999).

### Dati satellitari

Nell'area test di Roma sono stati analizzati dati PS derivanti dall'elaborazione di immagini ERS1/2 e RADARSAT acquisite in orbita ascendente e discendente e, per il satellite RADARSAT, con 2 diverse modalità di acquisizione, *Standard Beam (S3)* e *Fine Beam (F3)*.

In particolare i 2 *dataset* ERS1/2 sono costituiti da 65 immagini acquisite lungo orbite discendenti nel periodo compreso tra il 21 aprile 1992 ed il 29 dicembre 2000 e 33 immagini acquisite lungo orbite ascendenti nel periodo compreso tra il 28 Aprile 1993 ed l'11 Novembre 2000. L'analisi PS di tutti i *datasets* ERS1/2 ha consentito di ottenere una densità di punti di misura sull'intera area elaborata di circa 70 PS/km<sup>2</sup> per il *dataset* discendente e di circa 33 PS/km<sup>2</sup> per il *dataset* ascendente. La presenza di ampie zone vegetate al di fuori del centro urbano di Roma determina una diminuzione dei valori di densità dei PS, che vengono calcolati sull'intera area elaborata. Inoltre la differenza dei valori di densità dei PS tra il *dataset* ascendente e quello discendente è dovuta al fatto che il numero delle scene acquisite in orbita ascendente corrisponde circa alla metà rispetto a quelle acquisite in orbita discendente.

I dati PS RADARSAT sono costituiti da 3 *datasets*: due in modalità *F3* e uno in modalità *S3*. In modalità *F3* il satellite RADARSAT acquisisce immagini con una maggiore risoluzione al suolo rispetto alla *S3* (Range x Azimut di 8.4 x 8.4 m invece che 26.6 x 27.0 m) e con un maggiore range dell'angolo di incidenza (41.5 – 44.0 gradi invece che 31.0 – 37.0). Il primo *dataset* di immagini è stato acquisito in modalità *F3* e copre l'area del centro urbano di Roma e del distretto vulcanico dei Colli Albani. E' costituito da 53 scene acquisite lungo orbite ascendenti tra il 7 Marzo 2003 e il 14 Giugno 2007 con una densità media di 277 PS/km<sup>2</sup>. Il secondo *dataset* di immagini è stato acquisito in modalità *S3* e copre l'intera area oggetto di indagine (Figura 7). Il *dataset* è costituito da un'analisi SPSA di 49 scene acquisite in orbite discendenti tra il 15 Marzo 2003 e l'11 Novembre 2006, con una densità media di 70 PS/km<sup>2</sup>. Il satellite RADARSAT non ha acquisito immagini in modalità *F3* nell'area del delta del Tevere, per cui è stata richiesta un'elaborazione delle immagini acquisite in modalità *S3*, in quanto nell'area sono stati individuati forti tassi di subsidenza e l'analisi dei dati PS ha consentito valutare il processo in atto.

Nell'area del fosso di Grottaperfetta e del fosso della Cecchignola, affluenti in riva sinistra del Tevere, è stata richiesta un'analisi APSA delle immagini acquisite in modalità *F3*, al fine di caratterizzare al meglio i dissesti osservati. Data la limitata estensione dell'area di interesse (16 km<sup>2</sup>), è stato possibile estrarre il massimo del contenuto informativo con serie temporali molto dettagliate ed un'elevata densità di PS (1.742 PS/km<sup>2</sup>).

In Tabella 5 sono riassunti i *dataset* PS analizzati nell'area test di Roma.

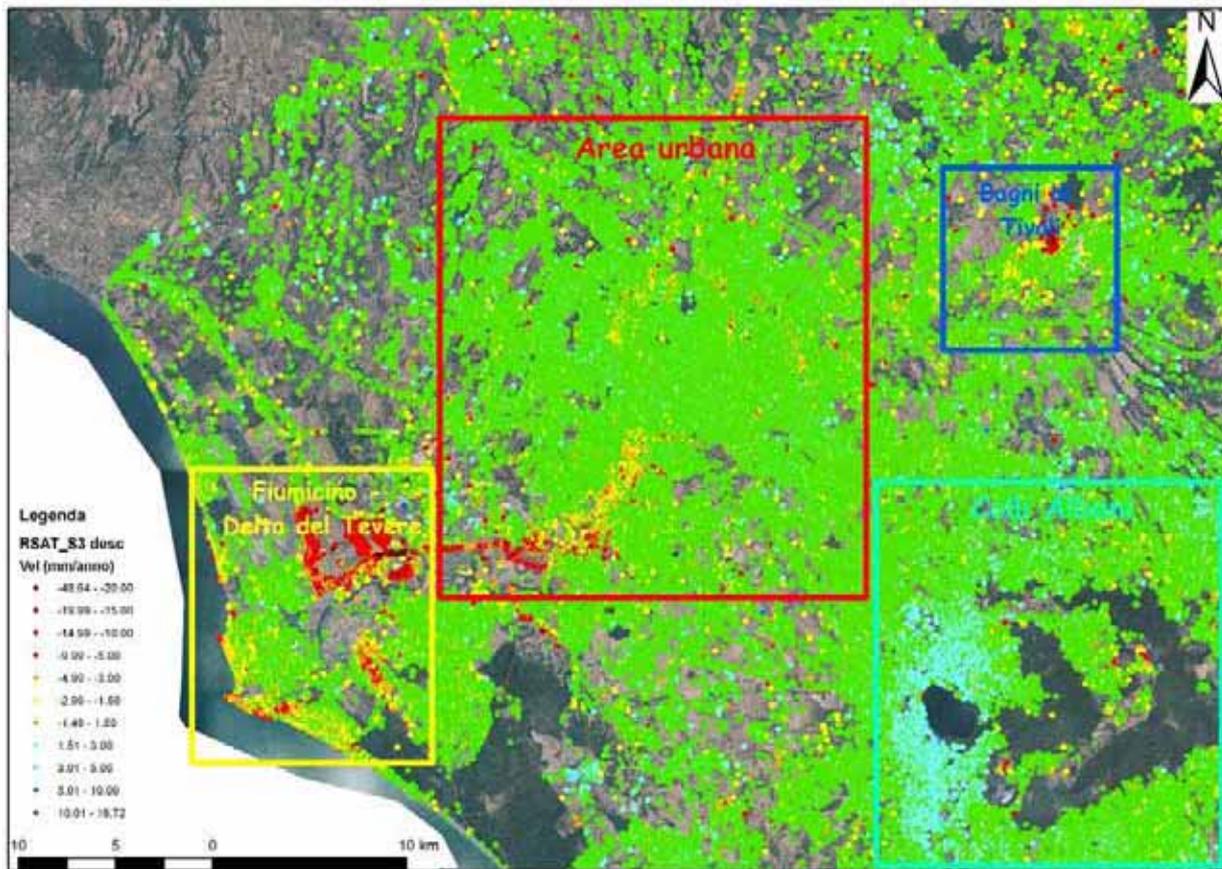
Satellite	Orbita	Elaborazione	Numero scene	Range temporale	Densità (PS/km <sup>2</sup> )
ERS1/2	desc	SPSA	65	21/04/1992 – 29/12/2000	70
ERS1/2	asc	SPSA	33	28/04/1993 – 11/11/2000	33
RADARSAT ( <i>Fine Beam F3</i> )	asc	SPSA	53	07/03/2003 – 14/06/2007	277
RADARSAT ( <i>Standard Beam S3</i> )	desc	SPSA	49	15/03/2003 – 11/11/2006	70
RADARSAT ( <i>Fine Beam F3</i> )	asc	APSA	55	07/03/2003 – 14/06/2007	1.742

**Tabella 5 - Dataset PS analizzati nell'area test di Roma. Da notare le diverse densità di PS/km<sup>2</sup> in funzione del satellite, del numero delle immagini e della tecnica di elaborazione.**

### Analisi dei dati satellitari

In base alle deformazioni superficiali osservate dai dati satellitari su area vasta è stato possibile suddividere l'intera area oggetto di indagine nel presente rapporto in 4 zone (Figura 43):

1. l'area urbana della città di **Roma**, caratterizzata da fenomeni di subsidenza dovuti alla compattazione dei sedimenti alluvionali del Tevere e dei suoi affluenti e a recenti opere di urbanizzazione;
2. l'area di **Fiumicino** e del **delta del Tevere**, dove si verificano fenomeni di subsidenza legati alle caratteristiche litologiche e geotecniche dei depositi di ambiente deltizio;
3. l'area dei **Bagni di Tivoli**, interessata da deformazioni correlate alle caratteristiche geologiche dell'area ed alle massime variazioni del livello di falda;
4. l'area del distretto vulcanico dei **Colli Albani**, dove si osservano le maggiori deformazioni nella zona dell'edificio vulcanico principale legate a movimenti per processi legati al vulcanismo e ristrette aree in subsidenza legate al pompaggio di acqua.



**Figura 43 – Individuazione su area vasta delle aree soggette a deformazione superficiale sulla base dei dati PS.**

Viene di seguito presentata l’analisi dei dati satellitari su area vasta delle deformazioni superficiali che interessano l’area dei depositi alluvionali del Tevere e dei suoi affluenti nell’area urbana di Roma.

#### Periodo 1992 – 2000 (dati ERS1/2)

Dalla distribuzione dei PS ERS1/2 è possibile osservare come tutti i depositi alluvionali del Pleistocene Superiore-Olocene del Tevere e di alcuni affluenti siano caratterizzati da deformazioni in allontanamento rispetto al satellite, indicati dal segno negativo delle velocità (Figura 44).

Dall’interpolazione dei valori delle velocità medie del *dataset* discendente con l’algoritmo IDW è possibile rappresentare le deformazioni misurate tramite una mappa di velocità (Figura 45). In particolare si possono fare le seguenti osservazioni:

1. i depositi alluvionali degli affluenti in sinistra del Tevere, contrariamente a quelli in destra, mostrano velocità negative rilevanti. I valori massimi (velocità maggiori di 10 mm/anno in valore assoluto) si riscontrano nella zona dell’E.U.R., in corrispondenza dello sbocco dei fossi “Tre Fontane” e “Acquacetosa” nel Tevere;
2. le velocità aumentano in valore assoluto procedendo verso la foce del Tevere; in particolare le velocità raggiungono valori al di sopra dei 10 mm/anno nella zona della “Muratella-Magliana”, tra Ponte Galeria e l’E.U.R., sulla riva destra del corso del fiume;
3. nel centro storico di Roma non si registrano rilevanti deformazioni e le velocità rientrano nell’intervallo assunto come “stabile” (tra +1.5 e -1.5 mm/anno).

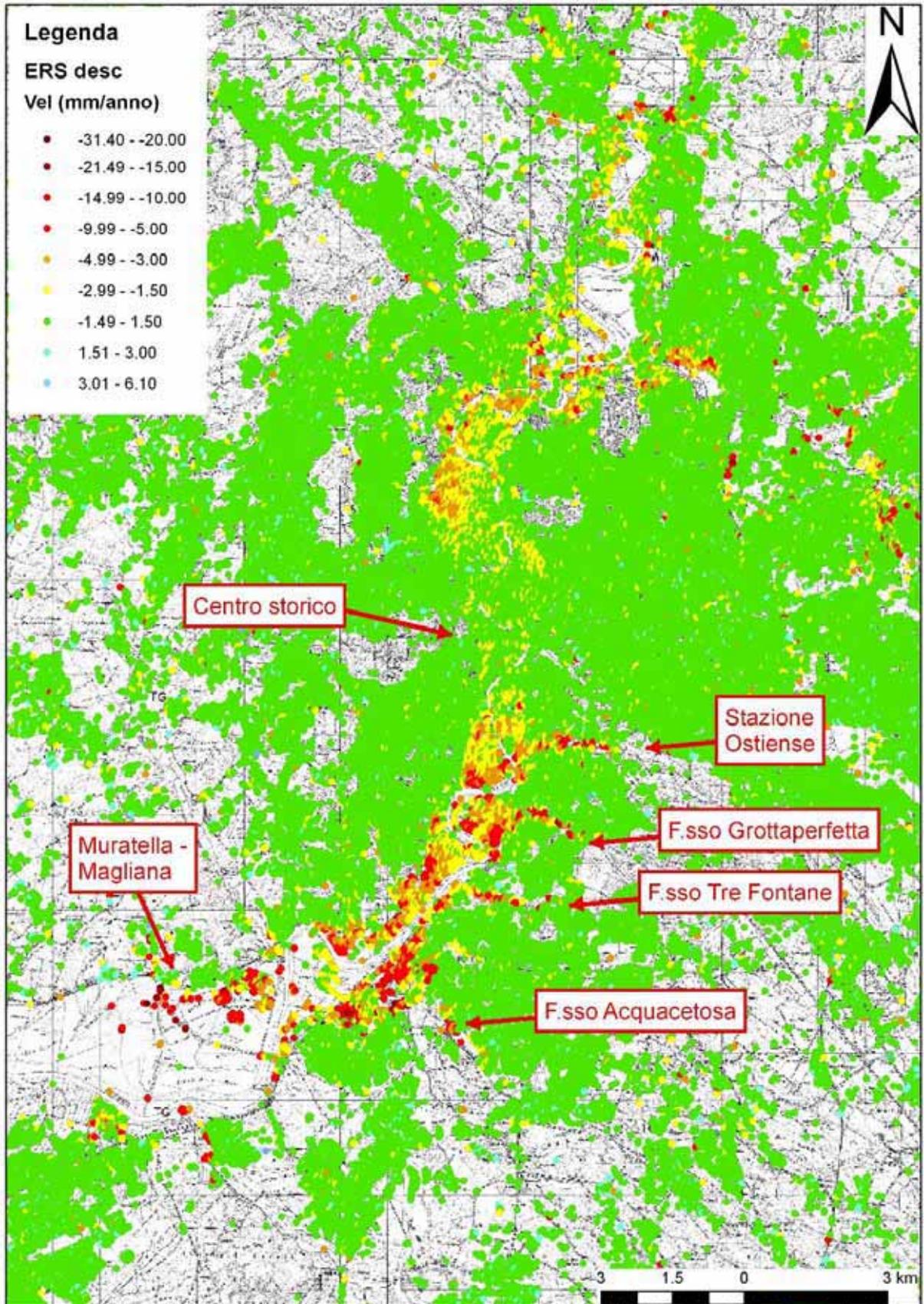


Figura 44: Distribuzione dei PS ERS discendenti nell'area dei depositi alluvionali del Tevere e dei suoi affluenti. Sono individuate le aree con deformazioni in allontanamento rispetto al satellite.

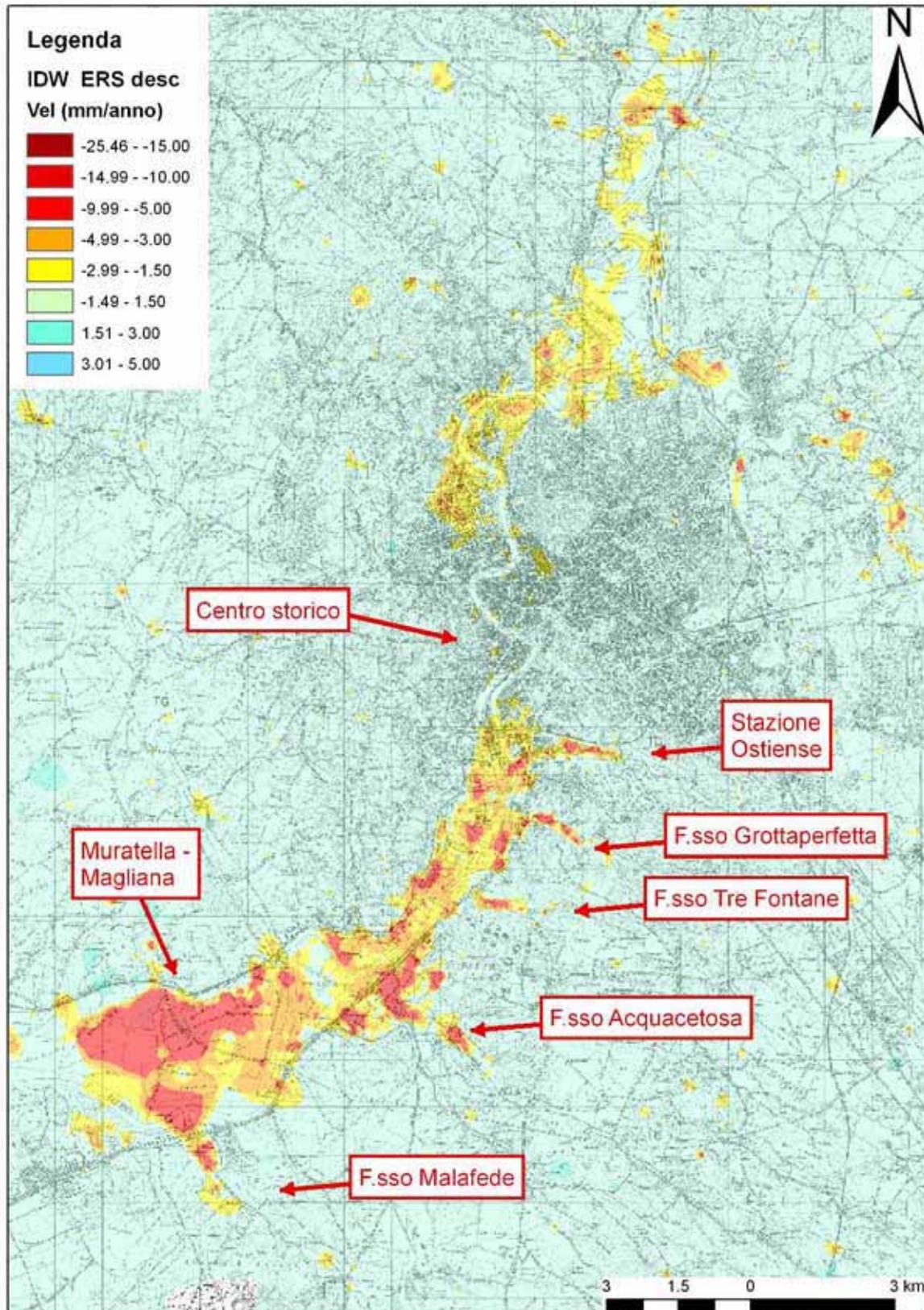


Figura 45: Mappa di velocità ottenuta dall'interpolazione IDW dei dati PS ERS1/2 nell'area dei depositi alluvionali del Tevere e dei suoi affluenti.

Periodo 2003 - 2007 (dati RADARSAT)

Dalla distribuzione dei PS ascendenti (Figura 46) e dalla mappa delle velocità ottenuta interpolando il *dataset* discendente si vede come, nel periodo di acquisizione del satellite RADARSAT, si individuano le stesse area soggette a deformazione superficiale individuate nel periodo monitorato dai satelliti ERS1/2 (Figura 47).

Queste aree presentano velocità con valori negativi sia nel *dataset* ascendente che discendente, inoltre la topografia pianeggiante e le caratteristiche dei dissesti sono compatibili con movimenti a prevalente componente verticale.

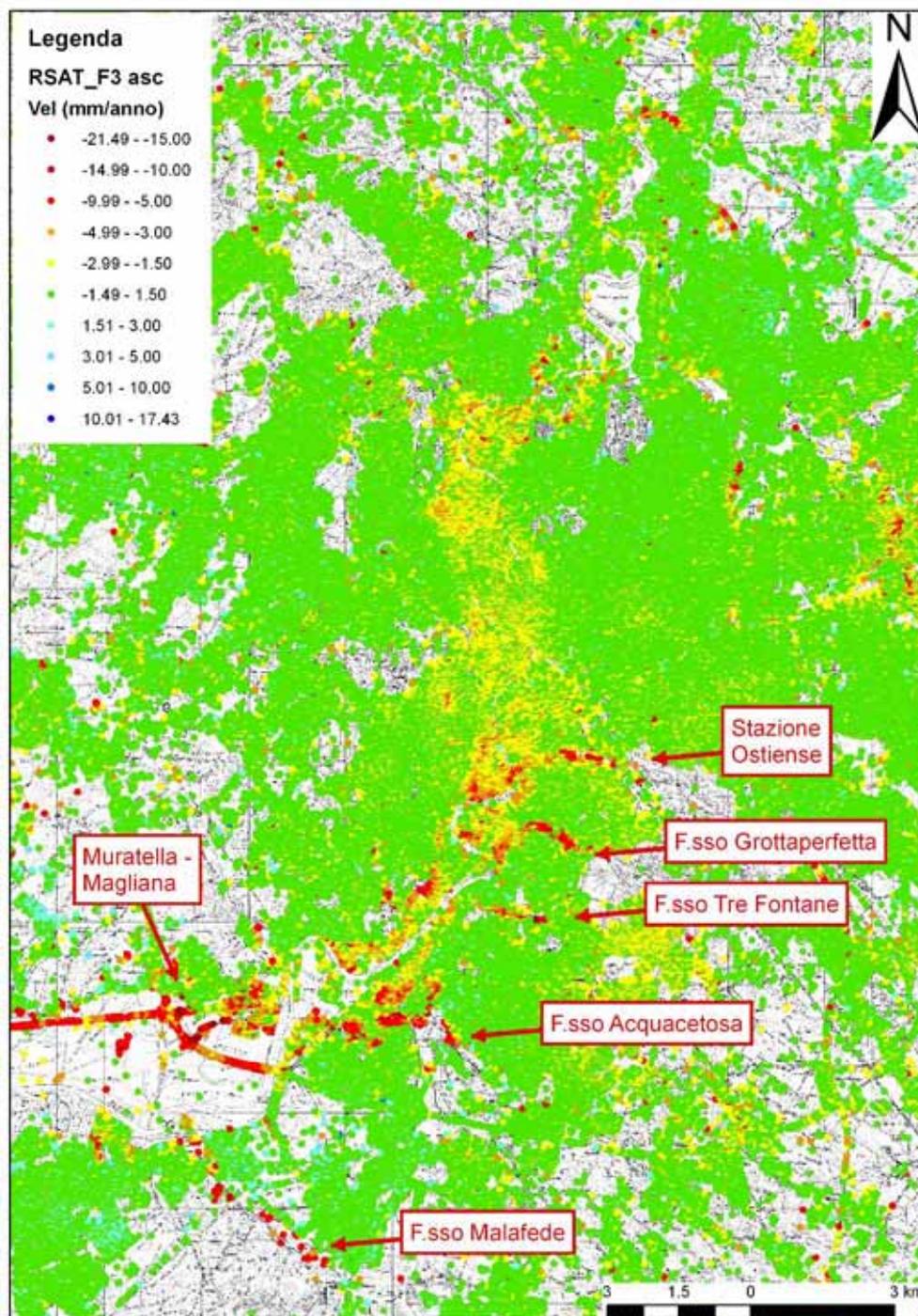
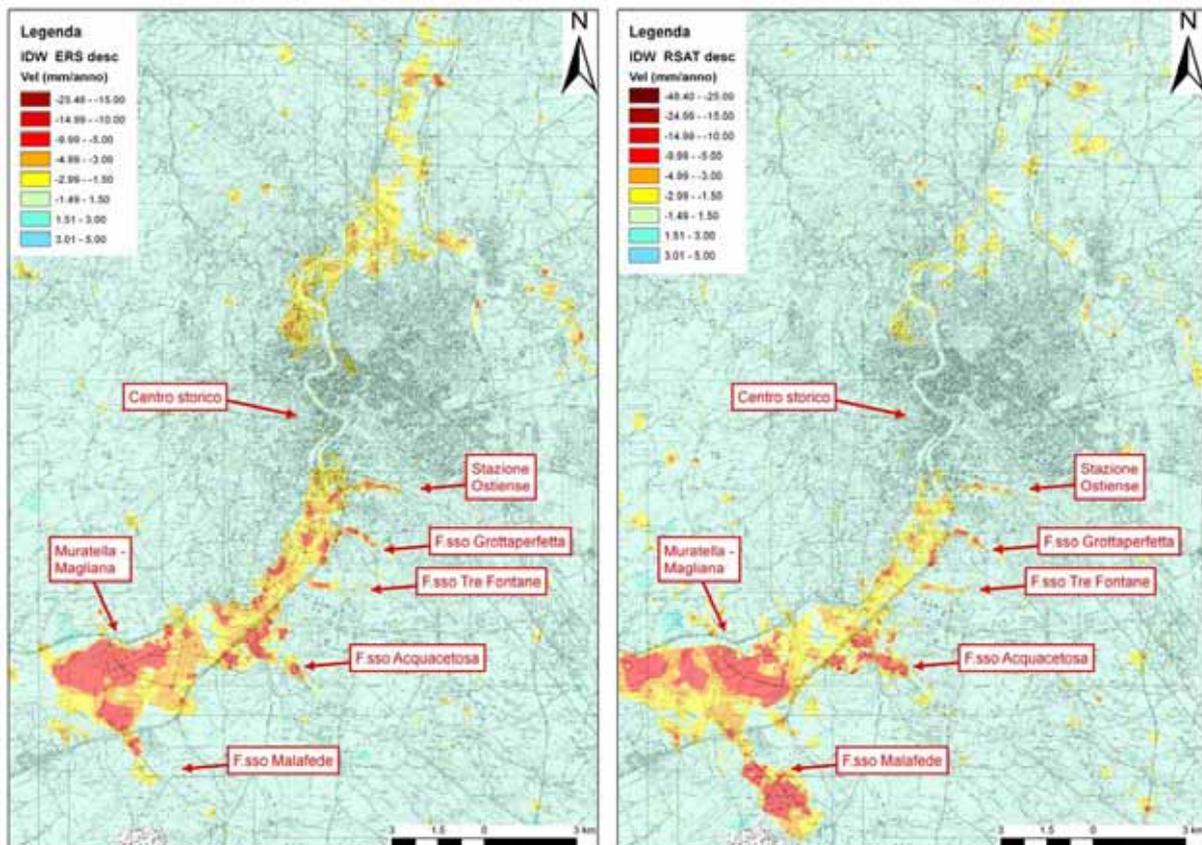


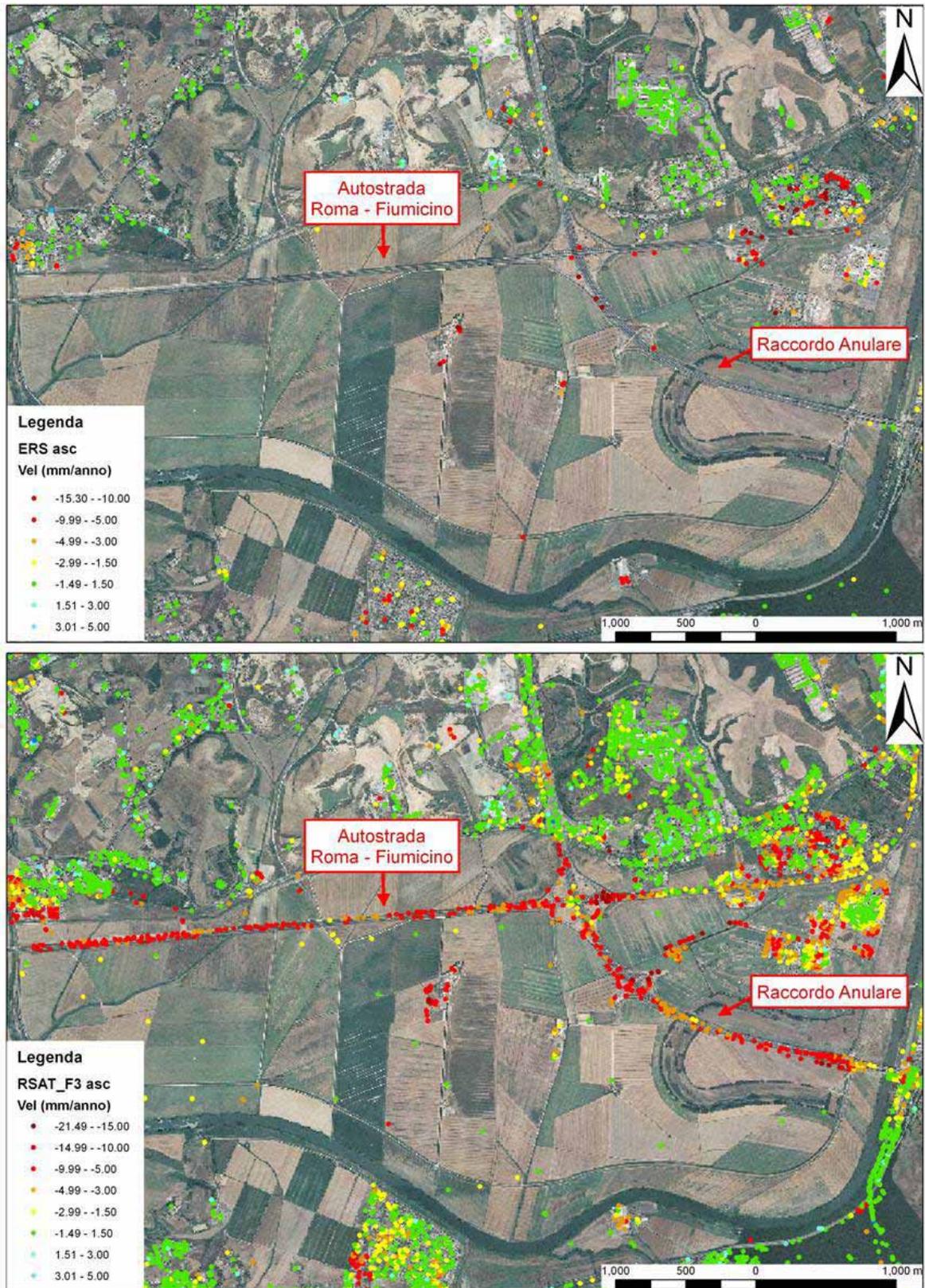
Figura 46: Distribuzione dei PS RADARSAT-F3 ascendenti nell'area dei depositi alluvionali del Tevere e dei suoi affluenti. Sono individuate le aree con deformazioni in allontanamento rispetto al satellite.

Dal confronto tra le mappe delle velocità ottenute dall'interpolazione dei PS discendenti nei due intervalli di tempo monitorati, è inoltre possibile individuare nuove aree soggette a deformazioni con spostamenti in allontanamento rispetto al satellite. In particolare, procedendo verso la foce del Tevere, si nota come si è ampliata l'area soggetta a subsidenza nella zona Muratella – Magliana, e come nella zona di Malafede i dissesti si sono approfonditi lungo il corso del fosso. Nella valutazione della variazione nel tempo delle velocità di spostamento si deve introdurre ulteriormente una sottostima dell'entità delle deformazioni all'interno del *dataset* RADARSAT. Questa sottostima è dovuta al fatto che l'angolo di incidenza del satellite RADARSAT durante l'acquisizione in modalità S3 è maggiore di quello del satellite ERS (43.0° rispetto a 23°) ed è quindi "meno sensibile" ai movimenti verticali.



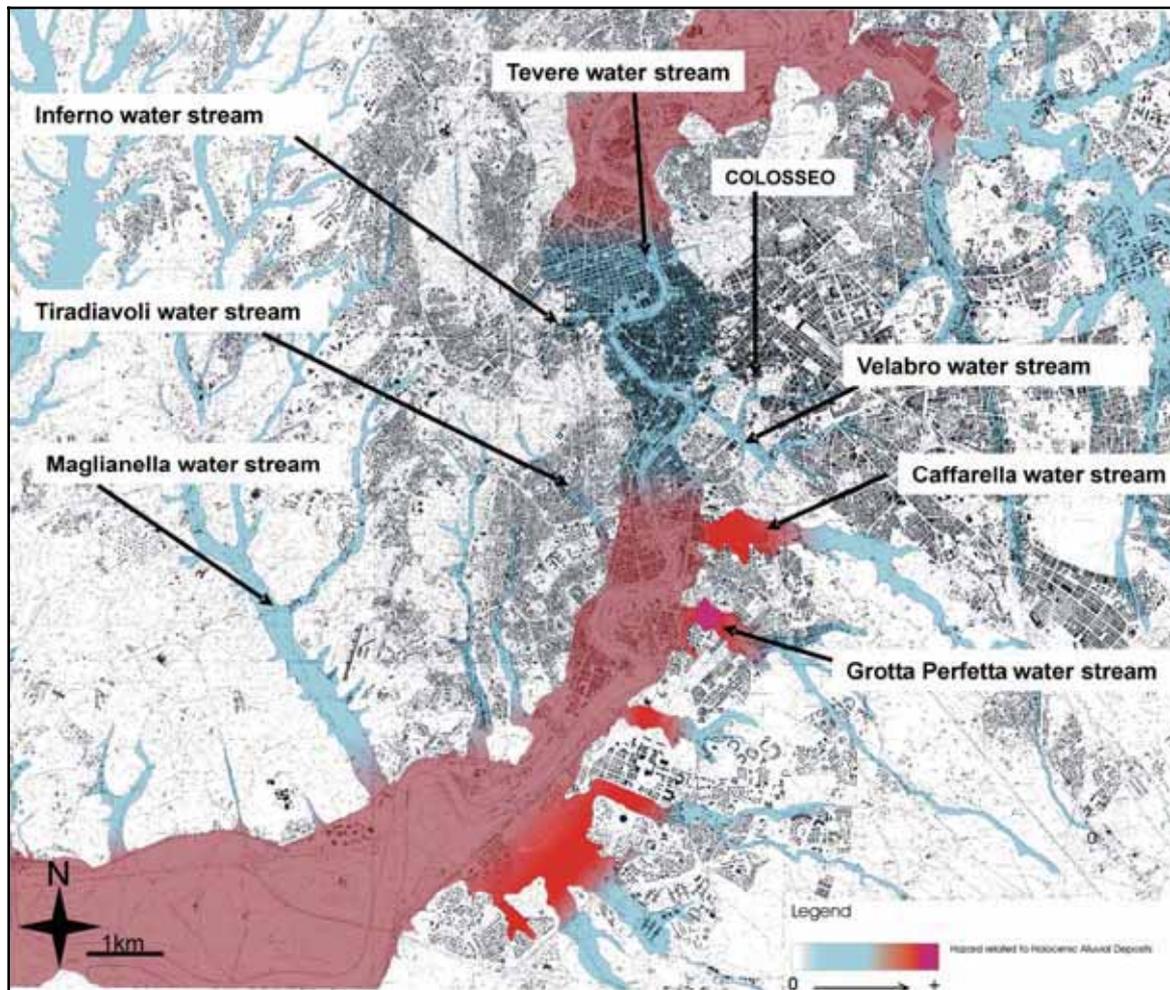
**Figura 47:** Confronto tra le mappe di velocità ottenute dall'interpolazione IDW dei *datasets* ERS1/2 e RADARSAT-S3 discendenti. Nei 2 intervalli di acquisizione si individuano nel centro urbano le stesse aree interessate da deformazioni. Verso la foce del Tevere aree di recente urbanizzazione sono soggette a subsidenza.

Le cause dell'aumento delle aree affette da subsidenza sono da ricercare nelle recenti urbanizzazioni avvenute nella zona. Difatti, tutte le recenti opere antropiche costruite su terreni alluvionali sono soggette a subsidenza per compattazione dei sedimenti. Un esempio è l'autostrada Roma – Fiumicino che ha subito dei lavori di ampliamento terminati nel 2000. Questi lavori hanno fatto sì che lungo tutto il tracciato siano presenti bersagli radar che fungono da PS (Figura 48).



**Figura 48:** Distribuzione dei PS ERS1/2 e RADARSAT ascendenti su ortofoto del 2000. Si vede come i lavori per l’ampliamento dell’autostrada “Roma – Fiumicino” terminati nel 2000 hanno determinato la presenza di bersagli radar lungo tutto il tracciato.

Dalla distribuzione spaziale delle deformazioni in allontanamento rispetto al sensore mostrate dai dati satellitari per i depositi alluvionali del Tevere e dei suoi affluenti di sinistra, è possibile correlare tali spostamenti all'alta deformabilità di questi depositi, in accordo con Campolunghi et al., 2007. Nel loro lavoro presentano una carta della propensione alla deformabilità dei depositi alluvionali, riportata in Figura 49.



**Figura 49 - Zonazione del pericolo di instabilità associata ai depositi alluvionali nell'area di Roma proposta da Campolunghi et al., 2007.**

In conclusione, per quanto riguarda l'aumento delle velocità in abbassamento rispetto al satellite delle alluvioni del Tevere procedendo verso la foce, si possono fare tre ipotesi: i) aumento dello spessore dei depositi; ii) variazioni litologiche dovute al passaggio laterale da depositi più grossolani di ambiente continentale a depositi più fini e più ricchi di sostanza organica di ambiente palustre-lacustre e costiero; iii) processo urbanistico molto recente e conseguenti velocità di consolidazione più elevate; iv) variazioni piezometriche.

L'analisi in quest'area dei dati RADARSAT, che coprono il periodo 2003 - 2007, ha mostrato che la combinazione della distribuzione spaziale dei depositi alluvionali e le opere di urbanizzazione sono la principale causa dell'aumento delle aree in deformazione nel tempo. La disponibilità di dati geotecnici e idrogeologici consentirebbe un'analisi quantitativa del decorso dei cedimenti nel tempo ed una zonazione più accurata della propensione al dissesto in area urbana.

Infine, dal confronto tra la mappa del pericolo per instabilità nelle aree alluvionali delle città di Roma fornita da Campolunghi et alii (2007) e la mappa delle velocità di spostamento ricavata

dall'interpolazione dei dati PS ERS1/2 (Figura 50) è possibile effettuare le seguenti considerazioni: oltre ad una generale miglior accuratezza relativa alle aree urbanizzate fornita dai dati satellitari, si osserva in particolare che:

1. i dati PS mostrano con un'elevata accuratezza spaziale, data dall'elevata densità di bersagli radar in area urbana, le aree soggette a subsidenza;
2. i dati PS confermano l'elevata pericolosità associata alla subsidenza dei depositi alluvionali degli affluenti in riva sinistra del Tevere, in particolare del Fosso di Grotta Perfetta;
3. la carta della pericolosità sottovaluta i fenomeni di subsidenza nel tratto finale del corso del Tevere, in zona Muratella – Magliana, e sopravvaluta quelli nel tratto a monte del centro storico;
4. la carta delle aree a rischio non mostra l'elevata subsidenza osservata dai dati satellitari nell'area a SE dell'E.U.R., alla confluenza del Torrente Vallerano con il Fiume Tevere,
5. dalla distribuzione dei dati PS si osserva un'area in subsidenza nel settore N del centro storico (Quartiere Prati) che non è stata evidenziata come area ad elevata propensione al dissesto da Campolunghi et al., 2007. I dissesti individuati da un'analisi su area vasta verranno caratterizzati a scala locale nella sezione 5.3.1.

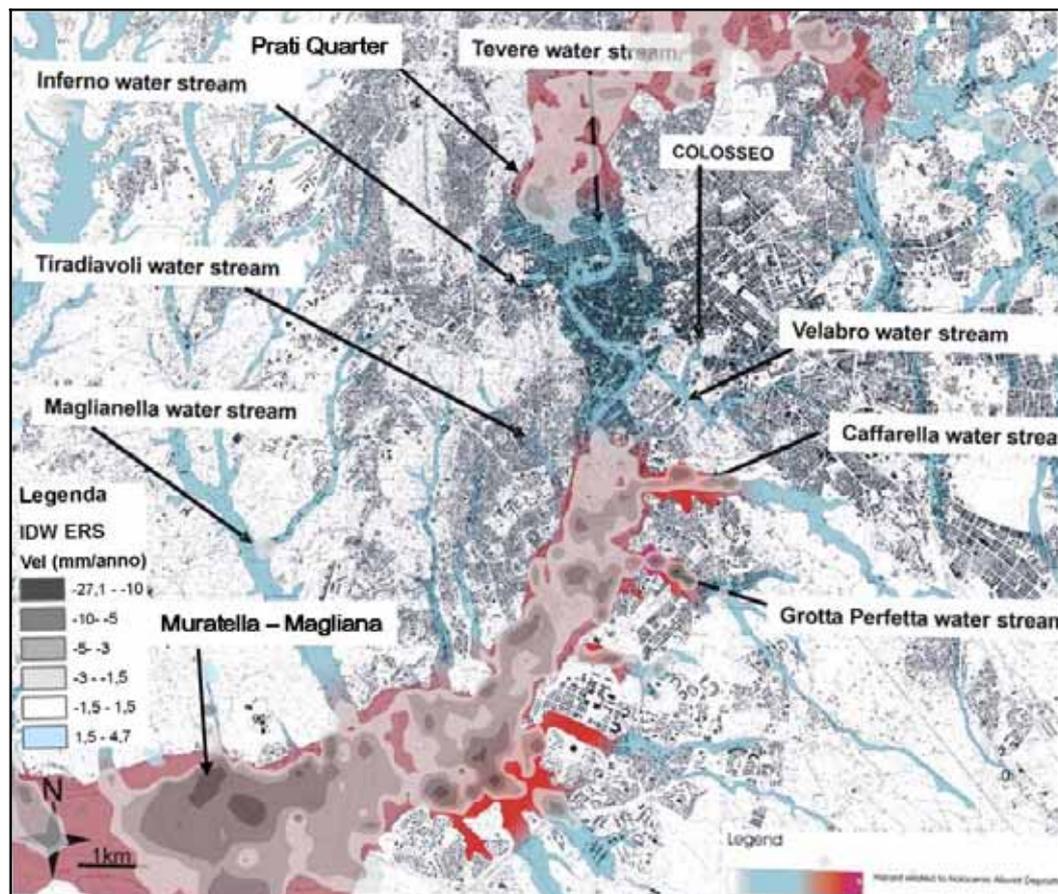


Figura 50 - Confronto tra l'algoritmo IDW dei PS ERS1/2 discendenti e la carta delle aree di pericolosità proposta da Campolunghi et al., 2007.

### 5.2.2.2 Napoli

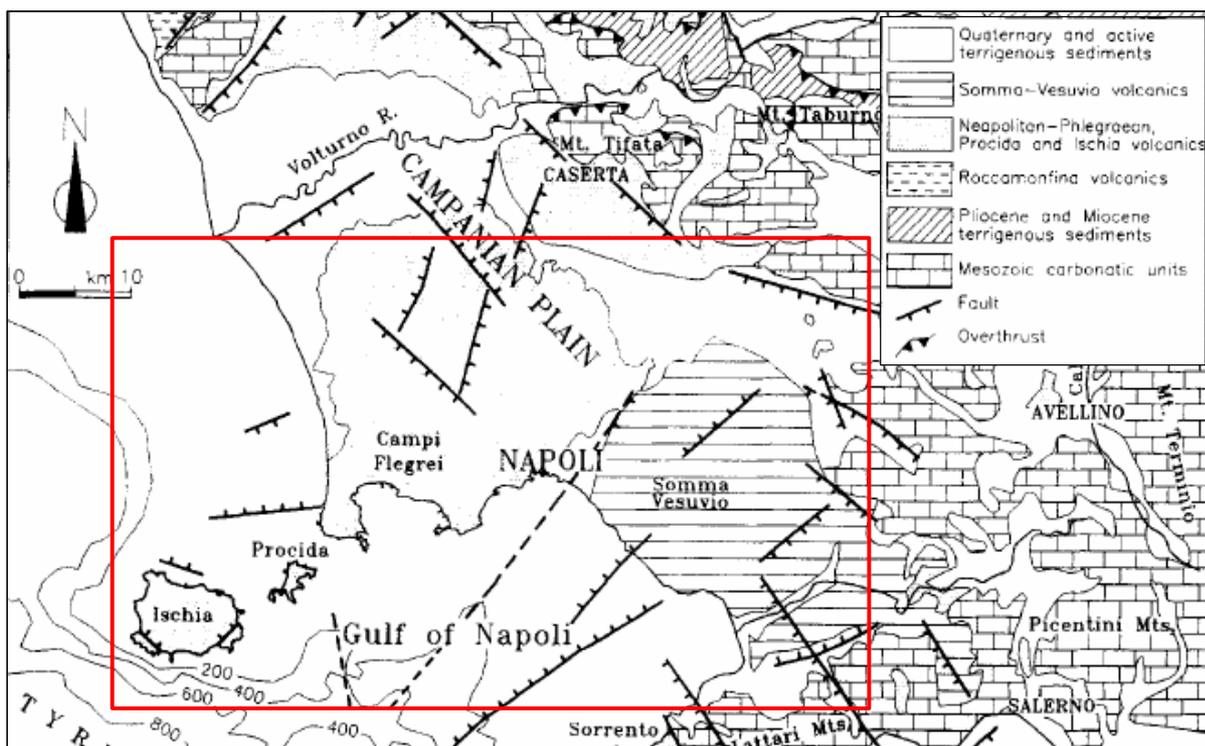
L'analisi dei dati PS ERS1/2 e RADARSAT condotta su area vasta nell'area urbana di Napoli ha permesso l'individuazione e la mappatura di zone interessate da deformazioni superficiali legate ad ampliamenti delle infrastrutture di superficie e di sottosuolo.

In particolare, l'analisi dei dati satellitari nel periodo 1992-2000 ha evidenziato un'estesa area in subsidenza localizzata in corrispondenza del tracciato sotterraneo della Linea 1 della metropolitana, nel tratto tra le stazioni "Montedonzelli"- "Salvator Rosa". I dati satellitari tra il 2003 e il 2007 hanno mostrato un decremento delle velocità lungo il precedente tratto, ma presentano un'area in subsidenza nella zona circostante gli scavi per la realizzazione della stazione Garibaldi lungo il prolungamento del tracciato della Linea 1.

#### Inquadramento geologico

La piana campana è una depressione strutturale, ampia circa 2000 km<sup>2</sup>, di età Plio-Pleistocenica, localizzata tra il settore orientale del Mar Tirreno e la catena Sud-Appenninica (Figura 51). E' limitata a NO, NE e SE dalla piattaforma carbonatica Mesozoica e a SO dalla costa Tirrenica. È riempita da depositi alluvionali e vulcanici per uno spessore massimo di 5 km (Ippolito et al., 1973).

L'attuale struttura del margine Campano consegue dall'evoluzione geodinamica neogenica del sistema Appennino meridionale-Mar Tirreno. La sua genesi infatti è correlata ai complessi eventi tettonici che hanno accompagnato l'apertura del Mar Tirreno e la rotazione antioraria della penisola con conseguente assottigliamento del suo bordo occidentale (Scandone, 1979).



**Figura 51: Carta geologica schematica dei dintorni della Piana Campana (da Orsi et al., 1996, modificata). Nel riquadro l'area su cui sono stati analizzati i dati PS.**

I carbonati mesozoici-cenozoici, affetti da sovrascorrimenti verso E durante il Miocene, affiorano attualmente ai bordi della Piana Campana (Figura 51) (Monte Massiccio, Montagne di Caserta, Penisola Sorrentina e Capri) e, durante il Quaternario, sono stati interessati da un'intensa attività tettonica estensionale, correlata all'attività del bacino tirrenico di retroarco (Turco et al., 2006), che ha portato alla formazione della Piana Campana stessa.

Il margine continentale campano presenta le tipiche caratteristiche di una zona di rift: numerose faglie normali (Milia & Torrente, 1997), crosta continentale assottigliata (Ferrucci et al., 1989), alti valori di

flusso di calore (Della Vedova et al., 2001), vulcani quaternari, grandi volumi di eruzioni ignimbritiche e bacini estensionali (Piana campana e Baia di Napoli) riempiti da successioni quaternarie clastiche e vulcaniche spesse più di 5.000 m (Ippolito et al., 1973; Mariani e Prato, 1988; Milia, 1999).

Quest'area include tre complessi vulcanici attivi:

1. L'apparato Somma-Vesuvio, situato ad E di Napoli, la cui ultima eruzione è datata al 1944; attualmente è caratterizzato da una fase quiescente con ridotte deformazioni del suolo e bassa attività sismica.
2. Il distretto vulcanico dei Campi Flegrei, situato ad Ovest di Napoli, la cui ultima eruzione è del 1538; attualmente è caratterizzato da lenti e continui movimenti del suolo, fenomeno conosciuto col termine "bradisismo".
3. L'isola di Ischia, situata ad Ovest del Golfo di Napoli, la cui ultima eruzione è del 1302. Attualmente è caratterizzata da fenomeni di subsidenza e da una sostanziale assenza di sismicità.

L'area di Napoli, oggetto di studio della presente tesi, è ubicata nella parte centro-occidentale della grande depressione tettonica della Piana Campana (Figura 51) e presenta una morfologia molto articolata (Figura 52), risultato di diversi eventi vulcanici, prodotti sia dal sistema dei Campi Flegrei che dal Somma-Vesuvio, di eventi vulcanico-tettonici e di fasi di ingressione marina.

In particolare, il territorio del Comune di Napoli è occupato in gran parte dalla "caldera complessa dei Campi Flegrei" (Figura 53; Orsi et al., 1996). Quest'ultima è stata prodotta da due collassi principali, legati alle eruzioni dell'Ignimbrite Campana (37.000 anni) e del Tufo Giallo Napoletano (12.000 anni).

Molti degli Autori che hanno ricostruito la successione dei depositi dell'area napoletana (Di Girolamo et al., 1984, Rosi & Sbrana, 1987; Bellocci, 1994; Orsi et al., 1996) hanno basato le loro ricostruzioni stratigrafiche sui depositi di queste due eruzioni, anche in virtù della loro ampia distribuzione areale e continuità laterale.



Le unità litostratigrafiche affioranti nell'area in esame sono le seguenti (dalla più vecchia alla più giovane):

- **Depositi vulcanici Pre-Ignimbrite Campana**

Questi depositi, esposti lungo le scarpate che bordano la caldera dei Campi Flegrei, includono diverse unità laviche e piroclastiche corrispondenti ad almeno undici eruzioni esplosive e due effusioni laviche, con spessore variabile da pochi decimetri ad alcuni metri, intercalate a paleosuoli.

- **Ignimbrite Campana (37.000 a.)**

E' il deposito piroclastico a più ampia distribuzione areale della Campania. Ha coperto infatti un'area di circa 30.000 km<sup>2</sup>, con un volume di magma eruttato di circa 150km<sup>3</sup> (Fisher et al., 1993; Civetta et al., 1997). L'età dell'Ignimbrite Campana, ottenuta con i metodi 40Ar/39Ar e 14C, è di circa 37.000 anni B.P.(Deino et al.,1994).

I depositi dell'eruzione dell'Ignimbrite Campana sono costituiti principalmente da piroclastiti da caduta ad ampia distribuzione areale, sormontate da almeno tre depositi da flusso piroclastico a diversa composizione chimica e distribuzione areale.

L'area collassata è stata recentemente ridefinita da Orsi et al. (1996) ed include la depressione dei Campi Flegrei, la baia di Pozzuoli, la parte nordoccidentale della baia di Napoli e la parte della città di Napoli a sud dell'allineamento Camaldoli-Poggioreale (Figura 54).

- **Depositi vulcanici e marini compresi tra l'Ignimbrite Campana ed il Tufo Giallo Napoletano**

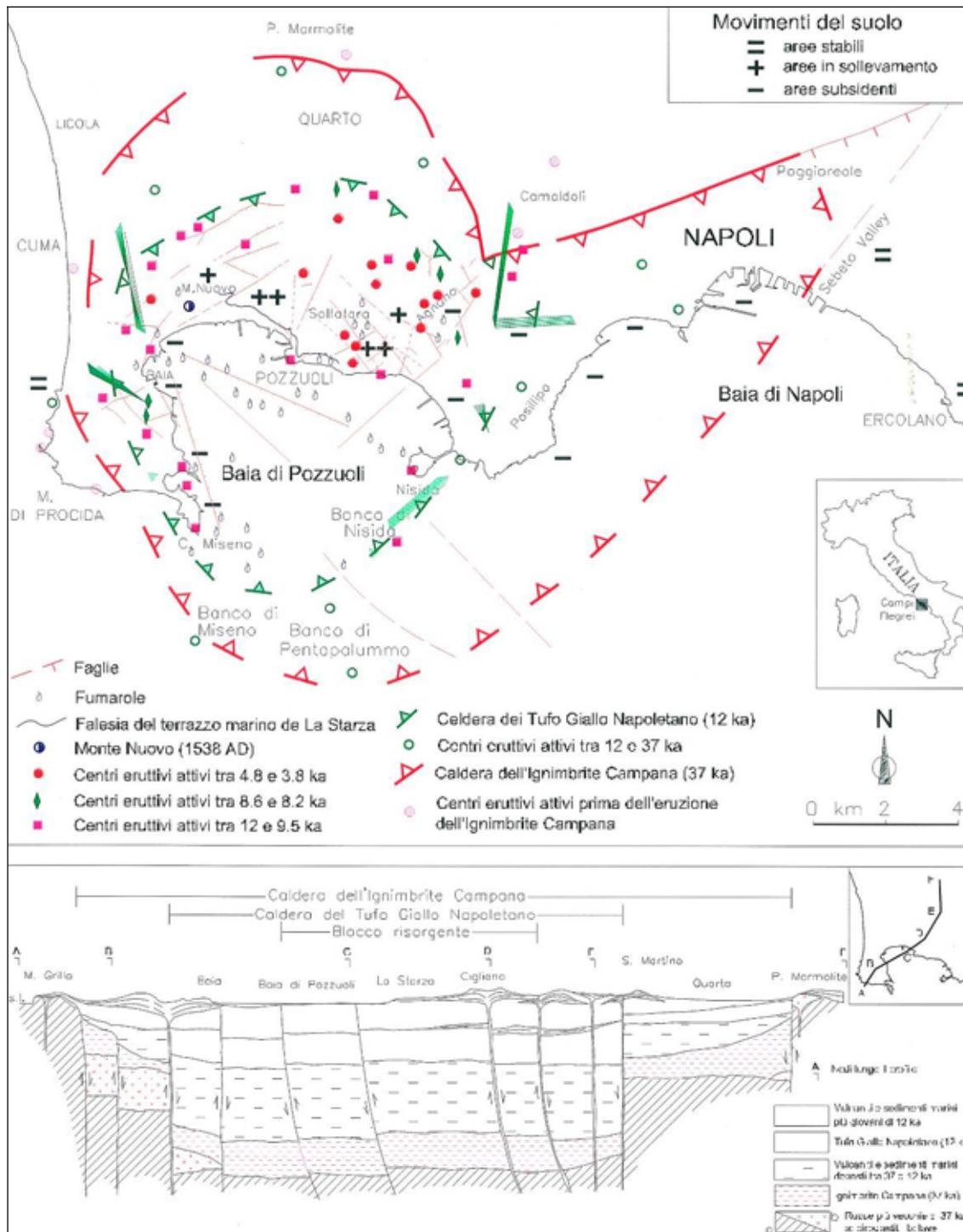
Dopo l'eruzione dell'Ignimbrite Campana l'attività vulcanica si è concentrata all'interno della relativa caldera. In questo periodo il vulcanismo ha generato edifici e depositi vulcanici che affiorano alla periferia della parte continentale dell'area napoletana-flegrea e che costituiscono i banchi sommersi nella Baia di Pozzuoli. Le rocce esposte hanno caratteri riconducibili ad eruzioni esplosive, a carattere freatomagmatico. Sono costituite da una sequenza di livelli di ceneri, pomici e scorie da caduta, intercalati da paleosuoli di modesto spessore.

Sedimenti marini e transizionali o palustri sono stati perforati nella Valle del Sebeto (Bellucci et al., 1994) e lungo la fascia costiera tra Chiaia e la periferia orientale della città (Orsi et al., 1996).

- **Tufo Giallo Napoletano (12.000 a.)**

L'eruzione del Tufo Giallo napoletano, la seconda per magnitudo dell'area campana, ha avuto carattere da freatopliniano a freatomagmatico ed è stata caratterizzata da una complessa storia evolutiva (Orsi et al., 1995; Wohletz et al., 1995). Il volume di magma eruttato è stato di circa 40 km<sup>3</sup>. L'eruzione del Tufo Giallo Napoletano, avvenuta all'interno della caldera dell'Ignimbrite Campana, ha determinato la formazione di una nuova "caldera complessa dei campi Flegrei" (Orsi et al., 1996) il cui margine morfologico è attualmente rappresentato solamente dal versante occidentale della collina di Posillipo (Figura 54).

Il Tufo Giallo Napoletano è costituito da un deposito generalmente zeolitizzato e di colore giallo nell'area prossimale napoletano-flegrea, mentre è scarsamente o non litificato e di colore grigio nelle aree medio-distali. In particolare, l'intera sequenza è stata suddivisa in due membri sulla base delle caratteristiche tessiturali, della dispersione e della composizione chimica. Il limite tra questi due membri è generalmente ben definito da un netto cambiamento delle caratteristiche tessiturali e/o da una discordanza angolare.



**Figura 54: Caldere dell’Ignimbrite Campana e del Tufo Giallo Napoletano – distribuzione dei centri eruttivi nei vari periodi e della deformazione del suolo a lungo termine (modificati da Orsi et al., 1996 e Di Vito et al., 1999).**

- **Depositi vulcanici e marini-transizionali più giovani di 12.000 a.**

I depositi più giovani del Tufo Giallo napoletano costituiscono la maggioranza delle rocce affioranti nella città di Napoli. Essi costituiscono in prevalenza il prodotto di eruzioni avvenute all’interno della caldera del Tufo Giallo Napoletano e solo di due eruzioni del Somma-Vesuvio.

I depositi più antichi del Somma-Vesuvio sono stati rinvenuti solo in perforazione e sono costituiti da tufi zeolitizzati correlati da Orsi et al. (1996) con l’eruzione di Mercato, datata ad 8.000 anni B.P.. I depositi dell’ultima eruzione affiorano invece in gran parte del territorio

comunale a tetto delle sequenze di rocce flegree di questo periodo e sono stati riferiti all'eruzione di Avellino (3.700 anni B.P)(Orsi et al., 1996; Di Vito et al., 1999).

Intercalati ai depositi vulcanici nella Valle di Sebeto e nelle piane di Fuorigrotta e Bagnoli sono presenti sedimenti alluvionali, transizionali, palustri e marini (Bellucci et al., 1994; Orsi et al., 1996; Di Vito et al., 1999), di cui non è stato possibile reperire bibliografia riguardante studi stratigrafici di dettaglio.

### Dati satellitari

Nell'area test di Napoli sono stati analizzati su area vasta i dati PS derivanti dall'elaborazione con tecnica PSInSAR di immagini ERS1/2 discendenti e RADARSAT ascendente con modalità di acquisizione *Fine Beam (F3)*.

Per l'analisi sono state utilizzate due diversi *dataset* di PS ERS1/2 con SPSA (Tabella 6). Il primo *dataset*, centrato su Pozzuoli, copre l'area tra la piana del Volturno e la città di Napoli, ed è costituito da 81 immagini acquisite lungo orbite discendenti nel periodo compreso tra l'8 Giugno 1992 e l'11 Gennaio 2001 ed ha una densità media di circa 230 PS/km<sup>2</sup>. Il secondo, centrato sul Vesuvio, è costituito da 72 immagini acquisite lungo orbite discendenti tra il 24 Giugno 1992 ed il 23 Dicembre 2000 ed ha una densità di 232 PS km<sup>2</sup>.

Il *dataset* di PS RADARSAT è costituito da un'analisi SPSA di 53 scene acquisite lungo orbite ascendenti tra il 7 Aprile 2003 ed il 17 Marzo 2007, con una densità media di 793 PS/km<sup>2</sup>.

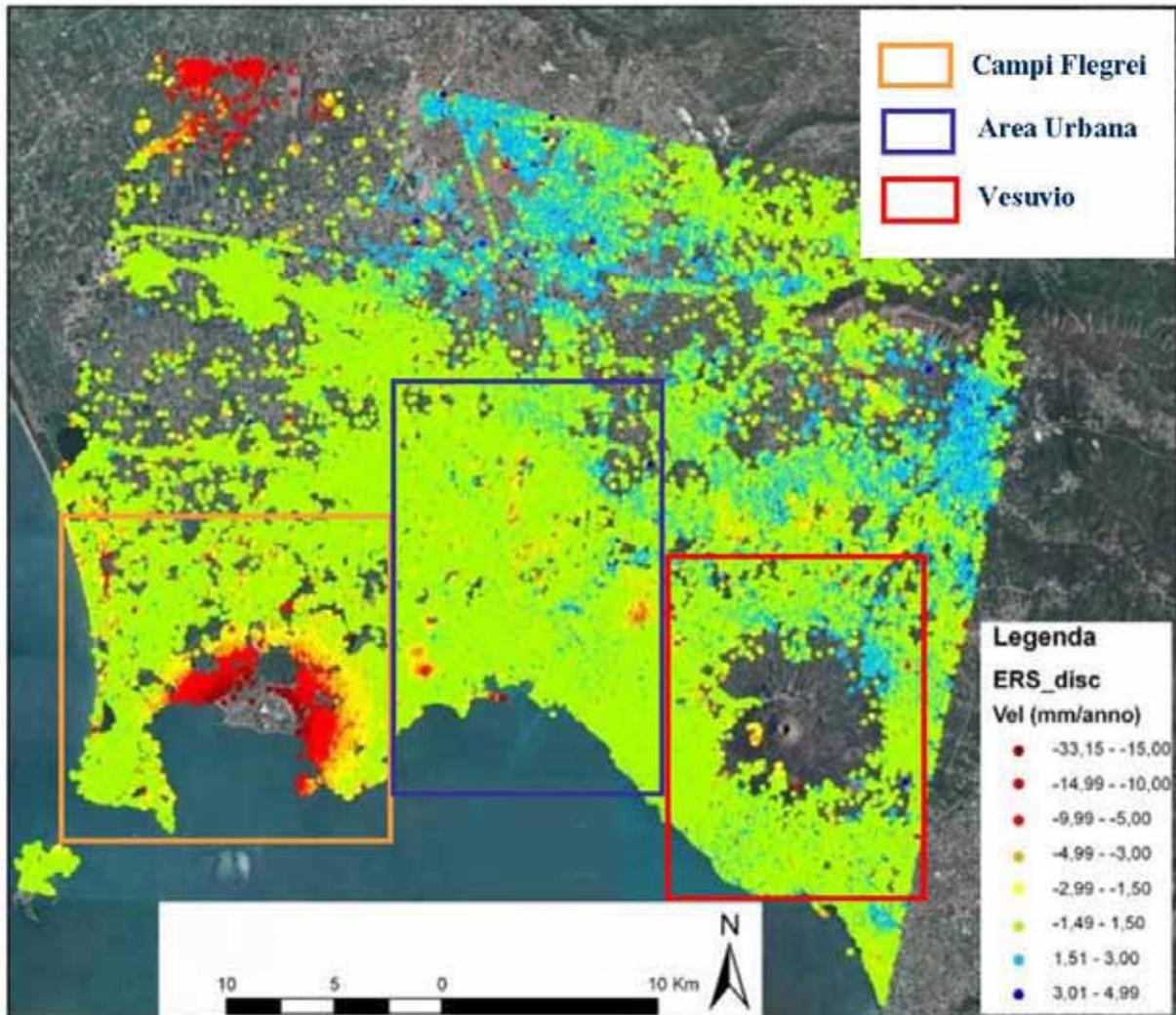
Satellite	Orbita	Elaborazione	Numero scene	Range temporale	Densità (PS/km <sup>2</sup> )
ERS1/2 (Pozzuoli)	disc	SPSA	81	08/06/1992- 11/01/2001	230
ERS1/2 (Vesuvio)	disc	SPSA	72	24/06/1992- 23/12/2000	232
RADARSAT <i>F3</i>	asc	SPSA	53	07/04/2003- 17/03/2007	793

**Tabella 6 - Sintesi dei dati satellitari ERS1/2 elaborati per il sito campione di Napoli.**

### Analisi dei dati satellitari

L'analisi dei dati satellitari è stata organizzata suddividendo l'area d'indagine in quattro zone (Figura 55 -):

1. l'area dei **Campi Flegrei**, interessata principalmente da deformazioni legate al fenomeno del bradisismo;
2. l'area intensamente urbanizzata di **Napoli** e dei comuni limitrofi, dove prevalgono dissesti correlati alla presenza di cavità antropiche ed a fenomeni di urbanizzazione;
3. l'area del **Vesuvio**, dove prevalgono fenomeni gravitativi nella parte alta dell'edificio vulcanico e fenomeni di subsidenza al raccordo con le piane circostanti.

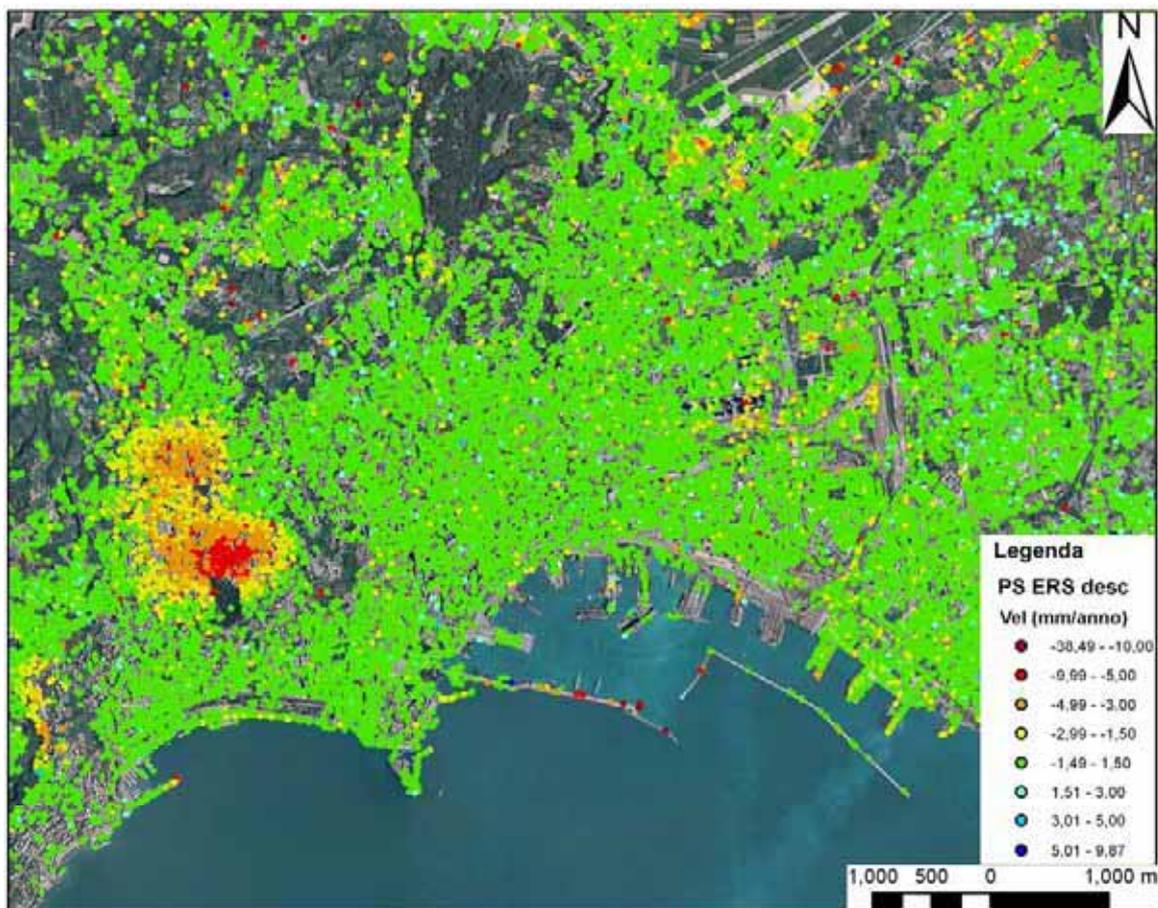


**Figura 55 - Suddivisione delle aree d'indagine nel settore di Napoli.**

In questa tesi vengono presentati i risultati derivanti dall'analisi dei dati PS nell'area urbana di Napoli, che è interessata da dissesti che possono essere riscontrati in modo diffuso in una qualsiasi altra area intensamente urbanizzata. Le deformazioni associate a geoprocessi legati ai complessi vulcanici sono infatti peculiari di questa città per cui difficilmente esportabili in altri contesti urbani.

In particolare, dalla distribuzione dei PS ERS1/2 nell'area urbana di Napoli è possibile individuare un'estesa zona soggetta a deformazioni superficiali (Figura 56). Dal confronto con i dati ancillari e bibliografici raccolti è possibile ricondurre tali deformazioni alla risposta superficiale degli scavi per la Linea 1 della metropolitana.

I dati satellitari disponibili coprono infatti gli intervalli temporali 1992-2001 (ERS1/2) e 2003-2007 (RADARSAT), periodi in cui si sono svolti gli scavi per il prolungamento della Linea 1 della metropolitana; dall'analisi dei dati PS è stato pertanto possibile delimitare l'estensione dell'area urbana in cui sono state registrate deformazioni e seguirne l'evoluzione nei 13 anni di acquisizione dati.



**Figura 56 – Distribuzione dei PS ERS1/2 discendenti nell’area urbana di Napoli. E’ possibile individuare un’area con spostamenti in allontanamento rispetto al satellite riconducibili agli scavi per la Linea 1 della metropolitana.**

La Linea 1 della metropolitana attualmente collega la zona di Piscinola, nel quadrante nord della città, con il centro di Napoli, passando per il Vomero (stazione Vanvitelli), terminando le corse nella stazione di P.za Dante (Figura 57). Quasi tutta la tratta si sviluppa in galleria, tranne il percorso Colli Aminei - Piscinola, che si snoda prevalentemente su viadotto. Il completamento della linea prevede, entro il 2011, la realizzazione di un anello ferroviario che collegherà la zona collinare, il centro storico, il Centro Direzionale e l’Aeroporto di Capodichino per una lunghezza totale di circa 30 km e 25 stazioni (Piano Comunale dei Trasporti – Scenario definitivo 2007-2011).

La cosiddetta “Tratta Bassa”, in quanto la quota media del tracciato si trova a -35 m s.l.m.([www.impregilo.it](http://www.impregilo.it)), è lunga circa 6 km e va dalla stazione Dante al Centro Direzionale ed include le stazioni di Toledo, Municipio, Università, Duomo e Garibaldi. La realizzazione di questa tratta ha implicato una pianificazione estremamente accurata per quanto riguarda la fase di progettazione ed un monitoraggio continuo in fase di realizzazione, vista l’intensa urbanizzazione dell’area, l’interazione con le infrastrutture esistenti e la presenza della falda lungo tutto il tracciato. Dal confronto tra i dati di monitoraggio e quelli satellitari è stato possibile valutare l’entità e l’estensione delle deformazioni causate dalla realizzazione dell’opera.

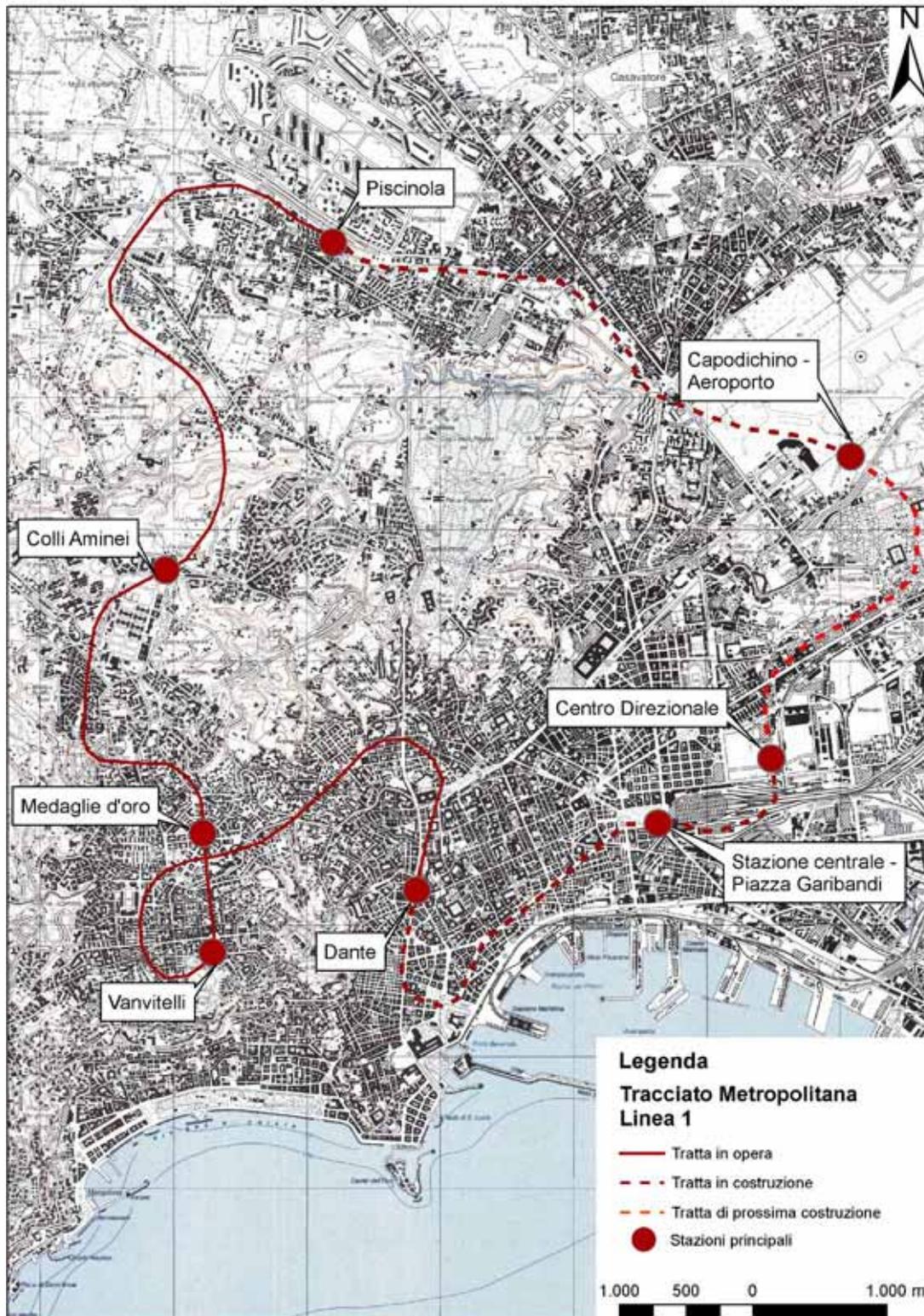


Figura 57: Tracciato della Linea 1 della metropolitana. La linea continua corrisponde alla tratta attualmente in opera, con la linea tratteggiata vengono identificate le tratte in costruzione. Queste ultime vengono ulteriormente suddivise nelle tratte attualmente in costruzione (linea tratteggiata rosso scuro) e quelle di prossima costruzione (linea tratteggiata rossa).

Periodo 1992 – 2001 (dati ERS1/2)

Dalla distribuzione dei PS ERS1/2 è possibile individuare un'area soggetta a subsidenza nel tratto della linea compreso tra le stazioni “Montedonzelli” e “Salvator Rosa” (Figura 58). In questo tratto, il

tracciato della linea metropolitana compie un anello che costringe a far circolare i convogli ad elevate profondità dal piano campagna, per superare il dislivello presente. Gli scavi di questa tratta sono avvenuti in sotterraneo, in un'area densamente urbanizzata, e le deformazioni superficiali associate alla realizzazione dell'opera hanno raggiunto velocità massime di 23 mm/anno.

Il 5 aprile 2001 la tratta è stata messa in opera, e la data ricade nell'intervallo di acquisizione delle immagini satellitari ERS1/2; dalle serie storiche dei dati PS ERS1/2 è stato perciò possibile analizzare l'evoluzione temporale delle deformazioni associate alla fase di scavo, mentre dalle serie temporali dei dati RADARSAT è stato possibile seguire l'evolversi delle stesse nella fase di post-scavo.

I dati puntuali dei PS ERS1/2 del *dataset* discendente sono stati interpolati tramite l'algoritmo *Inverse Distance Weighted* (IDW) al fine di rappresentare le deformazioni misurate tramite una mappa di velocità (Figura 59). Da tale mappa si osservano degli allontanamenti rispetto al satellite (indicati dal segno negativo delle velocità) che interessano l'area urbana situata a O rispetto al tratto in cui il tracciato della metropolitana compie il suddetto anello. L'area in cui sono state registrate le deformazioni presenta un'estensione di 1.8 km<sup>2</sup>. Dai dati bibliografici raccolti non è stato possibile ottenere né la quota della base della galleria, né i dati tecnici sulla fase di scavo che sarebbero risultati utili al fine di dare un'interpretazione della distribuzione spaziale delle deformazioni osservate.

La mancanza di dati ERS acquisiti in orbita anche ascendente non permette di effettuare un confronto con il *dataset* discendente, al fine di determinare le componenti reali del movimento, ma la topografia pianeggiante dell'area e le cause delle deformazioni suggeriscono un movimento a prevalente componente verticale.

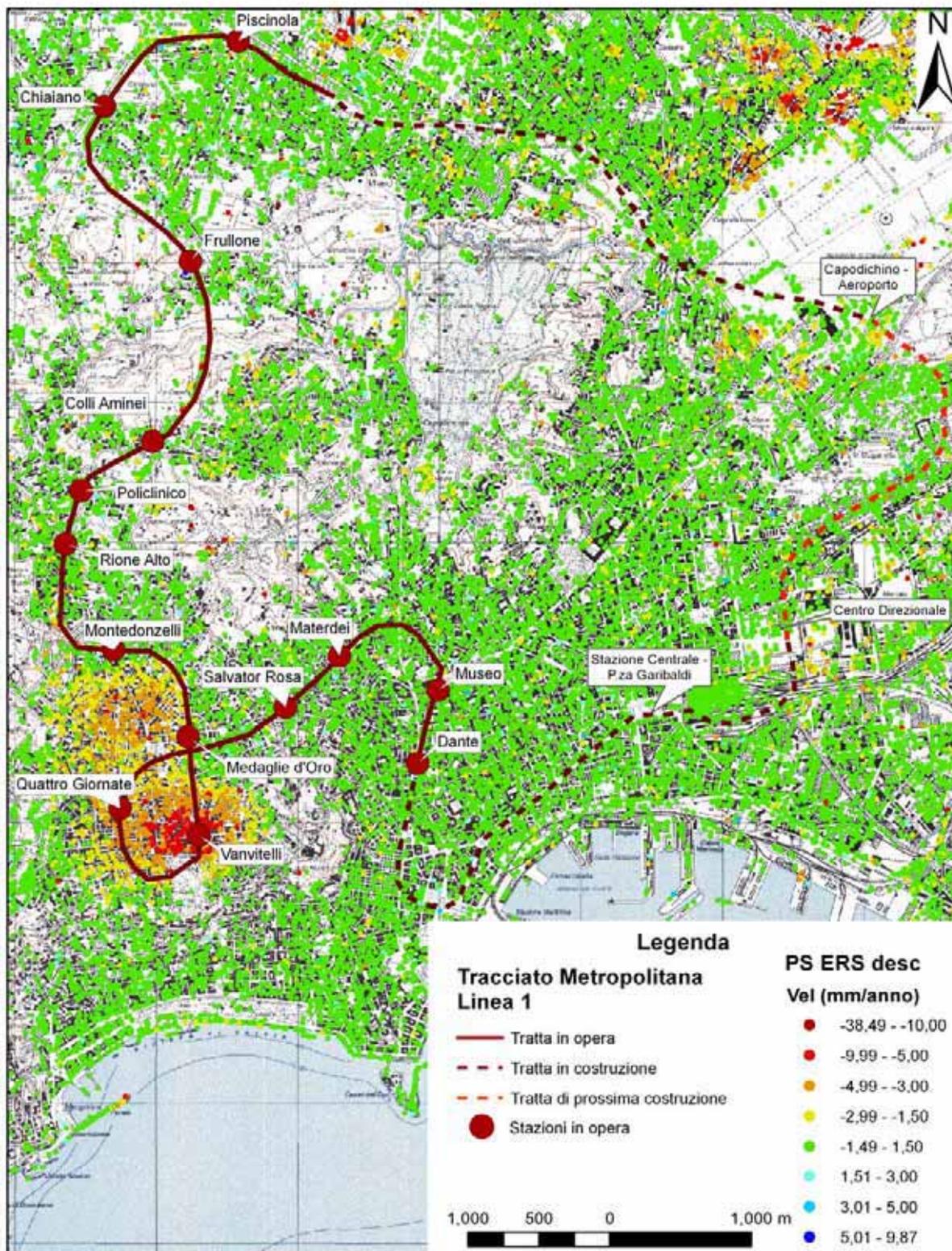


Figura 58: Distribuzione PS ERS discendenti nell'area interessata dal tracciato della Linea 1 della metropolitana.

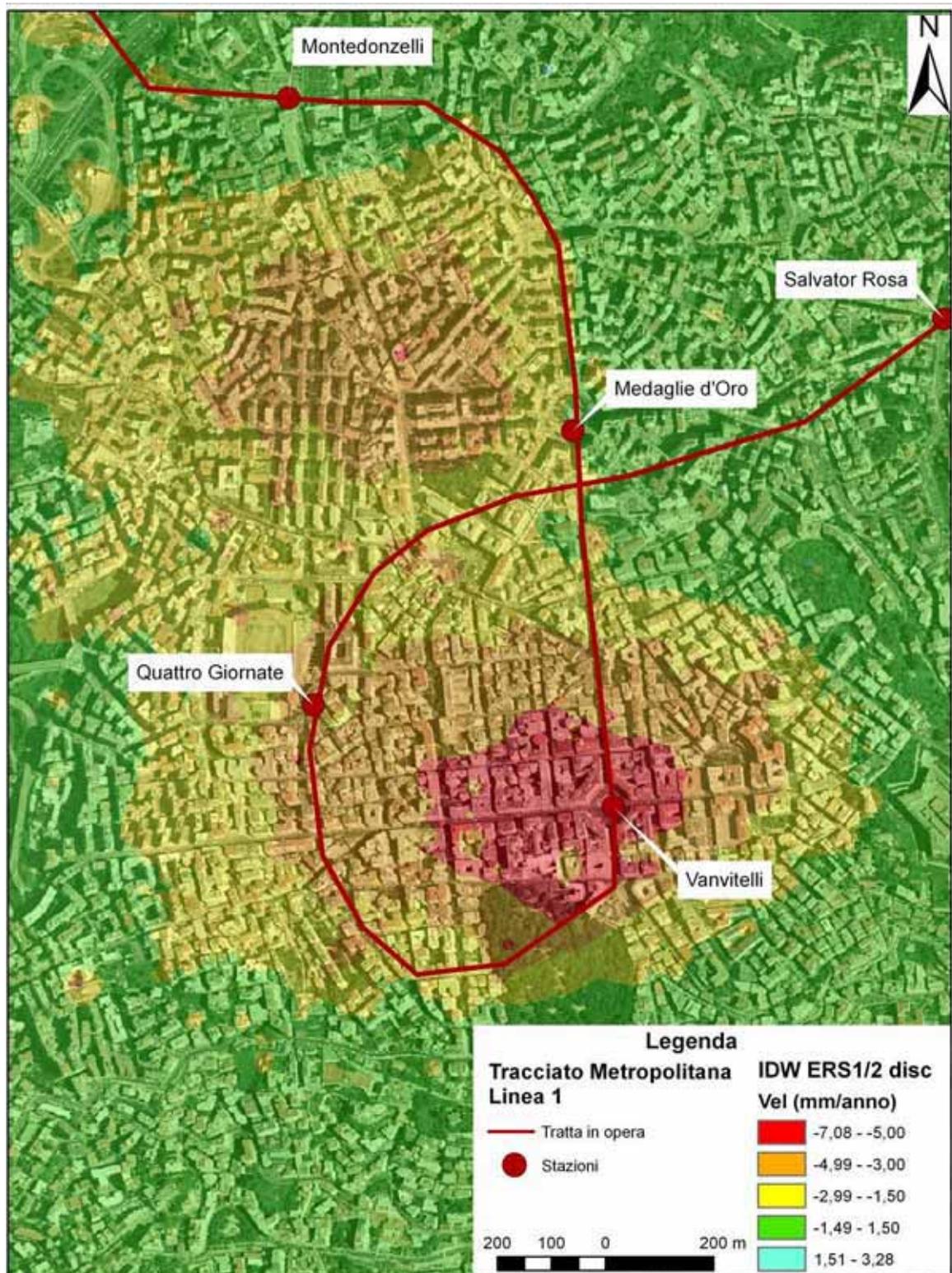
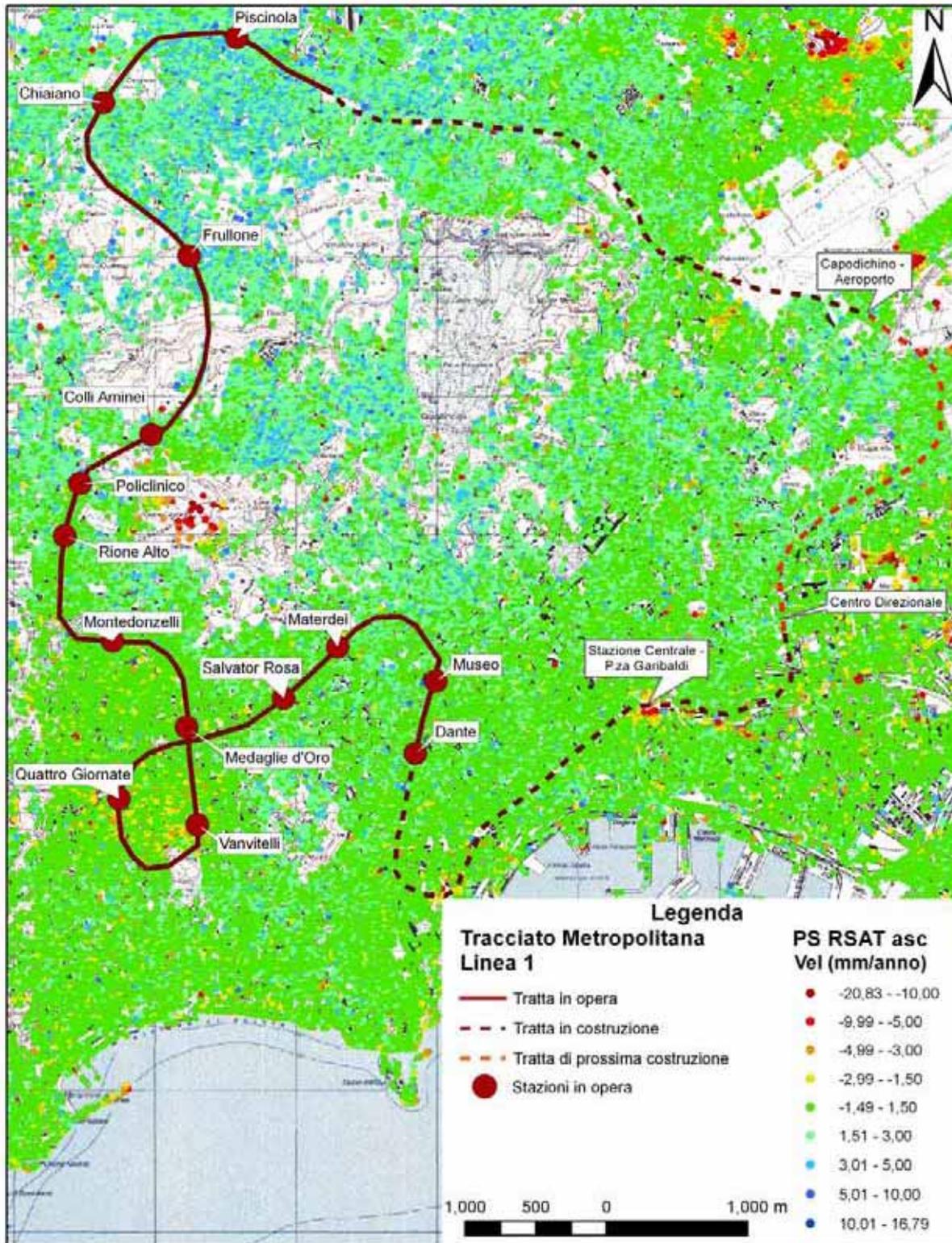


Figura 59: Mappa di velocità ottenuta dall'interpolazione dei dati PS ERS1/2 nell'area che presenta deformazioni associate allo scavo della tratta metropolitana Montedonzelli – Salvator Rosa della Linea 1.

Periodo 2003-2007 (dati RADARSAT)

In Figura 60 è riportata la distribuzione dei dati PS RADARSAT nell'area interessata dalla Linea 1 della metropolitana. L'analisi dei dati ha permesso di seguire l'evoluzione delle deformazioni causate dagli scavi già realizzati nelle tratte in opera e d'individuare nuove aree in deformazione associate agli scavi per il prolungamento della linea.

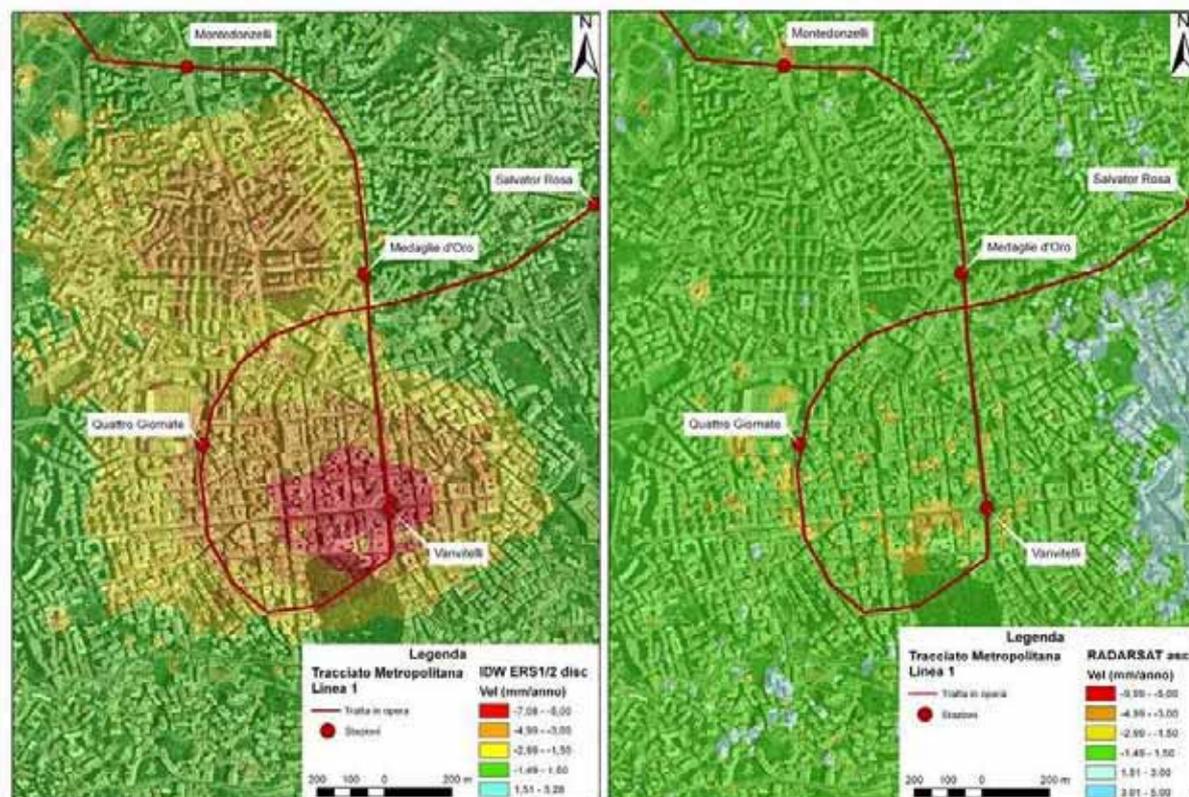


**Figura 60:** Distribuzione dei PS RADARSAT ascendenti nell’area interessata dal tracciato della Linea 1 della metropolitana. Le deformazioni chiaramente visibili ad E della stazione Policlinico sono causate da recenti interventi di urbanizzazione.

Analizzando l’area in deformazione individuata dai dati ERS1/2 lungo il tratto della linea compreso tra le stazioni “Montedonzelli” e “Salvator Rosa”, è possibile notare subito un decremento delle velocità medie rispetto al periodo 1992-2001. Il confronto tra le mappe di velocità, ottenute interpolando con l’algoritmo IDW le velocità medie dei PS ERS discendenti e RADARSAT ascendenti, permette di visualizzare come i processi deformativi che interessavano tutta l’area dell’anello metropolitano siano

pressoché terminati, tranne per le ristrette aree che nel *dataset* ERS erano interessate da deformazioni maggiori (Figura 61).

Bisogna specificare che, ipotizzando che il movimento sia principalmente a componente verticale, la linea di vista del satellite RADARSAT è più inclinata di quella dell'ERS1/2 ( $40^\circ$  rispetto a  $23^\circ$ ) e questo potrebbe causare una sottostima della deformazione, poiché “meno sensibile” ai movimenti verticali. Sulla base delle osservazioni effettuate, si può ipotizzare che il decremento delle velocità di deformazione in allontanamento, iniziato nel dicembre 1999 durante il periodo di acquisizione delle immagini ERS1/2, e proseguito nel periodo di acquisizione delle immagini RADARSAT, sia continuato anche durante il periodo di mancanza di dati tra l'ultima acquisizione del satellite ERS2 (11/01/2001) e la prima del satellite RADARSAT (07/04/2003).



**Figura 61: Confronto tra le mappe di velocità ottenute interpolando i PS ERS discendenti e i PS RADARSAT ascendenti tramite l'algoritmo IDW. E' possibile notare una riduzione della distribuzione spaziale delle deformazioni in allontanamento ed un decremento delle velocità.**

Nel *dataset* RADARSAT ascendente è possibile individuare, lungo il prolungamento della Linea 1, un'area con velocità in allontanamento rispetto al satellite dovute agli scavi per la realizzazione della stazione metropolitana Garibaldi, situata di fronte alla stazione ferroviaria Napoli Centrale (Figura 60).

Per quest'area è stata fatta un'analisi di dettaglio dei dati PS, al fine di valutare nel modo più accurato possibile le deformazioni osservate ed individuare l'estensione degli effetti deformativi sull'urbanizzato circostante (sezione 5.3.2).

### 5.2.3 Scala Locale

Effettuare un'operazione di individuazione e mappatura di movimenti di massa localizzati a scala locale significa analizzare i dati interferometrici satellitari ad una scala di dettaglio, che può essere stabilita come non inferiore a 1:10.000. Lavorare a tale scala di analisi presuppone un elevato livello di

dettaglio in fase di raccolta dati, come ad esempio per le basi cartografiche che, come è prevedibile, non possono essere anch'esse a scala inferiore a 1:10.000. Inoltre, nell'effettuare un'analisi dei dati satellitari a scala locale si deve tener conto che i tempi variano sensibilmente in funzione dell'estensione dell'area di indagine.

Di seguito viene presentato il caso di studio della realizzazione di una mappa inventario dei fenomeni franosi in un'area costiera soggetta ad instabilità di versante. Nell'area test sono state utilizzate tecniche di misura del campo deformativo superficiale di frane costiere, ottenuto mediante tecniche di telerilevamento, integrate a tecniche convenzionali di valutazione geomorfologica per la previsione dell'evoluzione dei fenomeni di studio nelle aree di test prescelte.

Per effettuare tali valutazioni, si è proceduto ad analizzare i dati a disposizione ad una scala non inferiore ad 1:5.000 restituendo poi un prodotto cartografico in scala 1:20.000 quale sintesi di tutte le indagini effettuate.

Il contributo fornito dall'integrazione dei dati subaerei, di sottosuolo e sottomarini derivanti dal lavoro congiunto con le altre UU.R. ha portato all'individuazione di criteri per il riconoscimento di aree critiche per instabilità costiera dei versanti.

### 5.2.3.1 Scilla

L'area costiera tra Scilla e Palmi (RC) è stata oggetto di studio per la realizzazione di una mappa inventario dei fenomeni franosi nell'ambito di un progetto PRIN dal titolo "Integrazione di dati telerilevati e tecniche di modellazione dinamica per lo studio dei fenomeni di instabilità costieri". Per tale progetto è stato effettuato uno studio integrato terra-mare utilizzando alcune tra le più moderne tecniche di rilievo, monitoraggio e modellazione per il riconoscimento e la caratterizzazione dei processi d'instabilità gravitativa costiera. Il progetto ha visto la collaborazione di 4 Unità di Ricerca (UU.R.) appartenenti a 3 diverse università per la valutazione dell'instabilità gravitativa di medie-grandi dimensioni in aree costiere, integrando analisi sul versante subaereo e quello sottomarino.

In particolare, l'attività svolta dalla presente UU.R. è consistita nell'integrazione di tecniche d'indagine e monitoraggio satellitare nell'analisi dei fenomeni di instabilità di versante in aree costiere. Il principale prodotto di tale attività di ricerca è stato lo sviluppo di una metodologia per l'interpretazione di dati interferometrici satellitari (radar-interpretazione), dei immagini ottiche e dei dati ancillari volta all'individuazione, mappatura e caratterizzazione dei fenomeni franosi in aree costiere.

#### Inquadramento geologico

Il territorio calabrese è caratterizzato dalla presenza dell'arco Calabro-Peloritano, struttura tettonica che costituisce il raccordo fra l'Appennino meridionale e la catena Siculo-Maghrebide ed è correlata alla convergenza fra la Placca Euro-asiatica e quella Africana. L'arco Calabro-Peloritano è costituito da diverse unità tettoniche impilate su un basamento cristallino paleozoico, che rappresenta un'originaria crosta continentale, talvolta coperto da una fascia di coperture meso-cenozoiche (Ogniben, 1969) cui si associano unità ofiolitifere derivanti da originarie croste oceaniche. Durante il Quaternario, sulle strutture compressive sviluppatasi in seguito a tale convergenza, si sono sovrimposte strutture estensionali, rappresentate da faglie normali orientate NE-SW, responsabili dell'intensa sismicità della regione. A partire da circa 0,8 milioni di anni fa la Calabria è in continuo sollevamento, come testimoniato anche dalla presenza di terrazzi marini a quote superiori ai 100 m s.l.m. (Ferranti et al., 2008). Questo sollevamento, coevo al movimento estensivo delle faglie normali (Dumas et al., 1982), viene ricondotto dai vari Autori a cause differenti (Westaway, 1993; 2002; Westaway et al., 2004; 2006; Wortel & Spakman, 2000; Gvirtzman & Nur, 2001; D'Agostino & Selvaggi, 2004; Goes et al., 2004).

Lungo il settore di costa tirrenica oggetto d'indagine affiorano le rocce del basamento cristallino paleozoico ( per lo più gneiss e scisti biotitici), coperte da depositi argilloso-marnosi e sabbiosi marini pliocenici, conglomeratici e sabbie alluvionali pleistocenici e depositi olocenici di varia natura. Il tetto

del basamento insieme con le coperture mioceniche e plioceniche immergono verso SE e sono tiltate dalle faglie di S. Eufemia e Cittanova. La faglia di Scilla (Figura 62), parallela alle precedenti, affiora solo nella parte più meridionale, ribassando la costa rispetto all'entroterra (Westaway, 1993; Miyauchi et al., 1994; Monaco & Tortorici, 2000). I depositi del Medio e Alto Pleistocene sono meno tiltati ma mostrano comunque il rigetto causato da tali faglie (Ferranti et al., 2008).

L'assetto geologico e strutturale di questo settore e gli alti tassi di sollevamento tettonico, si riflettono in una morfologia della costa caratterizzata da versanti molto acclivi, con rilievi prossimi alla costa e piane costiere spesso assenti. L'elevata energia del rilievo e l'intensa fatturazione dei depositi cristallini sono cause predisponenti per fenomeni gravitativi quali crolli e scorrimenti traslazionali che evolvono in colate. La degradazione subaerea che interessa i depositi cristallini intensamente fratturati, è inoltre causa di estese coltri di alterazione che costituiscono un fattore predisponente all'innesto di fenomeni gravitativi rapidi (quali colate di fango e detrito) (Bonavina et al., 2005).

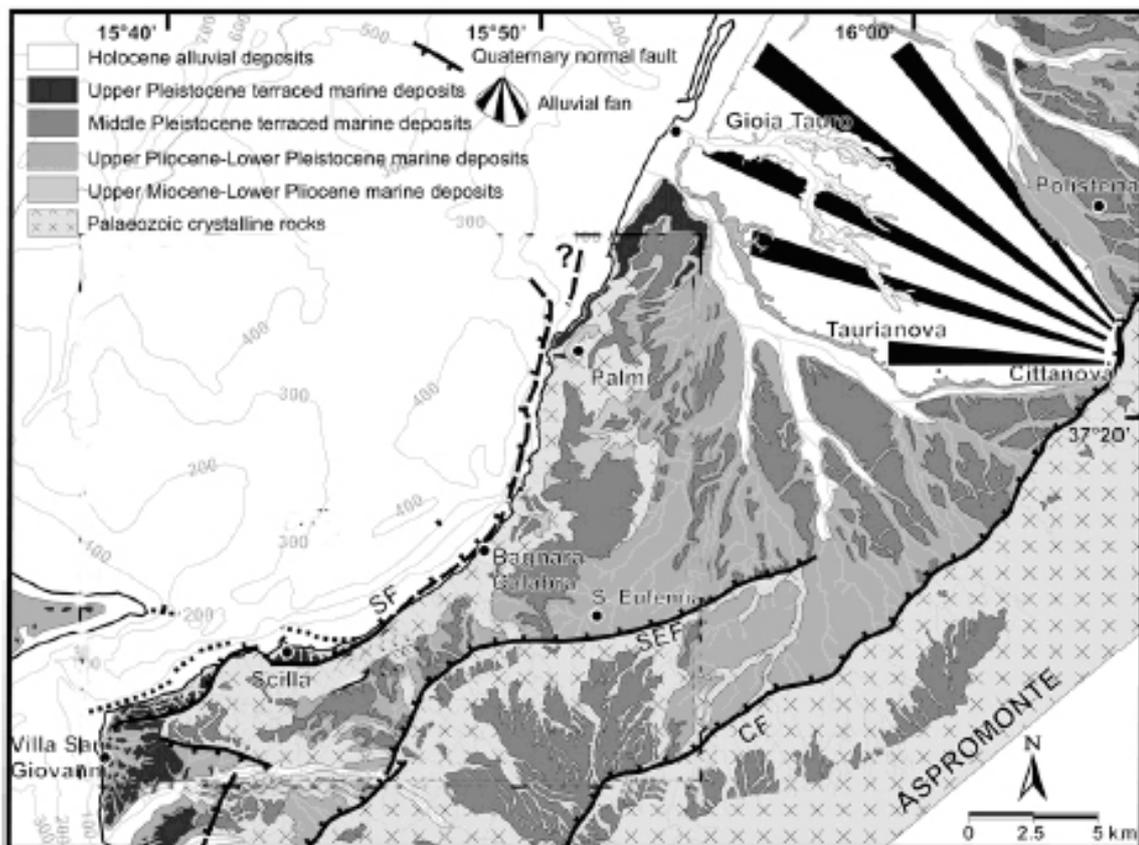


Figura 62. Mapa geologica della Calabria SW (Ferranti *et al.*, 2008, modificato). SF: faglia di Scilla; SEF: faglia di S. Eufemia; CF: faglia di Cittanova.

### Dati satellitari

E' stata effettuata una scelta dei *dataset* di immagini radar satellitari più opportuni per implementare l'analisi interferometrica. La scelta dei dati radar da elaborare è stata svolta analizzando le diverse caratteristiche dei satelliti che hanno acquisito in passato o acquisiscono attualmente immagini SAR nell'area d'indagine, sia in relazione alle proprietà del segnale impiegato, sia nei confronti della copertura spaziale e temporale delle acquisizioni. Tra gli archivi disponibili attualmente su territorio nazionale, sono state acquisite immagini dei satelliti ERS1/2, in orbita ascendente e discendente, e ENVISAT, in orbita ascendente, dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA).

Le immagini acquisite sono state quindi elaborate tramite tecnica multi-interferometrica PSInSAR. Non è stato possibile produrre un processamento attendibile delle immagini ENVISAT discendenti a causa delle poche immagini disponibili e della bassa densità dei PS individuati durante l'elaborazione (Tabella 7).

Le informazioni fornite dai dati ERS1/2 nel periodo 1992-2000 hanno consentito un'analisi storica delle deformazioni misurate nell'area di indagine. I dati ENVISAT relativi al periodo 2002-2007 hanno permesso la definizione del quadro deformativo attuale.

Satellite	Orbita	N° immagini	Periodo	Densità media PS (PS/km <sup>2</sup> )
ERS1/2	discendente	83	20/06/1992 - 20/12/2000	118
ERS1/2	ascendente	47	dal 08/09/1992 al 24/11/2000	61
ENVISAT	ascendente	25	dal 29/11/2002 al 16/02/2007	13

**Tabella 7 - Schema riassuntivo delle immagini radar satellitari elaborate nell'area di indagine.**

### Analisi dei dati satellitari

L'analisi dei dati PS ha previsto una prima attività di acquisizione dei dati satellitari e dei dati ottici e ancillari che costituiscono la base di partenza indispensabile per effettuare le successive fasi di foto- e radar-interpretazione di dettaglio.

Come base cartografica per la foto- e radar-interpretazione sono state utilizzate le Carte Tecniche Regionali in scala 1:10.000 e il DTM con risoluzione 20 m e le successive elaborazioni quali la mappa delle pendenze, dell'esposizione e le immagini in *shaded relief* utili in fase interpretativa per individuare anomalie nella morfologia o riconoscere nel versante eventuali accumuli di frana, caratterizzati da bassi valori di pendenza, e nicchie di distacco, rappresentate da bruschi incrementi del gradiente. La mappa dell'esposizione dei versanti è risultata necessaria per comprendere il significato del segno delle misure radar satellitari ottenute per mezzo dell'analisi interferometrica, in quanto movimenti orientati N-S possono risultare sottostimati dalle misure satellitari.

Sono stati inoltre acquisiti mappe inventario presenti nell'area in esame quali l'Inventario dei Fenomeni Franosi (IFFI) ed il Piano di Assetto Idrogeologico (PAI) redatto dall'Autorità di Bacino della Calabria .

Come base indispensabile per la fotointerpretazione sono state acquisite foto aeree in B/N del volo 1988 (scala 1:75.000) e del volo 1988-99 (scala 1:40.000), ortofoto IT2000 e 2006 per effettuare una fotointerpretazione multitemporale per mettere in evidenza le variazioni morfologiche dei dissesti individuati.

Tutti i dati acquisiti, satellitari, ottici e ancillari, sono stati omogeneizzati in un unico sistema di riferimento cartografico i dati precedentemente raccolti ed elaborati. Effettuare tale operazione in ambiente GIS ha permesso di integrare i dati ancillari, ottici e radar in un unico progetto in modo da poter facilmente sovrapporre, confrontare, elaborare ed interpretare i dati in un ambiente georiferito.

La metodologia d'indagine sviluppata dalla presente UR nel corso di questa ricerca è schematizzata in Figura 63.

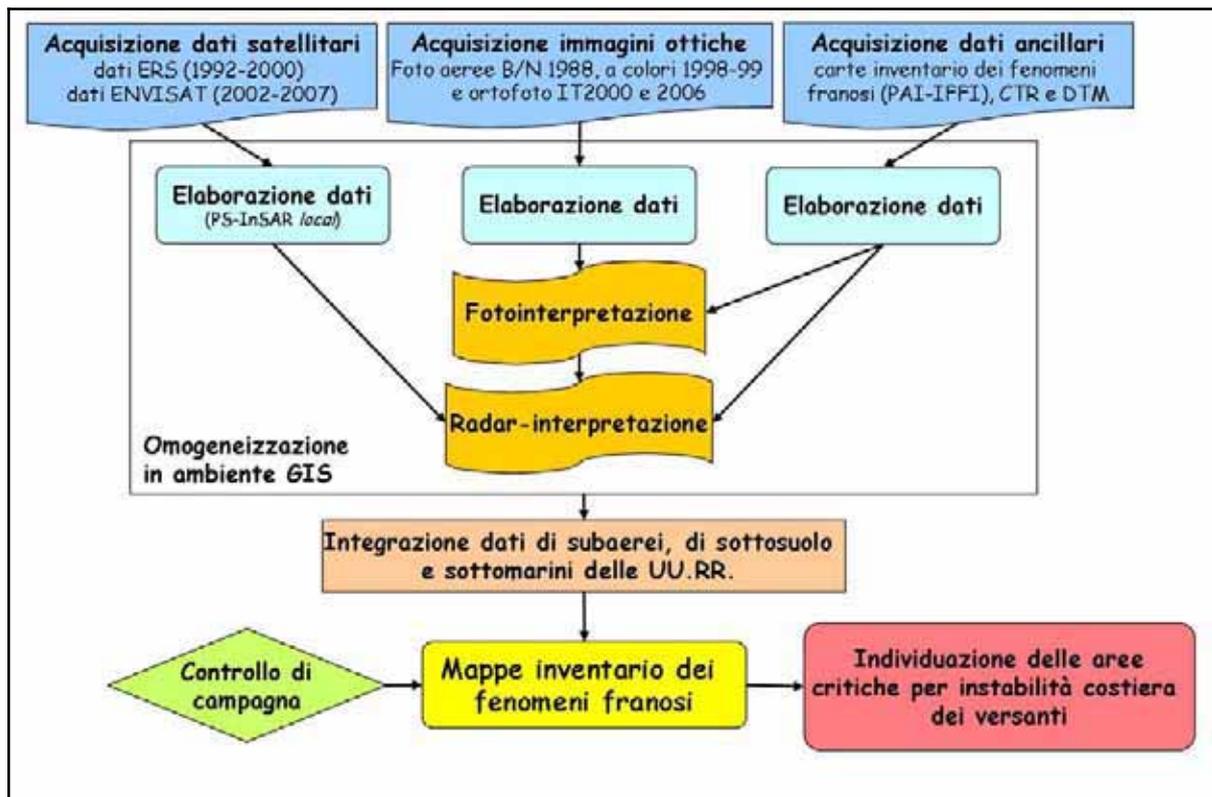


Figura 63- Metodologia sviluppata dall'U.R. per l'individuazione di aree critiche per instabilità costiera dei versanti.

Nell'area investigata è stata effettuata una foto- e radar-interpretazione di dettaglio. La mappatura dei fenomeni franosi costieri nell'area indagata ha previsto l'utilizzo di dati telerilevati ad integrazione e complemento delle tecnologie convenzionali di controllo e monitoraggio del territorio, basate prevalentemente sull'interpretazione di immagini ottiche e su valutazioni geomorfologiche da supporti topografici. Sono state identificate le morfologie e caratteristiche dei versanti connesse ai movimenti deformativi e sono state così estese spazialmente le informazioni puntuali fornite dai dati satellitari.

Il contributo dell'analisi del dato interferometrico è stato presente in fase di censimento dei fenomeni ed in fase di aggiornamento dei precedenti inventari. In particolare l'informazione fornita dal dato PS in fase di individuazione e mappatura dei dissesti di versante ha contribuito a:

- verificare o eventualmente modificare la perimetrazione dei fenomeni;
- individuare dissesti non mappati nei precedenti inventari o non emersi da analisi geomorfologiche e da studi precedentemente effettuati nell'area;
- fornire indicazioni sullo stato di attività dei fenomeni;
- valutare l'intensità del fenomeno.

In Figura 64 è riportato lo schema metodologico per l'utilizzo del dato PS per l'individuazione e la mappatura dei fenomeni franosi.

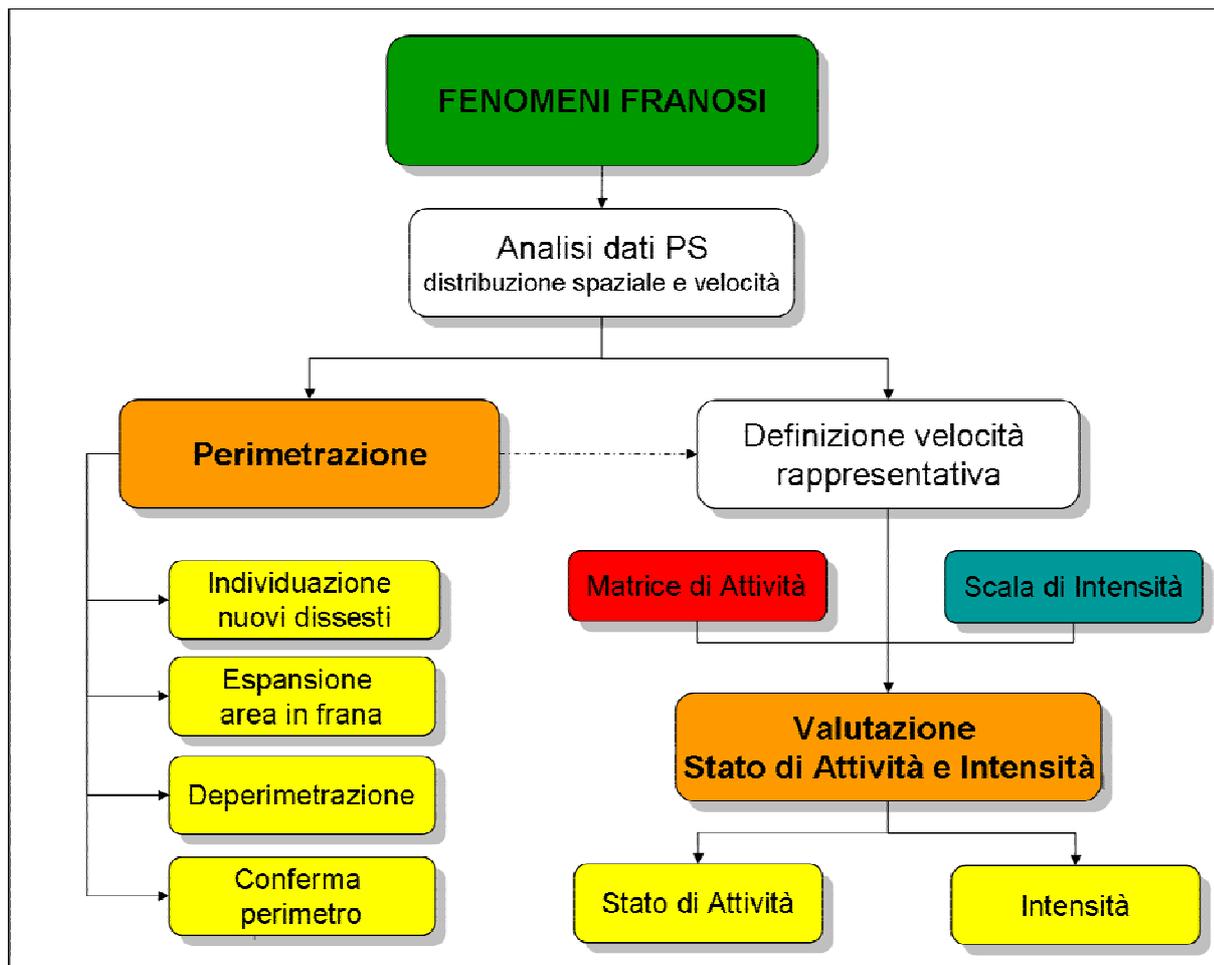


Figura 64 – Schema per l'utilizzo del dato PS nell'individuazione e nella mappatura dei fenomeni franosi.

- Analisi dei dati PS

In questa fase sono state analizzate la distribuzione spaziale e le velocità dei dati PS nell'area indagata ed i relativi valori di velocità media; lo scopo di tale analisi è stato valutare se il dato PS fornisce un'informazione attendibile ed utilizzabile in fase di perimetrazione e di valutazione dello stato di attività e di intensità delle frane.

- Analisi della distribuzione spaziale

Dal punto di vista operativo, si è proceduto con un'analisi della distribuzione spaziale del dato PS nell'area indagata e in particolare all'interno delle aree in frana precedentemente individuate. E' stato valutato se la distribuzione spaziale dei bersagli radar all'interno dell'area esaminata poteva considerarsi rappresentativa dell'intero fenomeno o solo di una parte di esso e se poteva ritenersi valida per la mappatura e la valutazione del dissesto.

Laddove, a seguito di un'accurata analisi della distribuzione spaziale dei PS, l'informazione fornita era attendibile, si è proceduto con l'analisi della distribuzione spaziale dei valori delle velocità medie. In caso contrario, è stato opportuno approfondire le cause dello scarto dell'informazione dei PS valutando se la mancanza di PS era dovuta alle caratteristiche del territorio in esame (uso del suolo, esposizione dei versanti, variazione delle proprietà elettromagnetiche del bersaglio, ecc.) oppure per la presenza di movimenti rapidi che provocano forte decorrelazione temporale del segnale.

- Analisi delle velocità medie annue dei PS

L'analisi della distribuzione spaziale dei valori di velocità media annua dei PS nell'area in esame è servita a valutare se l'informazione fornita poteva essere utilizzata per la mappatura dei dissesti e per valutare lo stato di attività e l'intensità dei fenomeni. Inoltre la presenza di evidenti differenze di velocità media di deformazione tra le diverse zone dell'area esaminata ha permesso di identificare

settori con differente evoluzione e di discriminare diversi comportamenti deformativi all'interno della stessa area in frana.

La valutazione soggettiva ha consentito di decidere caso per caso se le misure di spostamento erano effettivamente rappresentative dei fenomeni analizzati, valutando in funzione della causa delle deformazioni misurate (es. i PS misurano solo le deformazioni superficiali che possono non essere rappresentative dell'intero fenomeno) ed in funzione delle caratteristiche della tecnica interferometrica (es. limiti di velocità dei movimenti).

Una volta valutata la validità dell'informazione fornita dai dati PS nell'area in esame, si è proceduto con la perimetrazione dei fenomeni. Inoltre, dall'analisi dei valori di velocità media dei PS, può essere determinato il valore di velocità rappresentativo del fenomeno franoso analizzato, da utilizzare per la valutazione del suo stato di attività e dell'intensità.

- Perimetrazione dei fenomeni franosi

Il contributo del dato PS alla fase di perimetrazione delle frane ha consentito di:

- individuare di nuove frane;
- espandere un'area in frana già individuata;
- deperimetrare;
- confermare la perimetrazione dei fenomeni.

In particolare in aree dove la copertura vegetale o il tessuto urbano non hanno permesso il riconoscimento di caratteristiche morfologiche legate ai dissesti, i maggiori benefici provenienti dall'integrazione delle misure di deformazione fornite dalle analisi interferometriche con i rilievi convenzionali, sono stati legati alla migliore definizione dei limiti di frane già identificate e all'identificazione di aree instabili non mappate in precedenza.

Nel caso in cui i PS ricadevano in zone già individuate all'interno di una mappa inventario preesistente, oppure vicine ad esse, le misure di deformazione ottenute per mezzo dell'analisi radar satellitare sono risultate utili per confermare o modificare il perimetro di frane preesistenti e individuare eventuali nuovi movimenti di versante non ancora mappati.

- Definizione della velocità rappresentativa

Dopo aver analizzato i dati PS nell'area franosa di interesse, in termini di distribuzione spaziale e di velocità medie, ed aver perimetrato i dissesti di versante presenti, è stato determinato un valore di velocità di spostamento che potesse essere rappresentativo della frana esaminata.

In generale, i PS caratterizzati da velocità medie di deformazione che superano i  $\pm 1,5-2$  mm/anno sono quelli che vengono considerati instabili. Tali valori soglia dipendono dalle caratteristiche delle immagini satellitari di partenza e di quelle evolutive del fenomeno di interesse.

In funzione della tipologia di fenomeni che devono essere identificati, le velocità di deformazione che vengono considerate rilevanti sono piuttosto differenti. Ad esempio, se lo scopo del lavoro è quello di aggiornare una mappa dei fenomeni franosi a fini di pianificazione territoriale, anche movimenti estremamente lenti possono risultare di notevole interesse.

Attraverso l'analisi della distribuzione di frequenza spaziale dei valori di velocità media, è stato determinato il valore di deformazione caratteristico al fine di valutare per ciascun fenomeno lo stato di attività e l'intensità. I diversi valori di velocità dei PS presenti all'interno delle singole aree in frana vengono classificati ed analizzati sia per individuare i valori minimi, massimi e medi, che per individuare altri parametri rappresentativi dell'insieme di dati PS, quali la mediana e la moda.

Molto spesso il numero di PS presenti all'interno di una singola frana non consente di effettuare una distribuzione di frequenza delle velocità. In questi casi si deve valutare il valore di spostamento rappresentativo per l'intero fenomeno senza l'ausilio di un'analisi statistica, ma con un criterio soggettivo in cui è l'utente esperto che definisce il valore di velocità della frana interpretando i dati PS e quelli ancillari disponibili nell'area in esame.

- Valutazione dello stato di attività e dell'intensità dei fenomeni franosi

Una volta definita dall'analisi dei dati PS la velocità rappresentativa dei singoli fenomeni franosi, si può procedere con la valutazione dello stato di attività e dell'intensità di ogni frana. Di seguito viene proposto un metodo di utilizzo dei valori di velocità media dei PS ERS1/2 e ENVISAT per una valutazione speditiva dello stato di attività e dell'intensità dei fenomeni franosi.

Dalla combinazione dei valori di spostamento nei 2 intervalli temporali si ottiene una matrice di attività (Figura 65).

Le classi di stato di attività in uscita dalla matrice sono determinate sulla base dell'analisi dei risultati della radar-interpretazione delle elaborazioni interferometriche eseguite sia su dati ERS1/2 che ENVISAT e, in particolare, vengono definite introducendo la seguente soglia:

- *2 mm/anno*: velocità media di deformazione che discrimina la presenza/assenza di movimento.

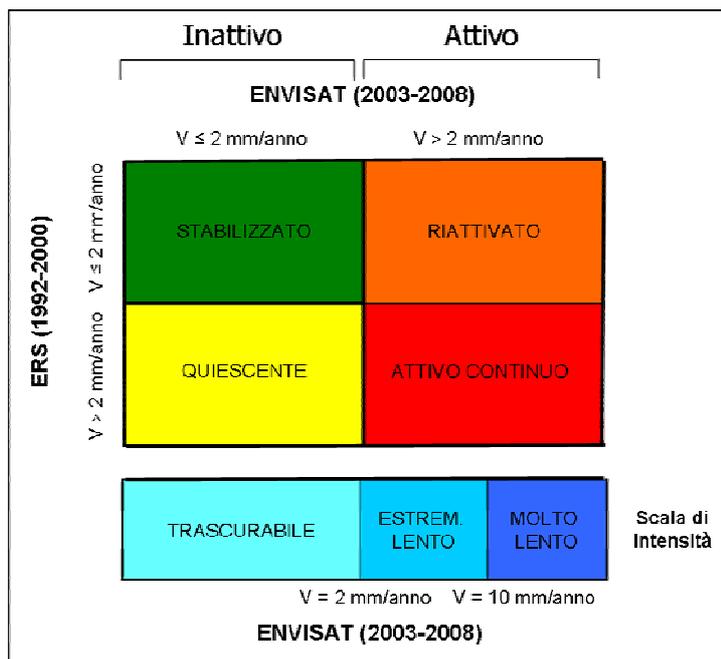


Figura 65 - Matrice utile per valutare lo stato di attività dei fenomeni franosi a partire da dati radar satellitari acquisiti dai satelliti ERS1/2 ed ENVISAT. I nomi delle classi di attività si riferiscono alle definizioni proposte dal WP/WLI (1993). Sotto, la scala per la valutazione dell'intensità dei fenomeni franosi a partire dai dati dei PS ENVISAT.

In generale, tramite l'uso della **matrice di attività** proposta nella figura 65, è possibile distinguere le 4 classi di attività: attivo continuo, riattivato, quiescente e stabilizzato. La classificazione dello stato di attività è in accordo con il Dizionario Internazionale delle frane (WP/WLI, 1993).

- FRANA ATTIVA

- Continua

La velocità di deformazione caratteristica del fenomeno supera la soglia sia nell'analisi dei dati storici che all'interno dei dati aggiornati.

- Riattivata

La velocità di deformazione caratteristica del fenomeno è minore della soglia all'interno dei dati storici e maggiore di essa all'interno dei dati aggiornati.

- FRANA INATTIVA

- Stabilizzata

La velocità di deformazione caratteristica del fenomeno è minore della soglia sia nell'analisi dei dati storici che all'interno dei dati aggiornati.

- Quiescente

La velocità di deformazione caratteristica del fenomeno supera la soglia all'interno dei dati storici ma è minore di essa all'interno dei dati aggiornati.

La **scala di intensità** si riferisce alla classificazione di Hungr (1981), modificata da Cruden & Varnes (1994), secondo la quale le frane possono essere classificate in base ai valori di velocità di movimento ed associata ad una scala dei danni. Le frane che è possibile classificare in base alle misure di velocità di spostamento misurate tramite dati interferometrici satellitari sono quelle appartenenti alle classi “estremamente lente” (velocità compresa tra 2 e 16 mm/anno) e “molto lente” (velocità superiore a 16 mm/anno); per velocità inferiori ai 2 mm/anno, le frane si classificano con intensità trascurabile.

L'intensità di ogni frana può essere determinata utilizzando i valori di velocità dei movimenti registrati dal satellite ENVISAT; essi sono però sottostimati, in quanto ciò che viene registrato non è il reale valore di velocità, ma la componente lungo la LOS, che è inferiore al valore reale. Per questo motivo il limite tra molto lento ed estremamente lento è ridotto a **10 mm/anno**.

I risultati ottenuti da un'analisi volta all'individuazione e modifica dei limiti di fenomeni di dissesto e alla valutazione del loro stato di attività e della loro intensità, possono essere considerati parte integrante di una metodologia per l'aggiornamento delle mappe dei fenomeni franosi. Le valutazioni sullo stato di attività e sull'intensità dei fenomeni, dedotte tramite questa tipologia di analisi, si riferiscono sempre alla data di aggiornamento dei dati satellitari utilizzati in fase di interpretazione.

Chiaramente, si tratta di un approccio per la preliminare valutazione dello stato di attività e dell'intensità dei fenomeni franosi tramite l'utilizzo di dati PS, che non può né deve prescindere un'accurata analisi geomorfologica di campagna. Nessuna deduzione può considerarsi conclusiva finché non vengono effettuati gli opportuni confronti con dati di monitoraggio *in situ* e controlli di campagna.

In particolare, la fotointerpretazione, condotta con estremo dettaglio spaziale e temporale, è risultata un valido strumento per l'individuazione, la mappatura e la valutazione dei fenomeni franosi costieri, particolarmente in aree dove l'informazione PS è assente o i dissesti presentano deformazioni superficiali non rilevabili da satellite (Figura 66).

La radar-interpretazione ha permesso di individuare dissesti in aree urbanizzate (Figura 67), o che erano in ombra nelle foto aeree, data l'elevata acclività dei versanti (Figura 68), o in aree in cui si sono recentemente sviluppate delle instabilità gravitative che non era possibile identificare nella cartografia e nelle immagini ottiche riprese nel 1998-99.

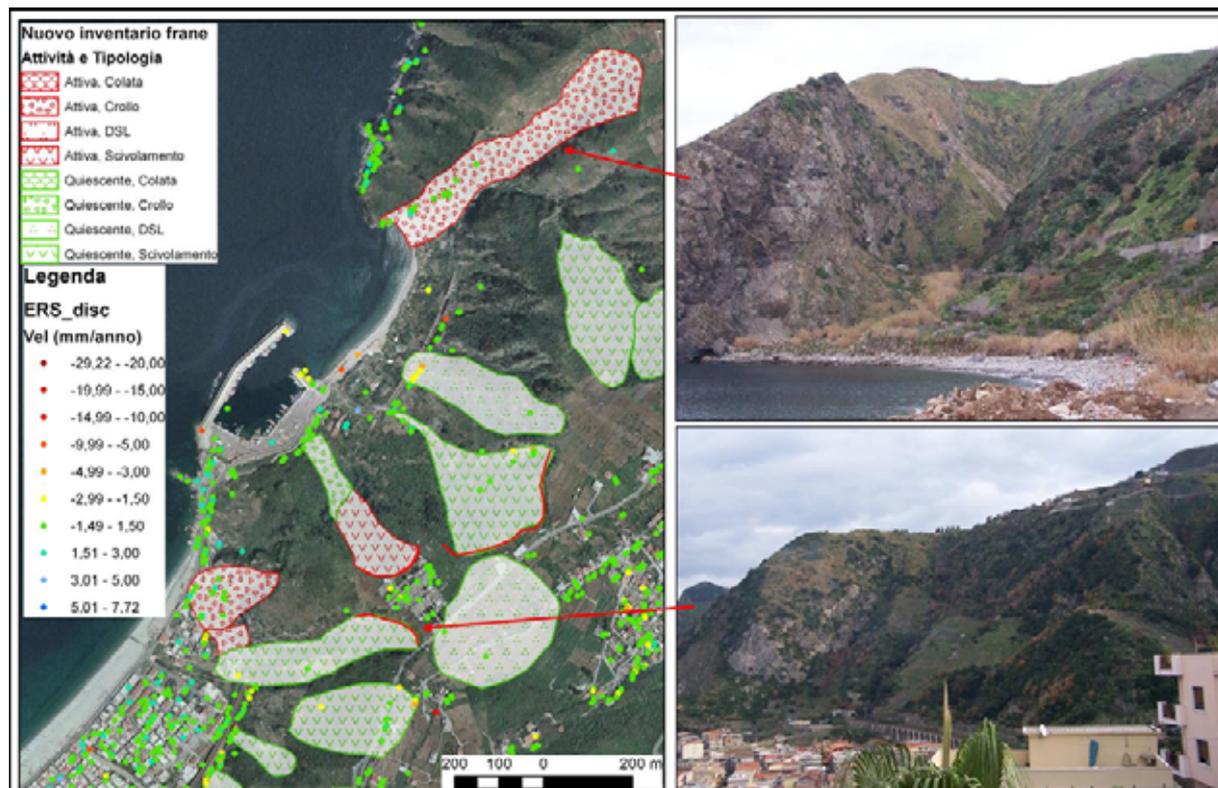


Figura 66 - Fenomeni franosi individuati tramite fotointerpretazione, in quanto i dissesti in oggetto si evolvono con velocità non misurabili con tecnica PS come i crolli (sopra) o perché non presentano bersagli radar (sotto) (Bagnara Calabra).

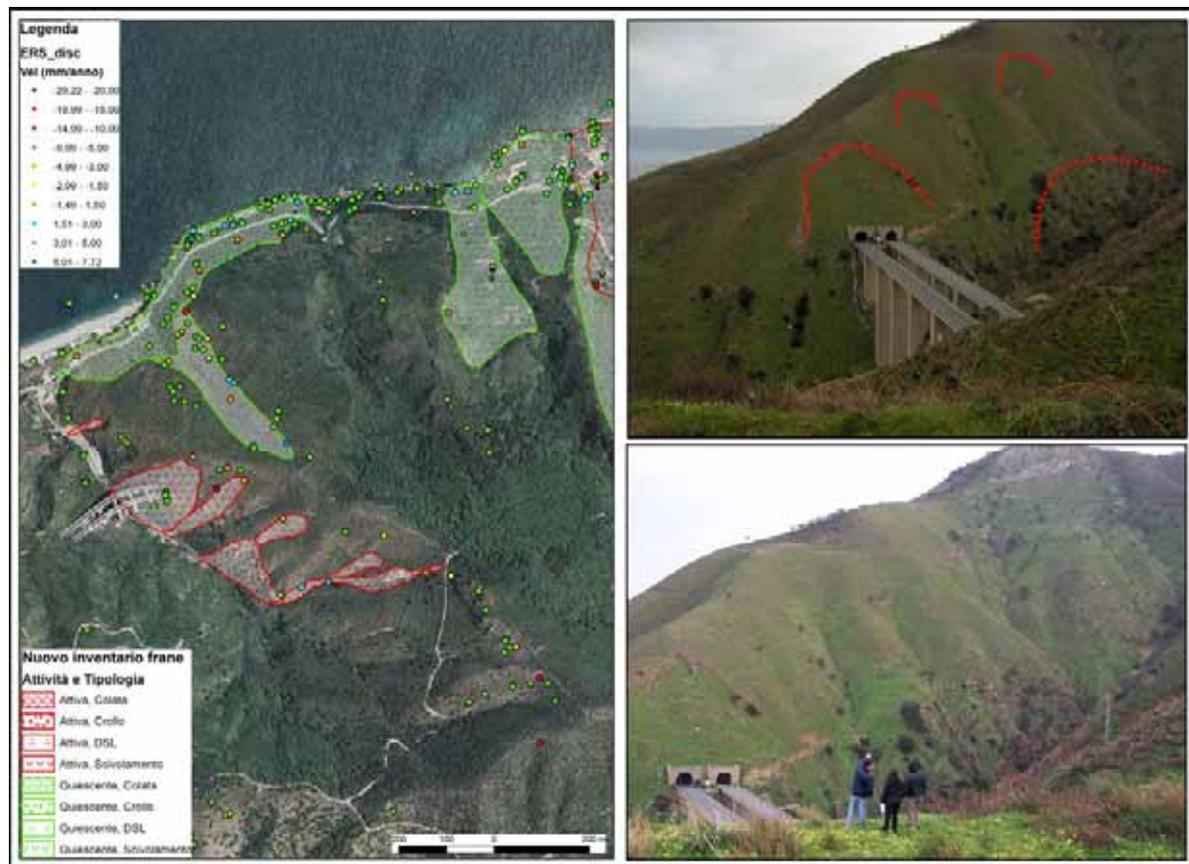


Figura 67 – Fenomeni franosi individuati con dati i PS, in un'area in ombra nelle foto aeree (Vallone di S. Gregorio – Scilla).

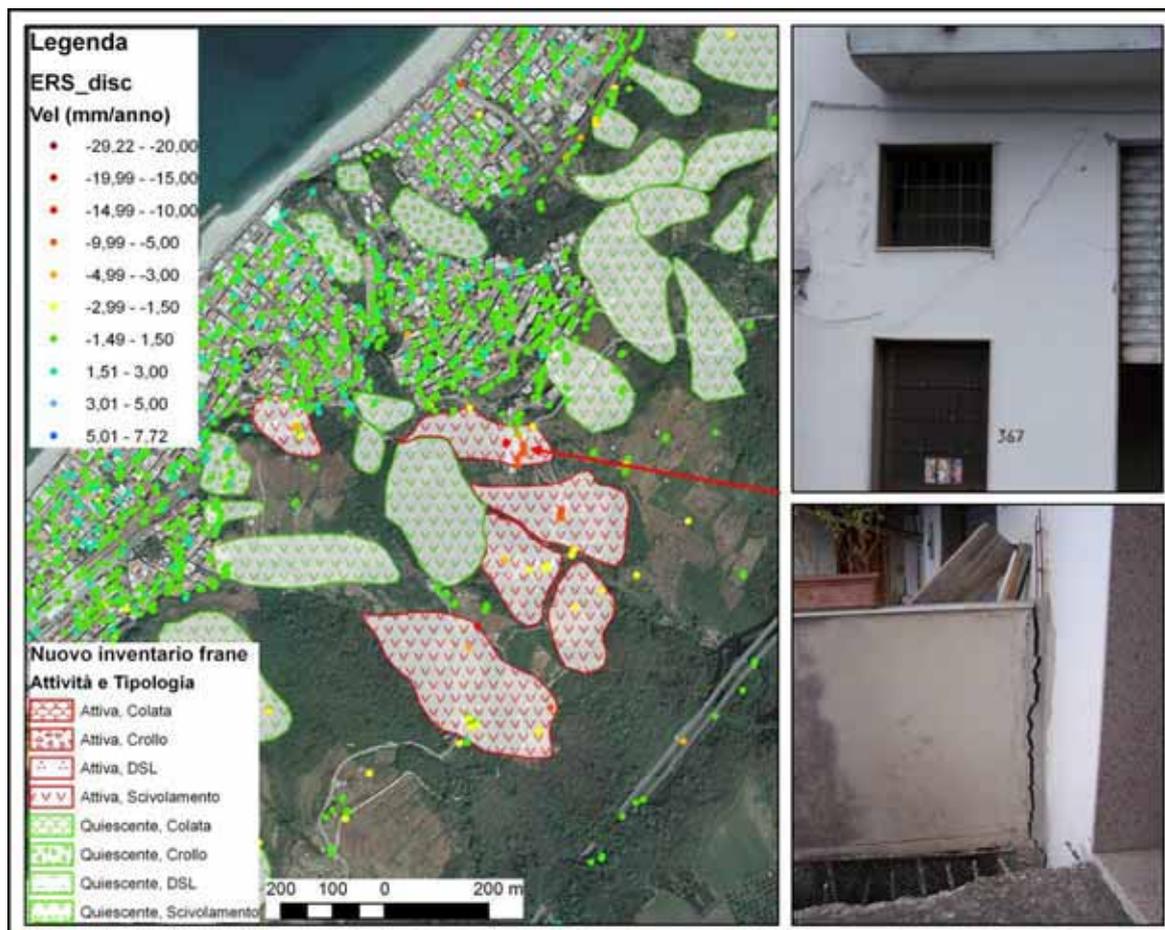


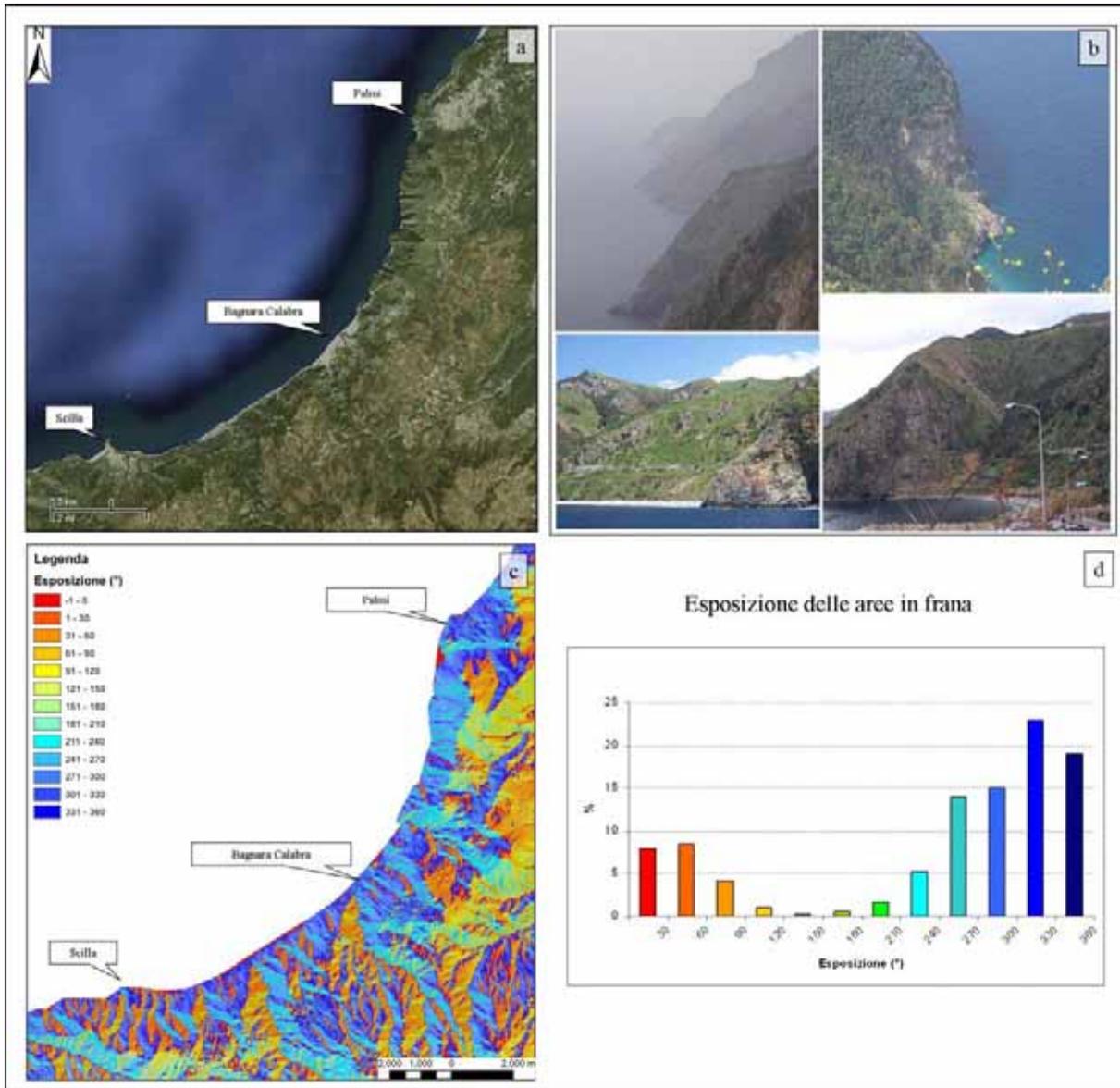
Figura 68 - Fenomeni franosi individuati con dati i PS, in un'area urbanizzata (Bagnara Calabria).

Andando a discutere i risultati ottenuti nell'area test di Scilla, al fine di valutare le potenzialità ed i limiti della tecnica per la valutazione dei fenomeni franosi in area costiera, l'analisi PS non ha fornito però rilevanti risultati per gli scopi del progetto, contrariamente a quanto osservato in altre aree oggetto di indagine dalla presente unità di ricerca, a causa delle caratteristiche dell'area, sfavorevoli all'osservazione dei movimenti deformativi da satellite, quali:

1. Scarsa estensione delle aree urbanizzate: densità elevate dei PS si sono riscontrate esclusivamente negli abitati di Bagnara Calabria e Palmi e lungo le infrastrutture dell'autostrada A3, laddove cioè sono più numerosi i bersagli radar. Le informazioni fornite dai dati PS InSAR in questi casi, seppur estesamente interessanti ai fini di protezione civile, non interessano direttamente il tratto costiero, ed esulano quindi dall'argomento della ricerca;
2. Estesa copertura vegetale: la presenza di una fitta vegetazione ha limitato notevolmente l'individuazione di bersagli radar coerenti in fase di elaborazione delle immagini SAR, lungo tratti di costa come quello tra Bagnara Calabria e Palmi, dove, con tecniche di rilevamento classico e foto-interpretazione, sono invece stati individuati i fenomeni più interessanti ai fini dell'instabilità costiera dei versanti;
3. Principale esposizione dei versanti verso N ed elevata pendenza: specialmente nel tratto compreso tra Scilla e Bagnara Calabria i versanti risultano avere una prevalente esposizione verso N ed elevata pendenza, sfavorevole all'osservazione dei movimenti deformativi da satellite (Figura 69). L'istogramma di frequenza dei valori di esposizione dei versanti in frana mostra come le classi più rappresentate siano proprio quelle verso N, NNW dove i possibili movimenti lungo tali versanti risulterebbero quindi con principale componente N-S. La geometria di acquisizione dei satelliti ERS ed ENVISAT (orbite circa N-S e linea di vista a  $90^\circ$  verso destra, inclinata di  $23^\circ$  rispetto alla verticale), è tale che componenti di movimento

ortogonali alla LOS risultano non rilevabili. Tali satelliti sono quindi “ciechi” a movimenti lungo la direzione N-S;

4. Tipologia dei dissesti: nell’area si verificano prevalentemente dissesti con velocità classificabili da rapide ad estremamente rapide, quali crolli e colate di fango e detriti.



**Figura 69** –Il settore costiero tra Scilla e Palmi (a) presenta versanti ad elevata pendenza (b) ed una prevalente esposizione dei versanti verso N (c). In particolare dall’istogramma dei valori di esposizione dei versanti in frana (d) si vede come le classi di frequenza più rappresentate sono quelle verso N, sfavorevoli all’osservazione dei movimenti deformativi da satellite.

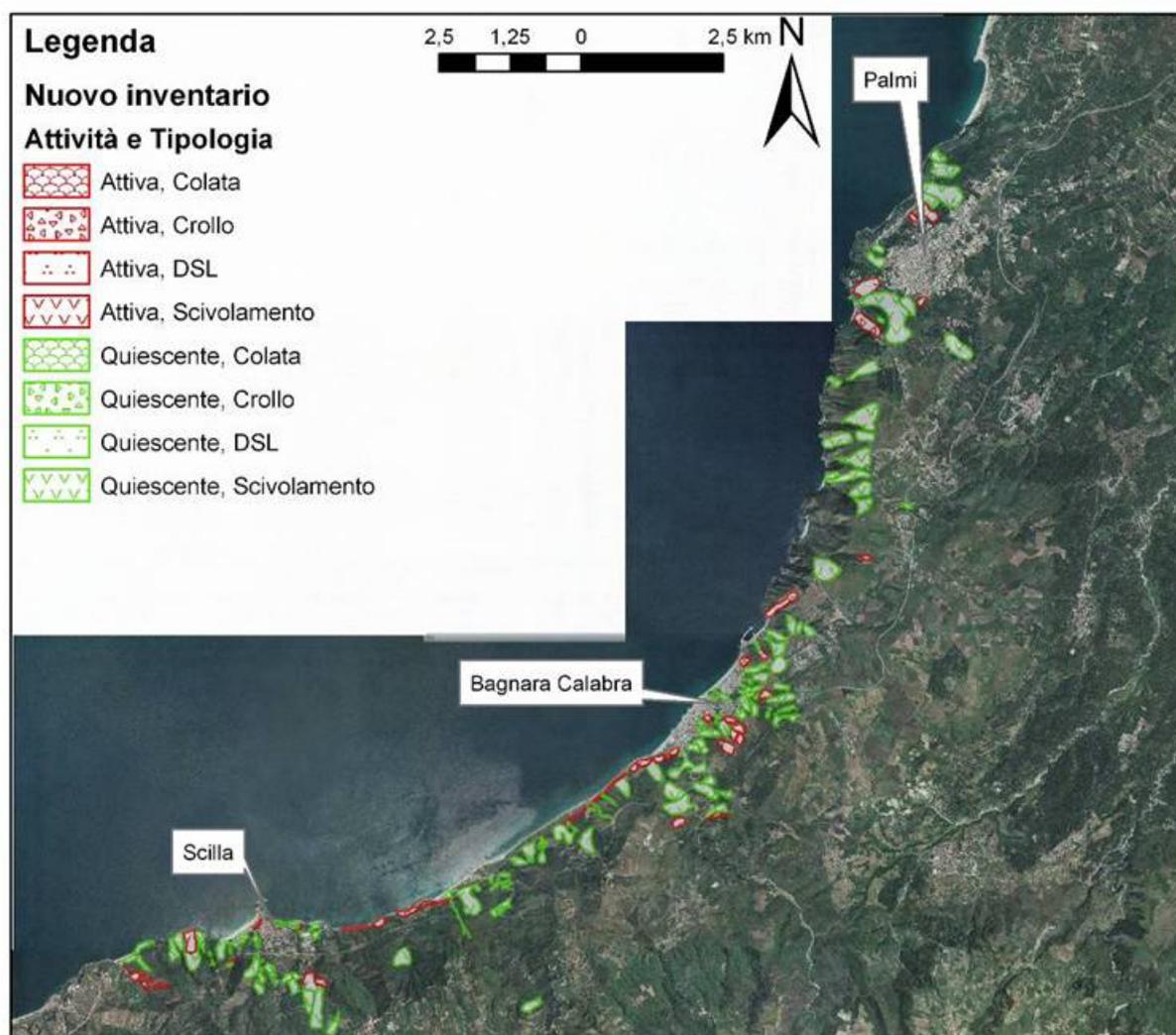
L’analisi delle serie temporali dei PS effettuate per tutti i fenomeni franosi individuati nel settore costiero non ha mostrato degli incrementi nelle velocità di spostamento associabili a delle riattivazioni dei fenomeni che permettessero l’integrazione delle misure del campo deformativo superficiale all’interno di modelli dinamici per la previsione dell’evoluzione dei fenomeni di studio. Tutti gli incrementi erano pressoché associabili a fenomeni di stagionalità.

L’integrazione tra foto- e radar-interpretazione ha permesso quindi di individuare e mappare le aree in frana e di avere indizi sullo stato di attività. Quest’ultimo in particolare è stato determinato sulla base

dei dati satellitari ENVISAT, sugli indizi forniti dalle immagini ottiche. Le aree in frana individuate sono state poi confrontate con la carta dei fenomeni franosi del PAI e dell'IFFI

Una volta terminate le fasi di foto- e radar- interpretazione sono stati eseguiti controlli di campagna, al fine di verificare l'esattezza dell'inventario realizzato e per completare la classificazione dei fenomeni di cui non era stato possibile identificare la tipologia.

La metodologia d'indagine sopra descritta ha condotto alla realizzazione di un Nuovo Inventario dei Fenomeni Franosi (Figura 70). In totale sono state individuate 178 frane (rispetto alle 87 mappate dagli inventari precedenti) che interessano il tratto costiero tra Scilla e Palmi, di cui 52 attive (rispetto alle 14 indicate come attive negli inventari precedenti). Le frane sono state classificate sulla base dello stato di attività e della tipologia.



**Figura 70 – Nuovo Inventario dei Fenomeni Franosi nel settore costiero tra Scilla e Palmi (RC).**

E' seguita poi un'integrazione dei dati delle diverse UU.R. e sono stati individuati i criteri per l'individuazione delle aree critiche per instabilità gravitativa dei versanti in area costiera. Tale attività ha visto l'integrazione dei dati subaerei, di sottosuolo e sottomarini di tutte le UU.R. volta a interpretare le diverse tipologie di frane costiere e a cercare di sviluppare una metodologia d'indagine e previsione integrata tra le diverse discipline, adatta alla previsione del comportamento dei versanti delle aree costiere. L'attività coordinata tra le UU.R ha permesso di sviluppare dei criteri multidisciplinari ed integrati per il riconoscimento di aree critiche per instabilità costiera dei versanti.

### 5.3 Caratterizzazione

La valutazione in dettaglio delle aree individuate e mappate attraverso l'integrazione di dati di superficie, di sottosuolo, di monitoraggio *in situ* e di verità a terra, deve consentire di rispondere a due questioni fondamentali:

- qual è l'evoluzione nel tempo delle deformazioni associate al dissesto (**Caratterizzazione temporale**);
- quali sono le variazioni spaziali delle deformazioni (**Caratterizzazione spaziale**);

oltre, ovviamente, a stabilire le cause delle variazioni spaziali e temporali individuate.

L'analisi dei dati interferometrici satellitari permette di valutare l'estensione e la geometria del fenomeno analizzato, attraverso l'analisi e la combinazione delle componenti di deformazione superficiale osservate lungo le diverse geometrie ed il confronto spaziale delle misure satellitari con i dati rilevati *in situ*. I dati di spostamento possono essere inseriti all'interno di modelli predittivi che, attraverso il miglioramento delle conoscenze sul dissesto in esame e la comprensione del cinematismo che lo contraddistingue, sono finalizzati alla previsione dell'evoluzione spaziale del fenomeno di interesse.

La **caratterizzazione temporale** dei dissesti individuati avviene attraverso la consultazione delle serie storiche o temporali dei PS. Le serie storiche riportano, per ogni PS, gli spostamenti (in mm) del bersaglio misurati lungo la LOS per ogni immagine elaborata. I valori di spostamento sono in funzione del tempo trascorso tra la prima acquisizione della serie, che viene utilizzata come riferimento, e le successive immagini acquisite.

L'analisi delle serie temporali di spostamento dei PS permette di valutare le variazioni nel tempo delle deformazioni ottenendo informazioni non direttamente intuibili dalla visualizzazione delle velocità medie. E' infatti possibile individuare all'interno dei valori di spostamento dei fenomeni di stagionalità del moto, andamenti di tipo non lineare o incrementi nelle velocità di spostamento (accelerazioni).

Dall'analisi di dettaglio delle serie temporali è inoltre possibile estrarre valori di velocità di spostamento che permettono l'integrazione delle misure del campo deformativo superficiale all'interno di modelli per la previsione dell'evoluzione dei fenomeni in esame.

Un'analisi storica delle deformazioni pregresse avvenute sull'area in esame precedentemente ad un evento, può essere effettuata grazie alla disponibilità degli archivi di immagini SAR satellitari acquisite sul territorio nazionale. A partire dal 1992, è possibile infatti effettuare un monitoraggio a ritroso (*back monitoring*) del fenomeno di interesse, caratterizzandolo sia dal punto di vista temporale che spaziale.

Le tecniche interferometriche consentono di studiare l'evoluzione dei dissesti e di valutare la loro risposta nei confronti dei fattori di innesco.

Il *back monitoring*, mediante l'utilizzo di informazioni di deformazione ad alta accuratezza, permette di analizzare l'evoluzione nel tempo dei fenomeni, individuare eventuali *trend* deformativi rilevanti, riconoscere aree instabili, stimare lo stato di attività dei dissesti, riconoscere eventuali movimenti precursori, valutare la risposta del fenomeno alle variazioni dei fattori predisponenti e ricostruire la geometria dei fenomeni attraverso la combinazione delle modalità di acquisizione ascendente e discendente.

Un ulteriore obiettivo della caratterizzazione temporale consiste nella determinazione delle eventuali correlazioni temporali tra l'occorrenza dei fenomeni e nello sviluppo dei fattori di innesco, quali terremoti o precipitazioni particolarmente intense, ottenuta tramite il confronto e l'integrazione dei dati telerilevati con i dati *in situ*.

Le tecniche multi-interferogramma offrono la possibilità di studiare fenomeni le cui velocità sono estremamente ridotte (mm/anno) e per i quali le tecniche convenzionali richiederebbero anni prima di poter fornire misure significative.

### 5.3.1 Caratterizzazione spaziale (*Spatial Characterization*): il centro storico di Roma

L'analisi dei dati interferometrici satellitari nell'area del centro storico di Roma ha permesso di valutare l'estensione e la geometria del fenomeno analizzato, attraverso l'analisi delle componenti di deformazione superficiale osservate lungo le diverse geometrie ed il confronto spaziale delle misure satellitari con i dati di superficie e di sottosuolo.

In particolare, si osserva una generale stabilità non solo dei versanti dei colli ma anche dei depositi alluvionali, ad eccezione dell'area di Piazza Mazzini (Quartiere Prati) dove si verificano problemi di stabilità degli edifici, sia i PS ERS1/2 (Figura 71) che RADARSAT (Figura 73 e Figura 74) rilevano velocità in allontanamento che raggiungono al massimo i 6 mm/anno, sia nei *datasets* discendenti che ascendenti.

Dal confronto con le carte storiche dell'area è stato visto come queste aree in subsidenza coincidano con le zone di più recente urbanizzazione. Inoltre dai dati stratigrafici dei sondaggi si è avuta la conferma che le velocità dipendono dalla profondità del substrato pliocenico e dallo spessore dei depositi comprimibili.

#### Periodo 1992 – 2000 (dati ERS1/2)

Dalla distribuzione dei PS ERS1/2 nell'area del centro storico e del limitrofo quartiere di Prati si vede come le velocità principalmente rientrano nell'intervallo assunto come "stabile". Fa eccezione a questa situazione di stabilità l'area di Piazza Mazzini, situata al centro del quartiere Prati.

Il confronto delle mappe di velocità ottenute interpolando i valori delle velocità medie dei dati ERS1/2, in entrambe le geometrie di acquisizione, suggerisce che si tratta di movimenti a principale componente verticale, data la corrispondenza tra le aree in movimento osservate nei due *dataset* (Figura 72).

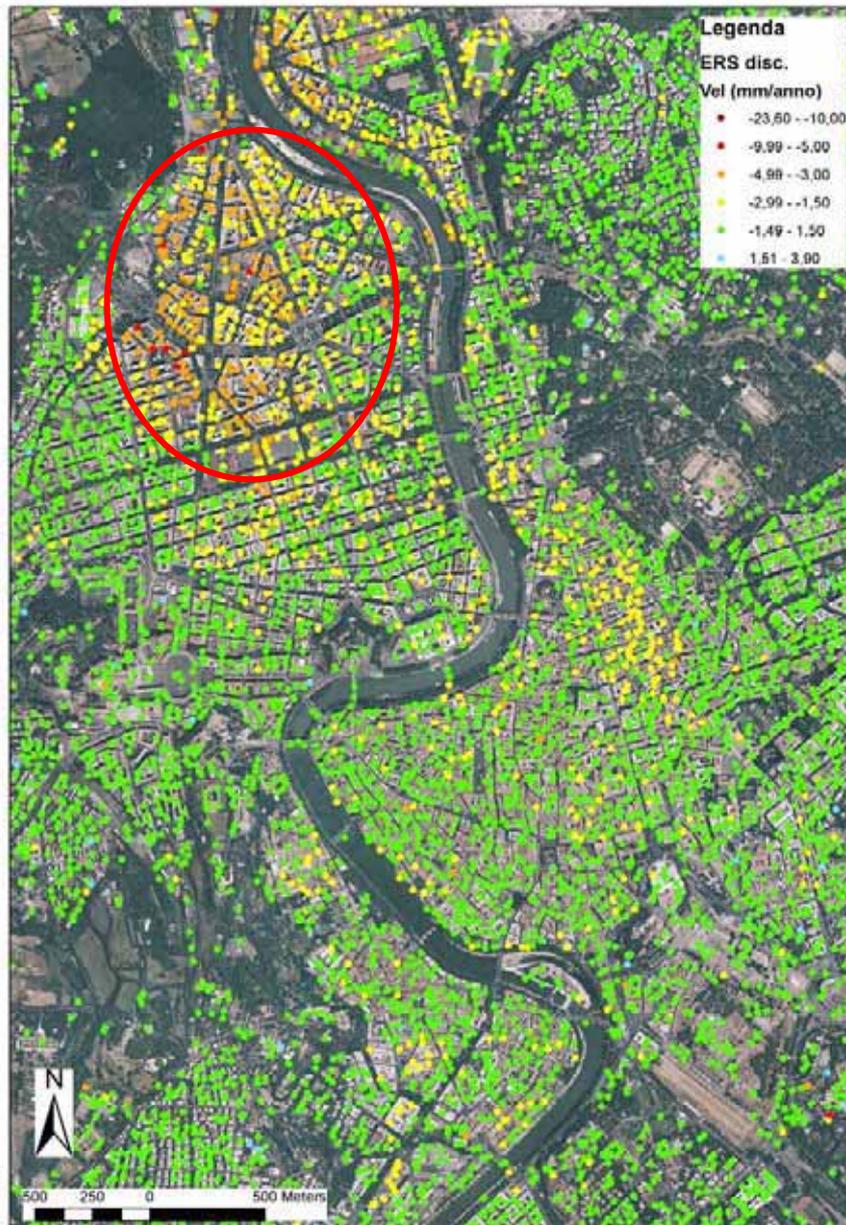
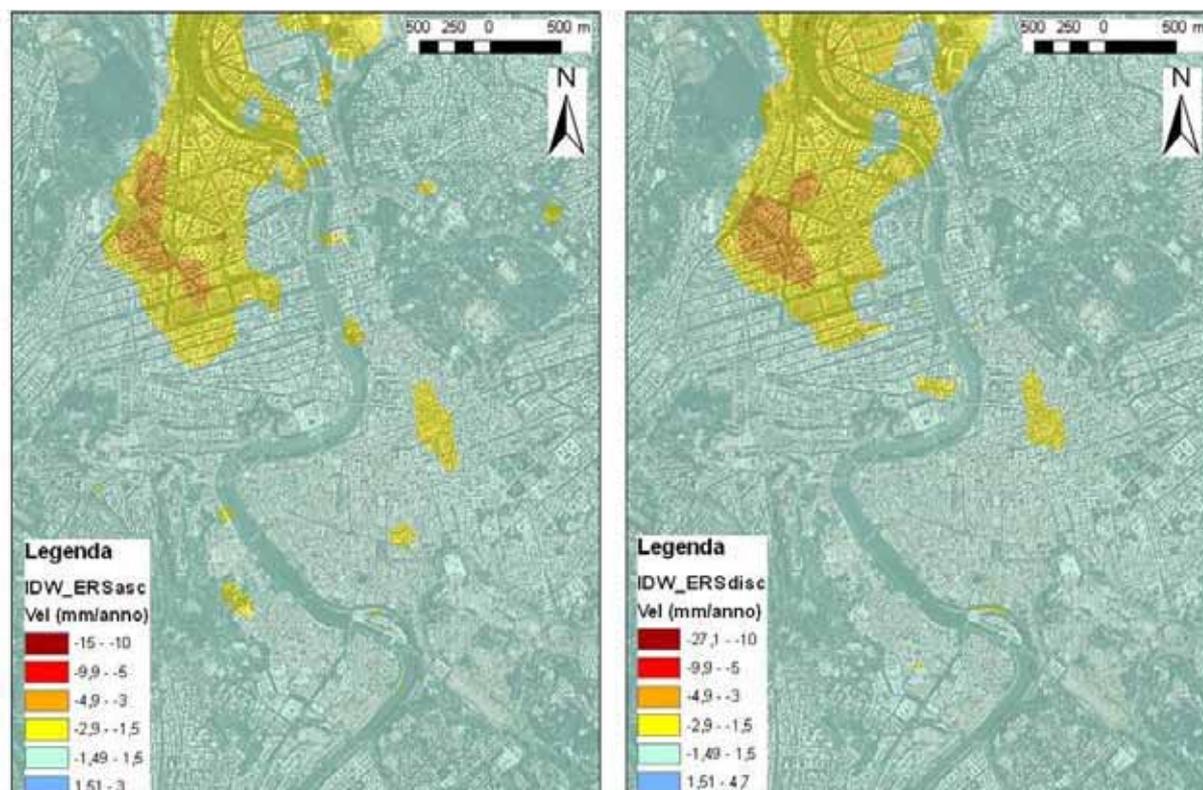


Figura 71: Distribuzione dei PS ERS1/2 discendenti nell'area del Centro Storico. Cerchiata in rosso l'area di Piazza Mazzini.



**Figura 72:** La quasi corrispondenza delle aree in movimento tra le due mappe di velocità ottenute dall'interpolazione dei PS ERS ascendenti (a sinistra) e discendenti (a destra) tramite l'algoritmo IDW conferma la natura prevalentemente verticale del movimento.

#### Periodo 2003 - 2007 (dati RADARSAT)

Anche dalla distribuzione dei dati RADARSAT risulta molto evidente l'area di Piazza Mazzini soggetta a subsidenza e il centro storico caratterizzato da una sostanziale stabilità (Figura 73). Come suggerito da Campolunghi et alii (2007), si può ipotizzare che i depositi alluvionali in quest'area, soggetti al carico degli edifici storici e dei terreni di riporto già da migliaia di anni, abbiano completato il loro processo di consolidamento e non siano più soggetti a subsidenza.

Per la zona di Piazza Mazzini i fenomeni di subsidenza possono essere attribuiti ad un relativo più recente processo di urbanizzazione, rispetto alla città storica. La costruzione di questo settore del quartiere Prati, detto della Vittoria o Mazzini, è iniziato intorno al 1915 (come testimoniato dal confronto tra le carte geologiche storiche di Tellini, 1893 e Verri, 1915, Figura 75) ed è terminato intorno al 1930. Dal confronto tra le carte storiche e i dati PS si vede come i valori delle velocità in allontanamento aumentano in valore assoluto nella zona edificata dopo il 1915. Ciò è in accordo con il fatto che il cedimento dei terreni decresce in funzione del tempo (Figura 74 e Figura 75), perciò le aree di più antica urbanizzazione risultano essere le più stabili.

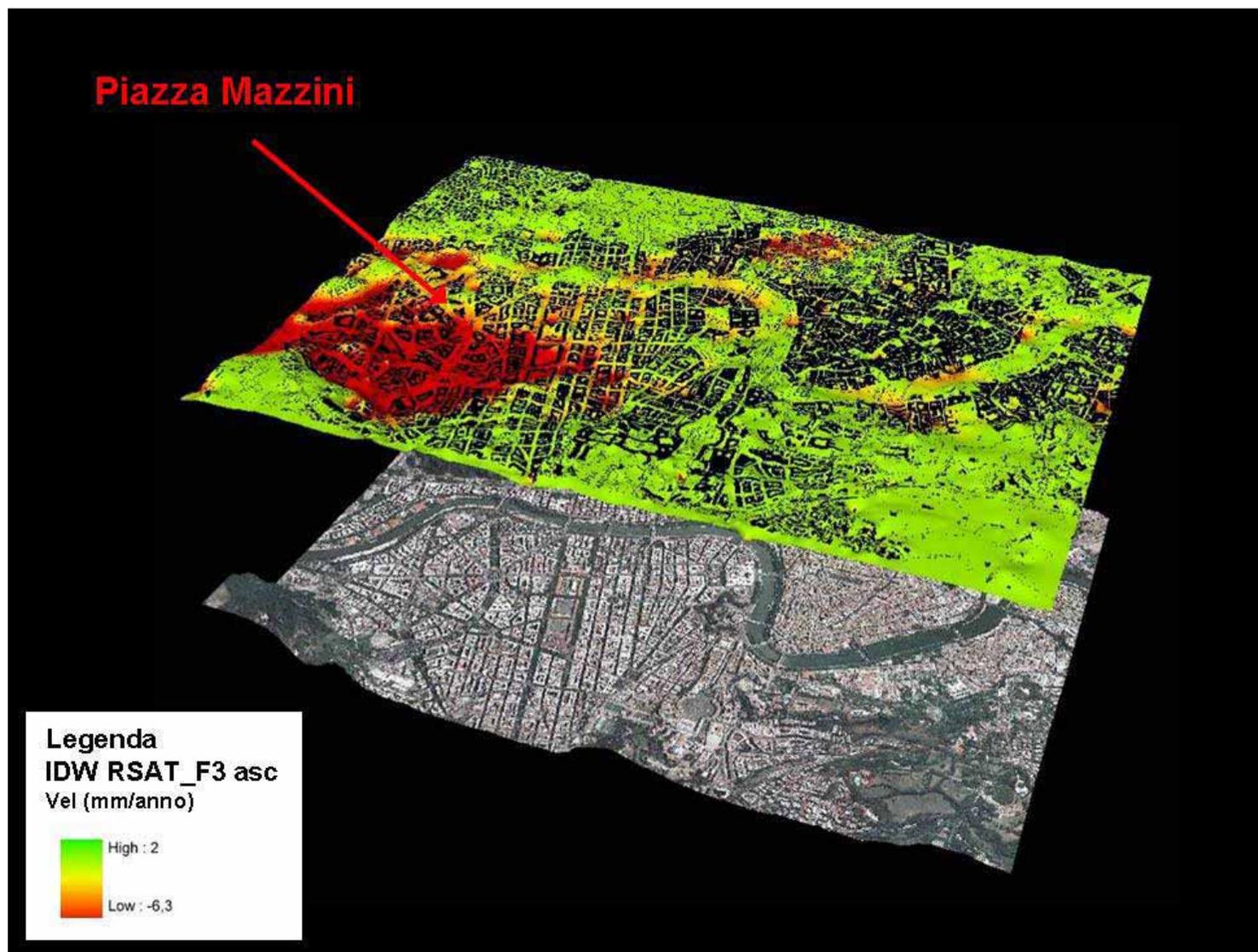


Figura 73 - Sopra: 3D della mappa delle velocità del centro storico ottenuta dall'IDW dei PS RADARSAT F3 ascendenti, proiettata in base ai valori delle velocità medie. Sotto: 3D dell'ortofoto proiettata in base alla quota, da cui si vede l'intenso grado di urbanizzazione dell'area in subsidenza.

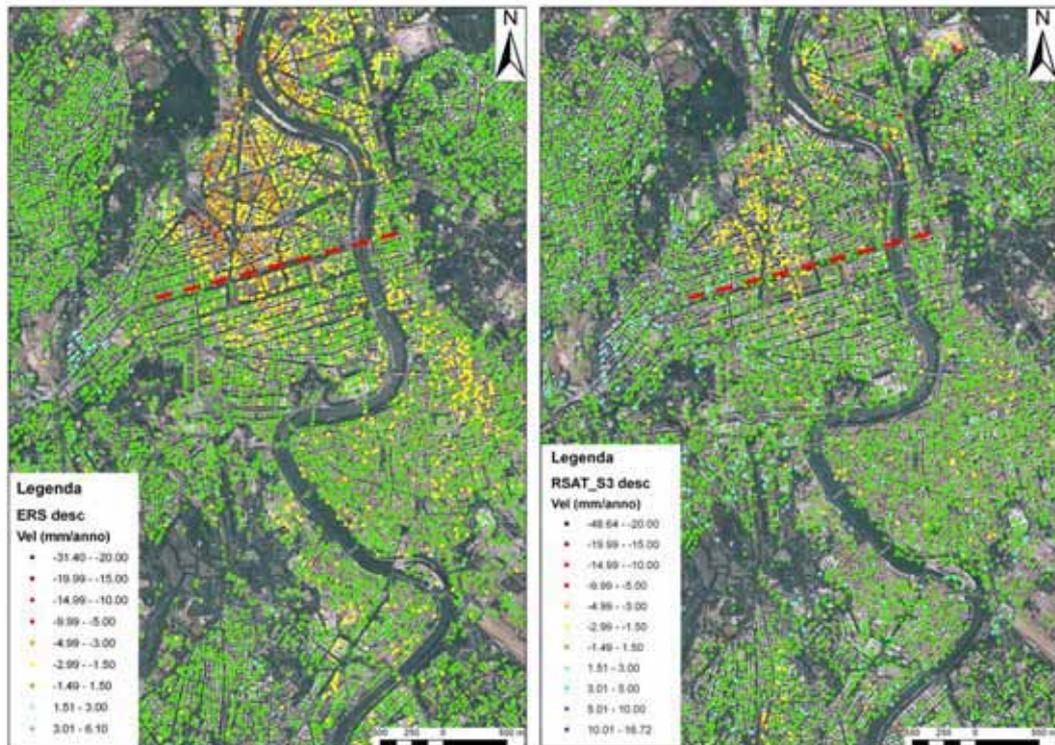


Figura 74: Distribuzione dei PS ERS e RADARSAT-S3 discendenti nell'area del centro storico. La linea tratteggiata separa l'area del Quartiere Prati dove si registrano le maggiori deformazioni.

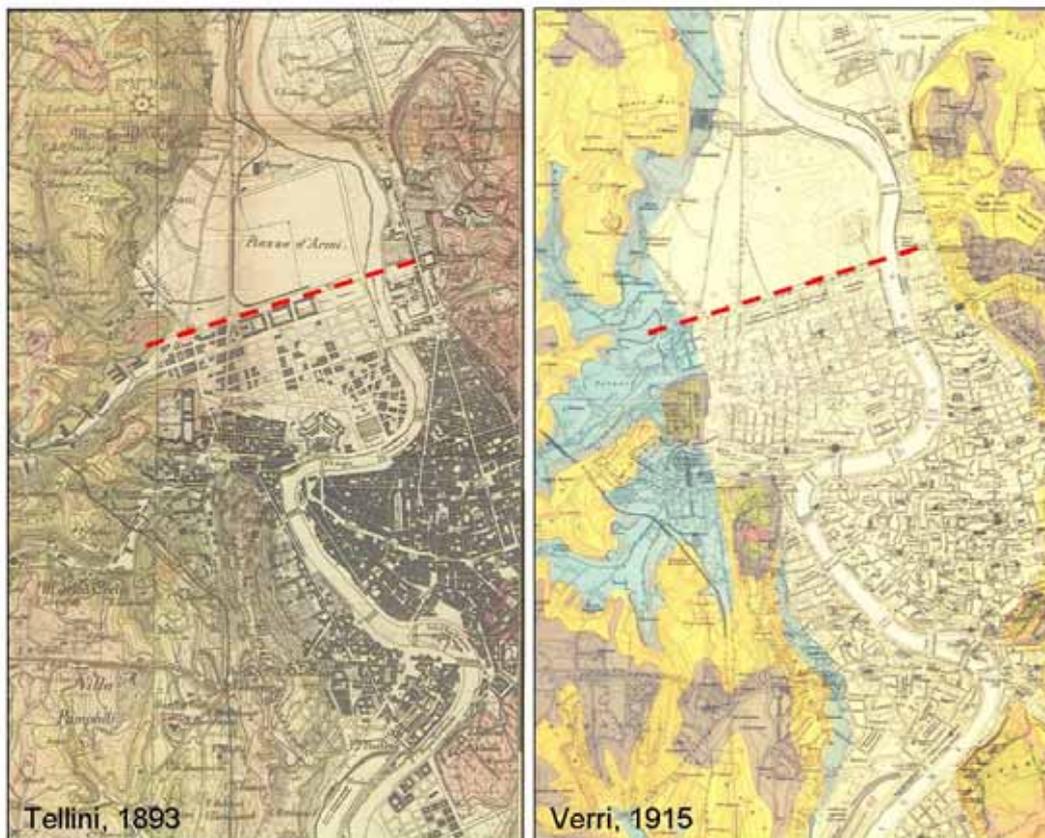


Figura 75: Particolare di carte geologiche storiche (sinistra: Tellini, 1893; destra: Verri, 1915) del centro storico di Roma. La linea tratteggiata separa l'area del Quartiere Prati dove i PS ERS e RADARSAT registrano le maggiori deformazioni da quella dove si registra una sostanziale stabilità. Si deduce che l'area in cui si hanno gli spostamenti maggiori sono quelle di più recente urbanizzazione (terminata negli anni '30). Per la legenda delle carte geologiche si fa riferimento alla bibliografia.

Al fine di interpretare la distribuzione spaziale delle deformazioni, le cui velocità aumentano in prossimità delle pendici del colle di “Monte Mario”, sono stati acquisiti i dati di sottosuolo da integrare a quelli di superficie. I sondaggi disponibili nell’area (da Ventriglia, 2002) sono stati interpretati e classificati sulla base delle caratteristiche litologiche e geotecniche.

In Figura 76 i sondaggi interpretati più rappresentativi sono ubicati sulla mappa della distribuzione dei PS RADARSAT-S3 ascendenti nella zona del centro storico, e sono di seguito descritti:

Sondaggio 1. il sondaggio è ubicato nei pressi di Piazza Mazzini, laddove inizia l’area in cui si registrano le maggiori deformazioni. La stratigrafia fornisce uno spessore di circa 35 m di materiale comprimibile (argille silteose e argille con torba, rappresentate con colori grigi), ma il sondaggio non arriva alle argille plioceniche, che rappresentano il *bedrock* dell’area romana.

Sondaggio 2. il sondaggio è ubicato al margine dell’area alluvionale, prima delle pendici di Monte Mario dove affiorano le argille plioceniche. Questo sondaggio incontra il substrato ad una profondità di 64 m dal piano campagna, ma non fornisce informazioni sulla stratigrafia.

Sondaggio 3. il sondaggio si trova al limite tra l’area stabile e quella leggermente coinvolta dalle deformazioni. La stratigrafia fornisce uno spessore 23 m di materiale comprimibile e il substrato viene incontrato a 40 m dal p.c.;

Sondaggio 4. questo sondaggio si trova in un’area pressoché stabile in cui si registrano deformazioni puntuali sparse. La stratigrafia indica però un alto spessore di depositi ad elevata comprimibilità (50 m) e un substrato profondo circa 58 m dal p.c.;

Sondaggio 5. il sondaggio si trova in un’area con velocità assimilabili alla precente ma con una diversa litologia: lo spessore delle litologie comprimibili è ridotto a circa 10 m e fino alla fine del sondaggio si incontrano depositi a bassa comprimibilità (sabbie);

Sondaggio 6. l’ultimo sondaggio è ubicato nell’ansa del centro storico del Tevere, in cui il carico dei fabbricati agisce da migliaia di anni, per cui le velocità di subsidenza fornite dai PS rientrano nell’intervallo di stabilità, nonostante il forte spessore dei depositi comprimibili (circa 45 m) e l’elevata profondità del substrato (non intercettato dal sondaggio che è terminato a 60 m dal p.c.).



L'integrazione dei dati di superficie (PS e urbanizzazione) e quelli di sottosuolo (sondaggi) hanno fornito le seguenti informazioni:

- l'elevata velocità registrata dai PS nell'area di Piazza Mazzini è legata alla profondità del substrato e allo spessore dei depositi comprimibili, ma anche all'urbanizzazione iniziata in tempi più recenti (a partire dal 1915);
- nell'area subito a S di Piazza Mazzini e nel centro storico di Roma il maggiore tempo di urbanizzazione ha fatto sì che diminuissero o terminassero i processi di consolidamento dei depositi alluvionali ad elevata comprimibilità e dei riporti.

### **5.3.2 Caratterizzazione temporale (*Back-monitoring*): la stazione Garibaldi di Napoli**

L'analisi delle serie temporali di spostamento dei PS permette di valutare le variazioni nel tempo delle deformazioni individuate dalla distribuzione dei dati PS classificati in funzione dei valori di velocità media dell'intero intervallo temporale di acquisizione delle immagini satellitari. Dalle serie storiche è stato possibile ottenere informazioni non direttamente intuibili dalla visualizzazione delle velocità medie. E' infatti possibile individuare all'interno dei valori di spostamento dei fenomeni di stagionalità del moto, andamenti di tipo non lineare o incrementi nelle velocità di spostamento (accelerazioni).

Nell'area in esame, i dati PS RADARSAT ascendenti mostrano un'area con velocità in allontanamento rispetto al satellite lungo il prolungamento della Linea 1 della metropolitana, in corrispondenza degli scavi per la stazione Garibaldi, situata di fronte alla stazione ferroviaria Napoli Centrale (Figura 77).

Per quest'area è stata fatta un'elaborazione APSA del *dataset* RADARSAT di grande accuratezza che ha fornito un'elevatissima densità di punti (1.784 PS/km<sup>2</sup>) e serie temporali molto dettagliate, al fine di valutare nel modo più accurato possibile le deformazioni osservate ed individuare l'estensione degli effetti deformativi sull'urbanizzato circostante.

I lavori per la costruzione della stazione Garibaldi sono cominciati nel dicembre 2000 (Figura 78 e Figura 79) e la realizzazione dell'opera ha richiesto la risoluzione di diverse problematiche, quali l'alta densità urbana dell'area ed il fatto che lo scavo sia avvenuto in falda.

Come si deduce dalla Carta Idrogeologica della Provincia di Napoli (Corniello et al., 1999 - Figura 80), la tratta metropolitana tra la stazione Dante e la stazione Garibaldi è interamente in falda, in quanto le 2 gallerie di linea corrono ad una quota media di circa 35 m sotto il livello del mare ([www.impregilo.it](http://www.impregilo.it)). In particolare, nell'area di scavo della stazione Garibaldi la falda è stata incontrata a 3,1 m s.l.m. (De Sanctis et al., 2006). In Figura 81 è riportata la stratigrafia dei terreni attraversati in fase di scavo e la quota della falda: lo scavo interessa circa 35 m di terreno in falda.



Figura 77: Distribuzione dei PS RADARSAT ascendenti nell'area della Stazione di Napoli Centrale. Cerchiata in rosso l'area in subsidenza osservata nella zona di Piazza Garibaldi.

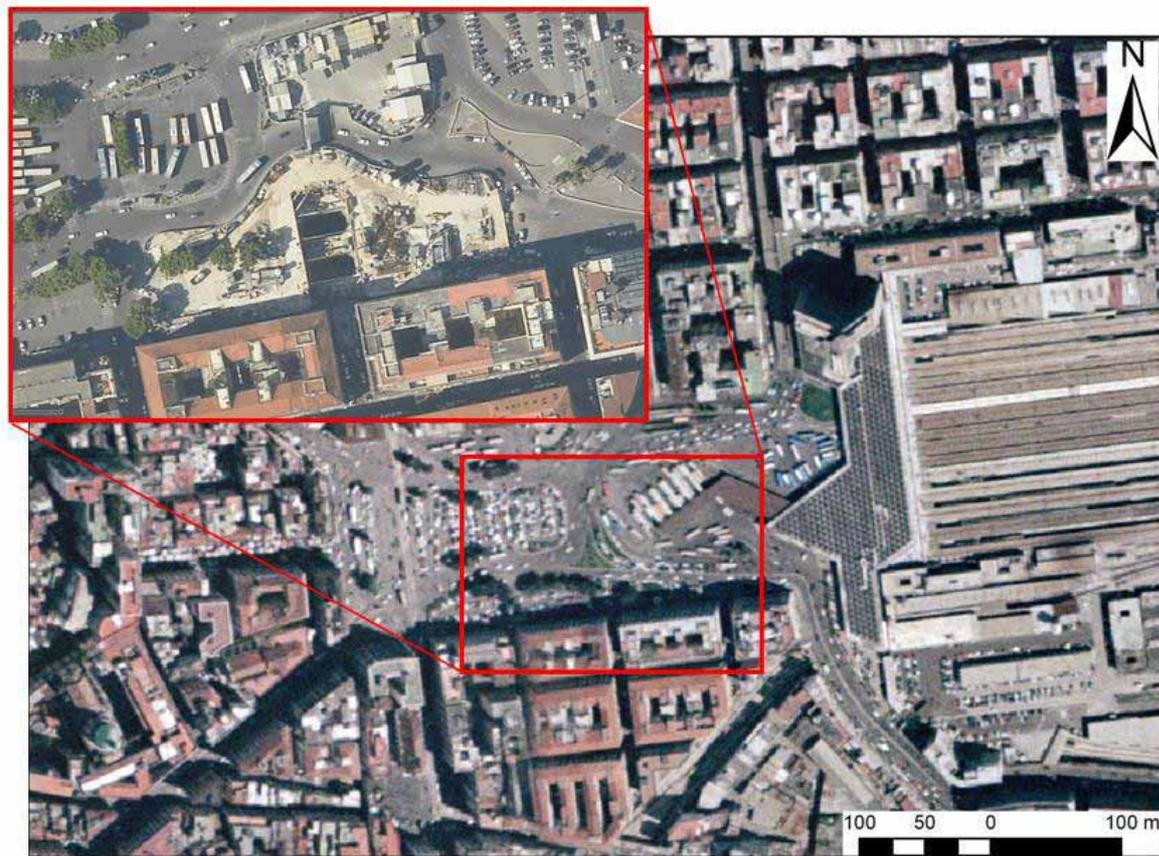


Figura 78: Ortofoto del Volo Italia 2000 dell'area di Piazza Garibaldi. Nel riquadro l'area di scavo della stazione metropolitana Garibaldi su ortofoto del 2007 da [www.paginegiallevisual.it](http://www.paginegiallevisual.it).

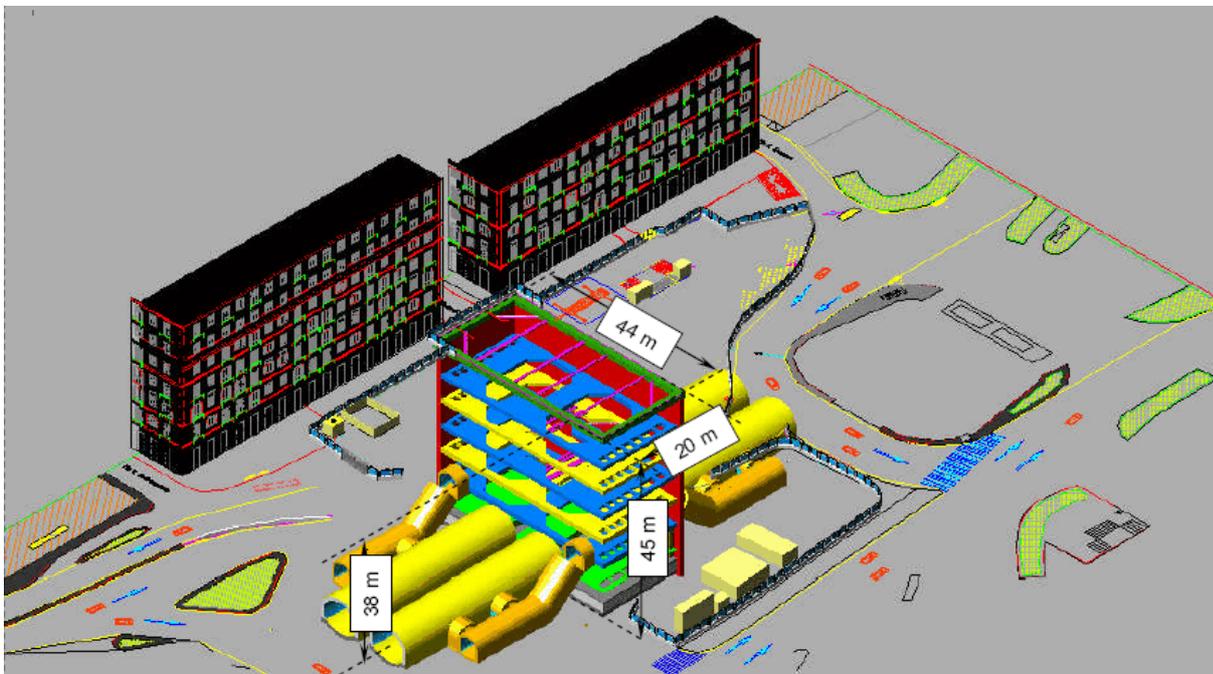


Figura 79: Schema progettuale della stazione metropolitana Garibaldi. Il pozzo di stazione ha una sezione di 44 x 20 m ed una profondità di 45 m (De Sanctis *et al.*, 2007).

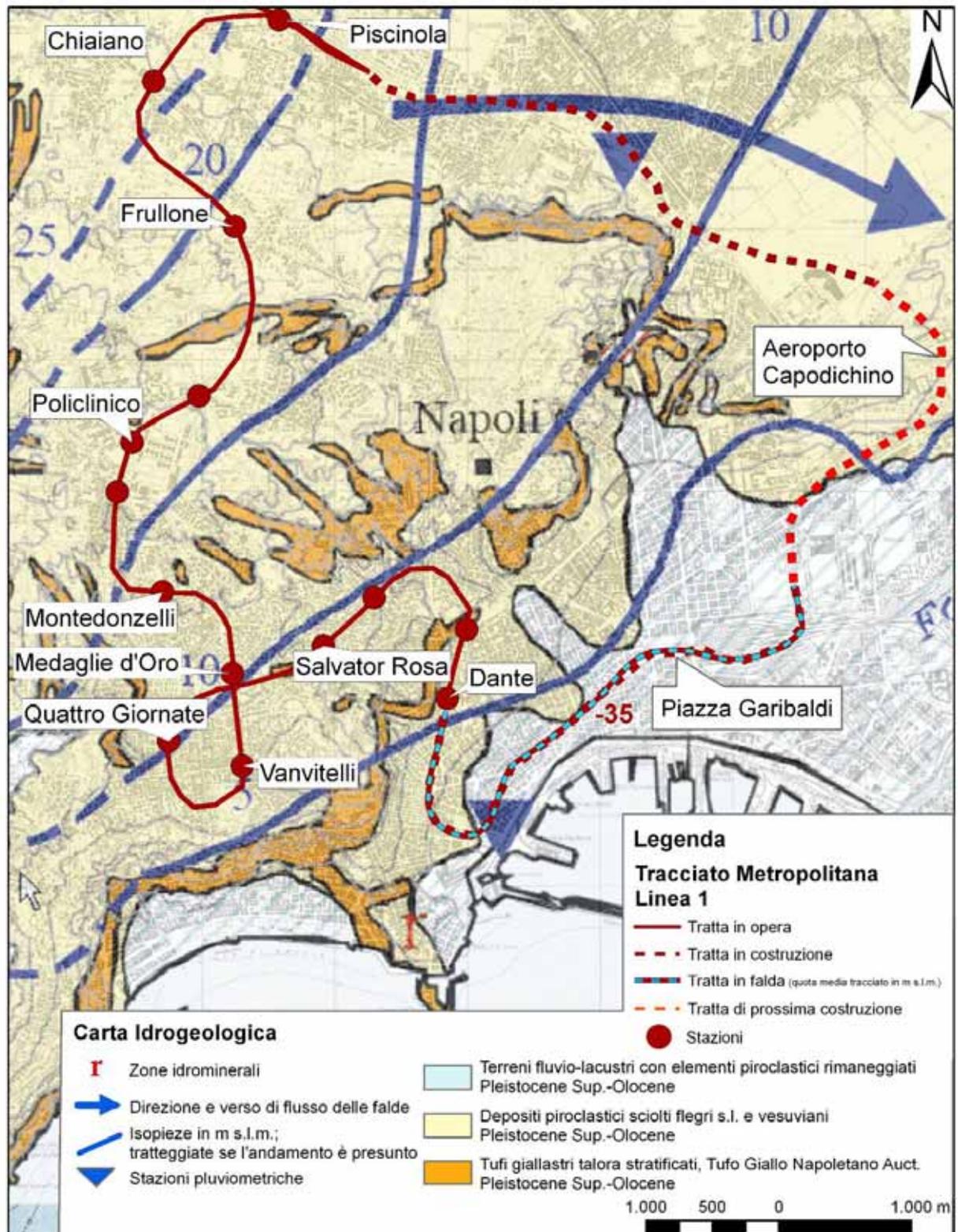


Figura 80: Carta Idrogeologica della Provincia di Napoli (modificata da Corniello et al., 1999). Alla Carta Idrogeologica è stato sovrapposto il tracciato della Linea 1 della metropolitana per evidenziare la “Tratta Bassa” in falda.

Tra il 2003 e il 2005 sono stati realizzati il pozzo e le 8 gallerie di stazione, 4 di banchina e 4 di discenderia; il progetto ha previsto uno scavo per il pozzo centrale di attacco delle gallerie di 44 x 20m di sezione e 45 m di profondità (Figura 79). Per contenere al massimo gli spostamenti prodotti dalle operazioni di scavo, sono stati installati 6 livelli di ancoraggi (Figura 81). La tecnica utilizzata per lo scavo della parte basale del pozzo e delle gallerie, interamente in falda, è stata quella del congelamento del terreno. Questa consiste nel congelare l'acqua contenuta nei pori delle terre rendendo l'insieme solido ed impermeabile. L'impiego di azoto liquido refrigerante a perdita consente un rapido congelamento del terreno, generalmente entro alcune ore.

Dall'analisi *Permanent Scatterers* effettuata sui dati RADARSAT è stato possibile seguire l'evolversi delle deformazioni associate alle diverse fasi di avanzamento dei lavori di realizzazione della stazione.

In Figura 83 le serie temporali dei dati PS situati di fronte l'edificio B (Figura 82) sono state suddivise in base alle diverse fasi di avanzamento dei lavori, al fine di valutare quale fase ha causato le maggiori deformazioni superficiali:

1. Scavo del pozzo e installazione degli ancoraggi (Ottobre 2002 – Ottobre 2004): ad un'iniziale fase di bassi tassi di deformazione, corrispondente allo scavo del pozzo di stazione, segue un aumento del valore della velocità in abbassamento, corrispondente all'installazione degli ancoraggi ed in particolare all'installazione del livello di ancoraggi B. Tali ancoraggi interessano depositi sabbiosi di origine marina, con caratteristiche geotecniche, quali basso indice dei pori ( $e_0$ ) ed elevata permeabilità ( $k$ ), causa di problemi in fase di installazione. Si nota infatti un incremento delle velocità che può essere ricondotto alla imperfetta tenuta degli ancoraggi, causando movimenti del terreno e conseguente deformazione degli edifici sovrastanti. In Figura 84 viene effettuato il confronto tra i dati di monitoraggio con la livellazione topografica di precisione e quelli PS. Non è possibile un confronto quantitativo delle deformazioni poiché non vi sono PS ubicati in corrispondenza dei capisaldi, ma è possibile confrontare il *trend* delle deformazioni. Viene riportato un intervallo della serie temporale corrispondente all'intervallo dei dati di monitoraggio disponibili: si nota come i 2 incrementi di velocità misurati dai dati di livellazione vengono individuati anche nella serie temporale del PS.
2. Congelamento (Novembre 2004 – Giugno 2005): questa fase, della durata di circa un anno, non ha causato incrementi deformativi. La tecnica del congelamento adottata per lo scavo delle gallerie, ha permesso di minimizzare la trasmissione in superficie degli effetti dello scavo.
3. Scavo delle gallerie di stazione – Rivestimento definitivo – Scongelo (Luglio 2005 – Febbraio 2006): dalle serie temporali si nota che è questa la fase che ha causato le maggiori deformazioni. Tale fase ha prodotto uno spostamento in allontanamento dal sensore, calcolato sul PS A3AAO, di 19.7 mm in 8 mesi, misurato lungo la LOS. Tale spostamento rappresenta il 51% dello spostamento totale registrato in 3 anni di acquisizione. Confrontando le serie storiche del PS A3AAO (posizionato davanti l'edificio B, fronte-scavo) e A28YZ (posizionato sull'edificio B – lato V. Giuseppe Pica) in Figura 85 si vede che la parte dell'edificio B lato V. Giuseppe Pica, che fino ad ora non aveva risentito degli scavi, durante la fase di scongelamento è interessata da subsidenza con una velocità di 9,4 mm/anno, misurata lungo la LOS.
4. Misure preventive di consolidamento dei fabbricati (Marzo 2006 – Giugno 2007): non è stato possibile recuperare dati sulle tecniche di consolidamento adottate, ma è possibile valutarne gli effetti. All'inizio di questa fase si vede un leggero decremento delle velocità di subsidenza, segno che le misure adottate hanno rallentato i processi deformativi, ma dopo 9 mesi la subsidenza è ripresa con una velocità di 8,5 mm/anno.

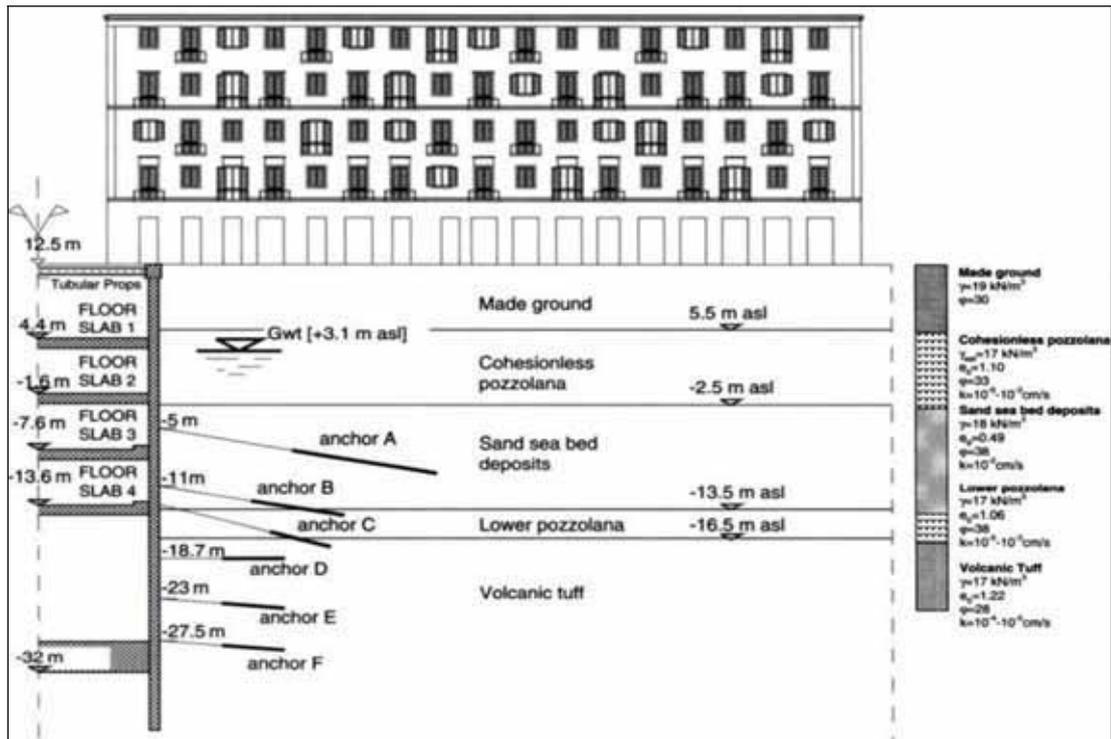
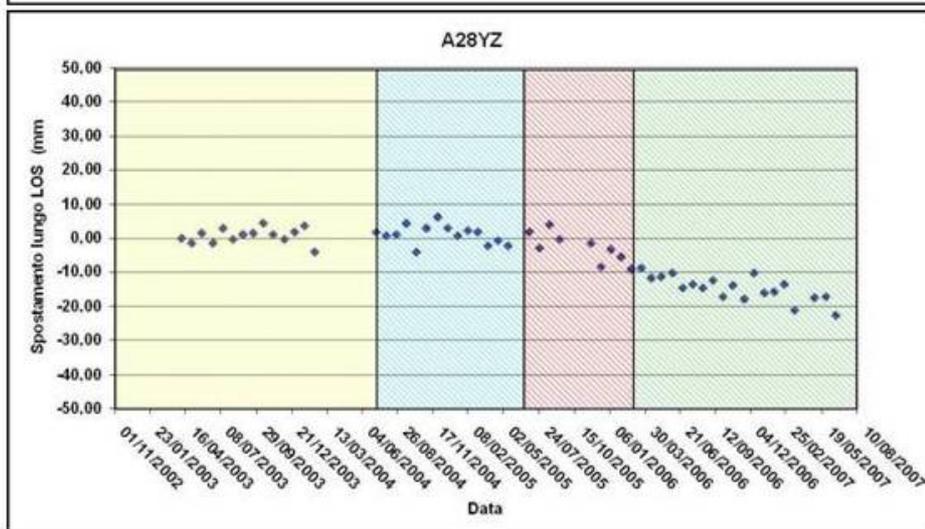
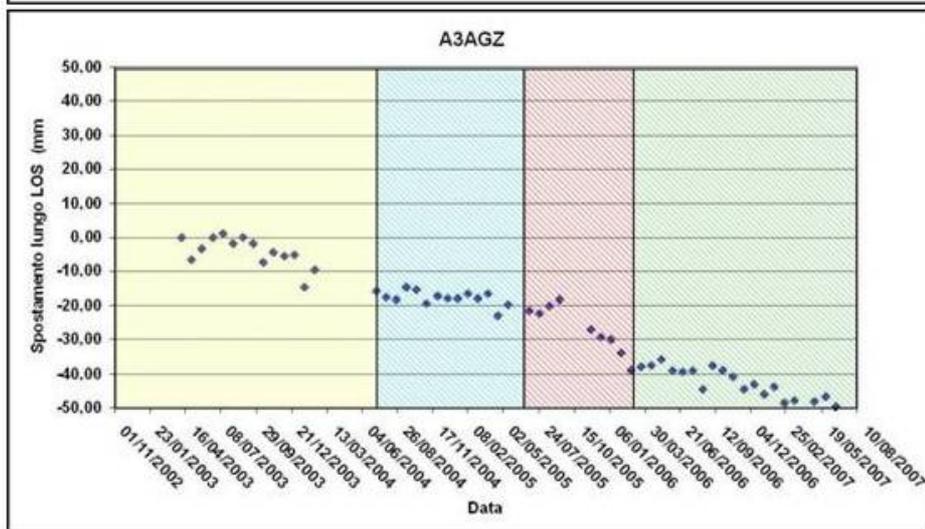
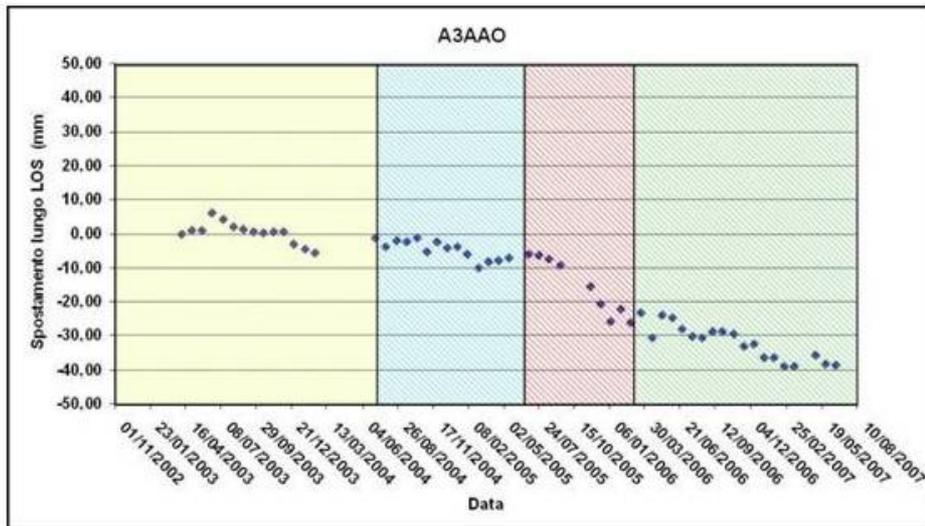


Figura 81 – Sezione del pozzo della stazione Garibaldi e posizione dei livelli di ancoraggio. A destra stratigrafia schematica dei depositi attraversati e loro caratteristiche geotecniche (modificato da De Sanctis *et al.*, 2006).



Figura 82 – Distribuzione dei dati PS RADARSAT ascendenti con elaborazione APSA nell'area di scavo di P.za Garibaldi e ubicazione dei PS di Figura 83.



**Fasi di avanzamento**

 Scavo del pozzo e installazione degli ancoraggi	 Scavo gallerie di stazione – Rivestimento - Scongellamento
 Congelamento	 Misure preventive di consolidamento dei fabbricati

Figura 83: Individuazione all'interno delle serie temporali dei PS RADARSAT discendenti delle deformazioni causate dalle diverse fasi di avanzamento dei lavori di scavo per il prolungamento della Linea 1.

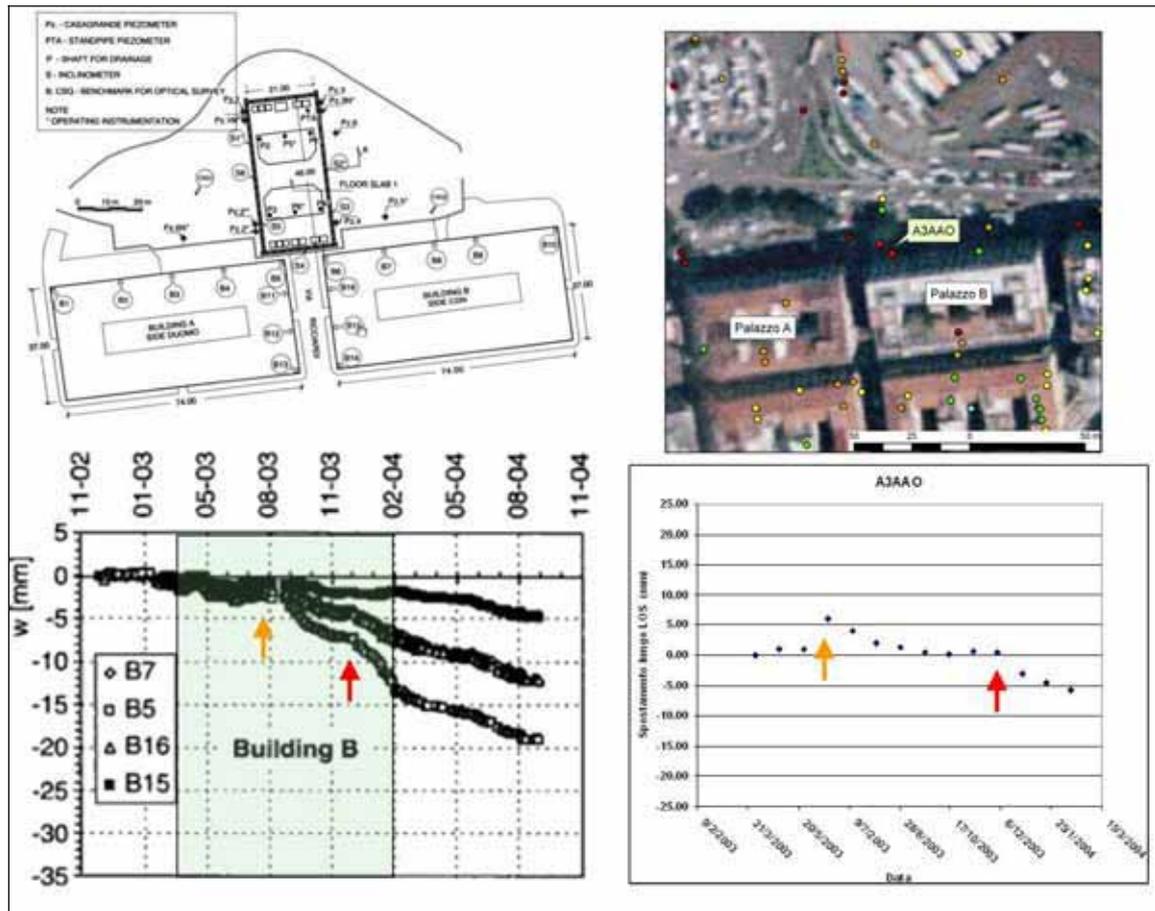
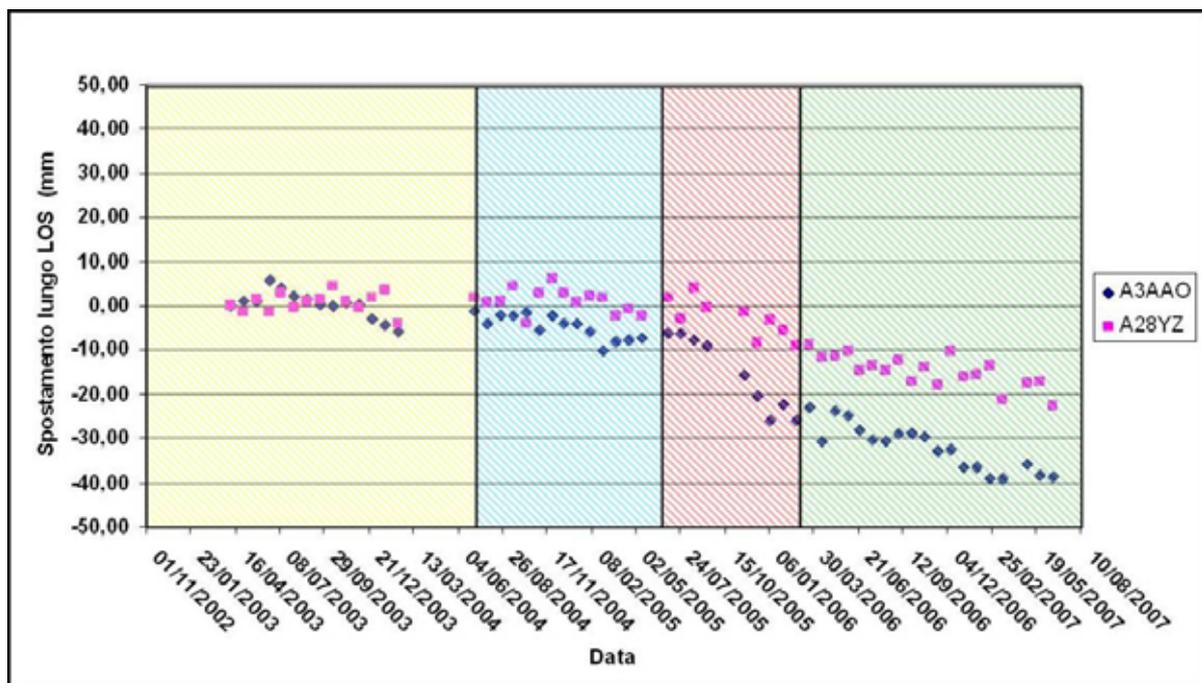


Figura 84: Confronto tra i dati di monitoraggio con livellazione topografica di precisione e una serie temporale di un PS RADARSAT ascendente. Il confronto tra i dati del monitoraggio sui capisaldi individuati in pianta e il PS viene effettuato nell'intervallo nel riquadro verde. Le frecce indicano i due incrementi nelle deformazioni misurate con entrambe le tecniche. Per la legenda con gli intervalli di velocità dei PS si fa riferimento alla Figura 83



**Figura 85: Confronto tra le serie temporali di 2 PS RADARSAT ascendenti individuati in Figura 82. Si vede come il PS A28YZ, ubicato sul retro dell'edificio B, abbia risentito dei lavori di scavo solo in seguito alla fase di scongelamento e di scavo delle gallerie. Per la legenda si rimanda alla Figura 83.**

Per valutare l'estensione dell'area in cui si sono registrate deformazioni riconducibili agli scavi ed individuare gli edifici che ne hanno risentito, le serie temporali dei PS RADARSAT sono state suddivise in intervalli temporali corrispondenti alle 4 fasi di scavo e per ognuno di essi è stata calcolata la velocità di deformazione media, corrispondente al coefficiente angolare della retta di regressione degli spostamenti nel tempo. La fase 2 e la 3 sono state unite in quanto sono risultate singolarmente troppo brevi perché la regressione lineare sulle poche immagini acquisite avesse valore significativo. La distribuzione dei valori di velocità media dei PS nelle 3 fasi risultanti è stata rappresentata tramite istogrammi di frequenza, suddividendo le velocità medie in classi di frequenza di 0,5 mm/anno (Figura 86). I valori di velocità media di spostamento nelle 3 fasi sono stati interpolati tramite l'algoritmo IDW al fine di rappresentare spazialmente l'informazione puntuale fornita dai dati PS (Figura 87). Queste elaborazioni hanno portato alle seguenti considerazioni finali:

1. Durante la prima fase le deformazioni hanno interessato solamente l'area nelle immediate vicinanze dello scavo ed il retro dei palazzi che si affacciano sul cantiere non ha subito cedimenti. Dall'istogramma risulta che le velocità dei PS si concentrano principalmente nell'intervallo di velocità definito stabile (+1,5 mm/anno/-1,5 mm/anno) e sono pressoché egualmente distribuiti nelle classi di frequenza vicine.
2. Nella seconda e terza fase le deformazioni associate agli scavi hanno coinvolto tutto l'urbanizzato circostante nel raggio di circa 130 m ed il numero di PS con velocità assunte come stabili è diminuito, mentre è aumentato quello dei PS con velocità comprese nell'intervallo -1,5/-5 mm/anno. Nella seconda fase (quella del congelamento dei terreni in falda) i PS ubicati a ridosso del cantiere hanno velocità negative mentre i PS più distanti non registrano deformazioni. Ciò implica che l'incremento delle velocità individuato nelle serie temporali è iniziato nella fase di scongelamento.
3. Nella quarta fase le velocità medie si spostano nettamente verso i valori negativi e l'area che accusa cedimenti indotti dagli scavi presenta un raggio minimo di 200 m. Si deduce che lo scavo delle gallerie di stazione e lo scongelamento del terreno in falda ha portato ad un incremento nei tassi di subsidenza e ha causato deformazioni nei terreni circostanti. Tali deformazioni si sono estese sino a coinvolgere l'urbanizzato per un'area minima di 125.000 m<sup>2</sup>. Inoltre, come è già stato evidenziato dall'analisi delle singole serie temporali, il consolidamento dei fabbricati ha avuto un effetto a breve termine ed è individuabile solo nelle serie temporali dei PS ubicati sugli edifici nei pressi dell'area di scavo.

I risultati ottenuti con questa elaborazione, oltre a confermare ciò che era stato osservato dall'analisi delle singole serie temporali, hanno permesso di analizzare l'evoluzione spaziale delle deformazioni indotte dagli scavi e l'incremento dei tassi di deformazione.

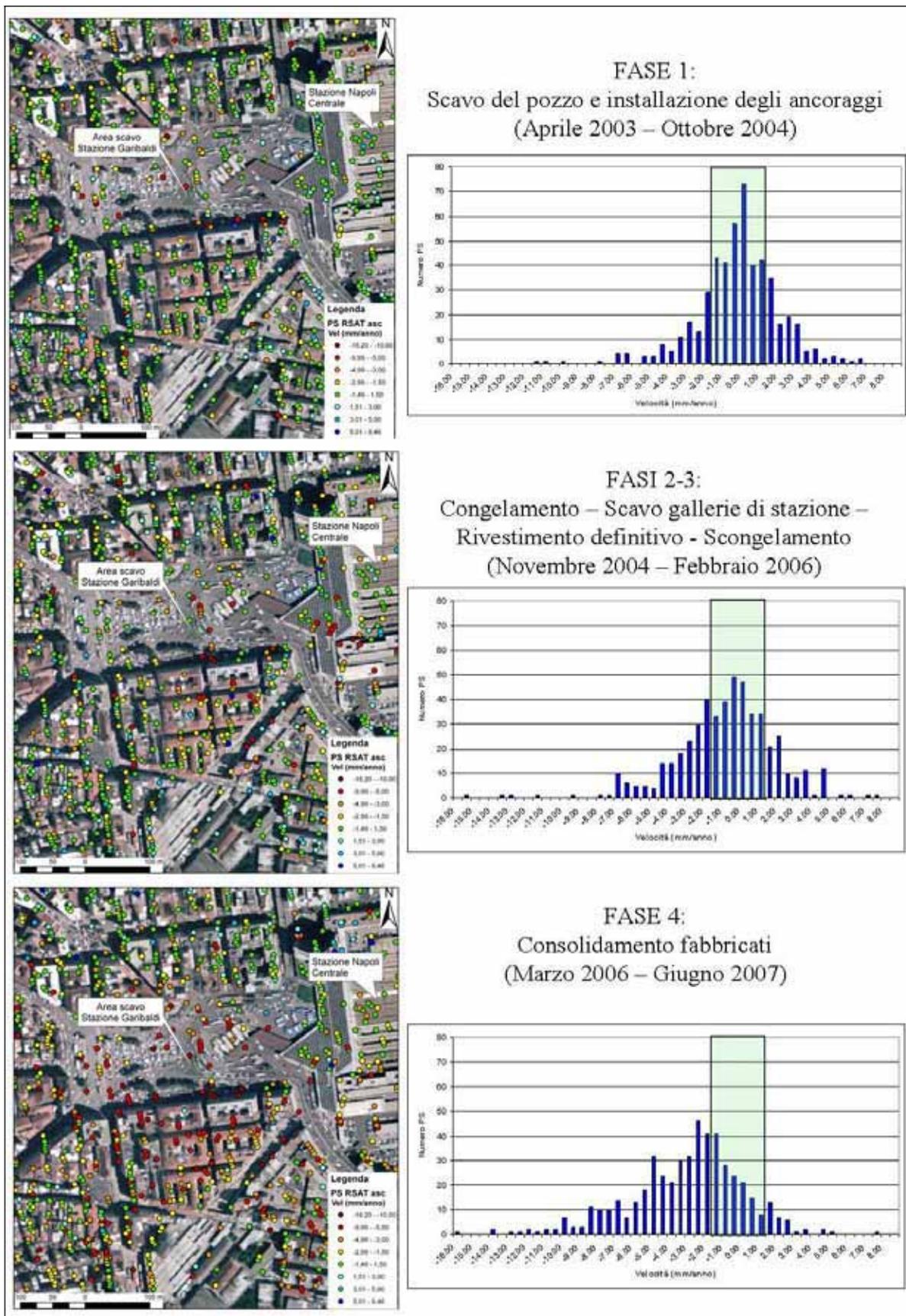
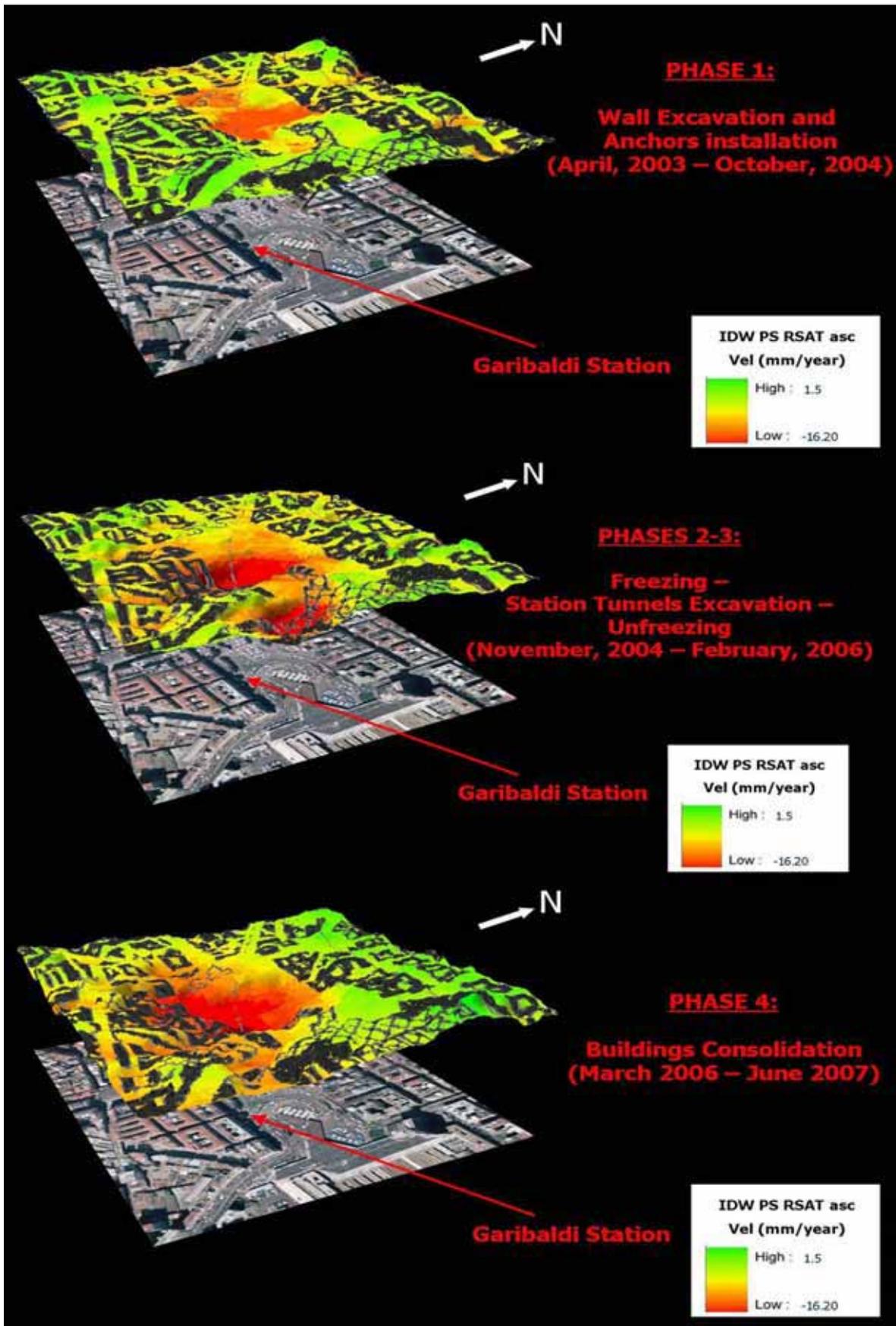


Figura 86: Distribuzione dei PS RADARSAT ascendenti nell'area degli scavi per la realizzazione della stazione metropolitana "Garibaldi" ed i relativi istogrammi di frequenza delle classi di velocità con nel riquadro l'intervallo di velocità definito stabile (+1.5 mm/anno/-1.5 mm/anno). I PS sono classificati in funzione delle velocità medie durante le diverse fasi di avanzamento lavori. Si vede come con il procedere

della realizzazione dell'opera si sia estesa l'area in cui si registrano cedimenti indotti dagli scavi e siano aumentati i tassi di deformazione.



**Figura 87 – Mappe di velocità dell’area degli scavi per la realizzazione della stazione metropolitana “Garibaldi” ottenute dall’interpolazione dei valori di velocità media dei dati PS RADARSAT ascendenti in funzione le diverse fasi di avanzamento lavori. Viene così visualizzata l’evoluzione spaziale delle deformazioni indotte dagli scavi e l’incremento dei tassi di deformazione.**

## 6 UTILIZZO DATI PS NEL TEMPO REALE

L'utilizzo dei dati interferometrici satellitari nel tempo reale, ovvero in "quel periodo misurabile in mesi, in cui deve svilupparsi e determinarsi l'efficacia dell'azione urgente e generalmente non permanente di protezione civile" (Dir. P.C.M., 2004) deve essere in grado di fornire la misura di parametri indicativi dell'evoluzione a breve termine dei dissesti in atto. Le informazioni ottenute dall'interpretazione dei dati satellitari possono essere impiegati a supporto delle attività di protezione civile nelle fasi di prevenzione e gestione dell'emergenza. I dati PS possono essere quindi utilizzati quale strumento operativo in grado di segnalare la presenza di comportamenti anomali di parametri indicativi dell'evoluzione dei dissesti in atto.

I dati raccolti e analizzati nel tempo reale devono concorrere ad identificare i livelli di criticità e, a fenomeno in atto, devono costituire uno strumento per la scelta delle attività di mitigazione del rischio. Le attività di protezione civile nel tempo reale spesso si esplicano con strategie di mitigazione del rischio indirizzate alla riduzione degli elementi esposti, tramite l'evacuazione delle aree instabili o l'interdizione dell'accesso a determinate aree o alla riduzione della vulnerabilità mediante la messa a punto di strumenti di monitoraggio in situ con funzione di sistemi di allertamento rapido (*early-warning*). In tale contesto si colloca l'utilizzo delle informazioni delle deformazioni superficiali fornite dai dati PS, in quanto consentono di identificare la presenza di moto precursori di un dissesto in atto e di individuare e mappare aree instabili che possono presentare il medesimo comportamento deformativo e che potrebbero evolvere in fenomeni distruttivi.

L'impiego dell'interferometria satellitare nel tempo reale quale tecnica di sorveglianza, sia su area vasta che a scala locale, implica il fatto di dover considerare i tempi necessari per arrivare ad un'interpretazione rapida dei dati PS. La catena operativa per l'interpretazione dei dati PS prevede diverse fasi, che vanno dalla segnalazione dell'area da monitorare da parte del DPC, all'acquisizione, *processing* e distribuzione dei dati satellitari, sino ad arrivare all'analisi per la valutazione delle condizioni di dissesto.

In Figura 88 vengono individuate le aree test in cui sono stati analizzati i dati PS per un uso operativo del dato interferometrico in fase di monitoraggio dei dissesti.



Figura 88 – Ubicazione delle aree test per il monitoraggio nel tempo reale dei movimenti di massa localizzati con dati PS (<http://maps.google.it/maps>). I dati PS sono stati analizzati nell'area test di Fagnano Castello (CS) per il monitoraggio di fenomeni franosi e nell'area test di Caltanissetta (CL) per un sistema di *early-warning* con dati satellitari.

## 6.1 Monitoraggio

L'utilizzo della tecnica InSAR satellitare a scopi di monitoraggio nel tempo reale consente di ottenere le misure degli spostamenti superficiali dei bersagli radar in aree individuate come soggette a dissesti, costituendo un efficace strumento per capire il comportamento del fenomeno in atto. Ciò permette di osservare la risposta del movimento ai fattori innescanti e l'efficacia di eventuali interventi di mitigazione. Queste caratteristiche fanno sì che le informazioni fornite dai dati PS possano essere utilizzate per la definizione di possibili scenari evolutivi del fenomeno, specialmente per quei dissesti che insistono su elementi a rischio di elevato valore, come nel caso di movimenti di massa che coinvolgono aree antropizzate.

Di seguito viene presentato il caso applicativo di Fagnano Castello (CS) nell'ambito del quale sono state valutate le potenzialità ed i limiti dell'utilizzo dei dati PS quale strumento operativo per il monitoraggio di fenomeni franosi. Tale caso di studio è stato segnalato dal DPC per una frana che ha coinvolto un'area urbanizzata, per la quale è stata richiesta una rapida analisi dei dati PS in una zona di cui non erano note informazioni a priori sulle condizioni di dissesto. In tempi rapidi sono stati quindi acquisiti tutti i dati ancillari necessari per effettuare l'analisi dei dati interferometrici. Ciò ha consentito di considerare i tempi minimi necessari per una valutazione dell'estensione delle aree

instabili, anche al di là delle zone in cui è avvenuto il dissesto o in cui si riconoscono rotture o spostamenti riconoscibili ad occhio nudo, ma dove tuttavia sono presenti movimenti millimetrici possibili precursori di ulteriori collassi di versante.

### 6.1.1 Fagnano Castello

In seguito ai dissesti verificatisi a Fagnano Castello (CS) (Figura 89) a partire dal 28 Gennaio 2009, su incarico del DPC, il Centro di Competenza del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Firenze (DST-UNIFI), in collaborazione con la società TRE, ha acquisito ed elaborato i dati satellitari disponibili per una valutazione rapida delle condizioni dei fenomeni franosi attivi. La segnalazione del DPC è arrivata a causa ad una frana, avvenuta in seguito ad eventi piovosi particolarmente intensi, che ha coinvolto un'area urbanizzata del centro abitato. L'analisi dei dati satellitari doveva fornire una rapida segnalazione di eventuali altre aree che presentavano simili condizioni deformative a quelle evolute in fenomeni calamitosi.

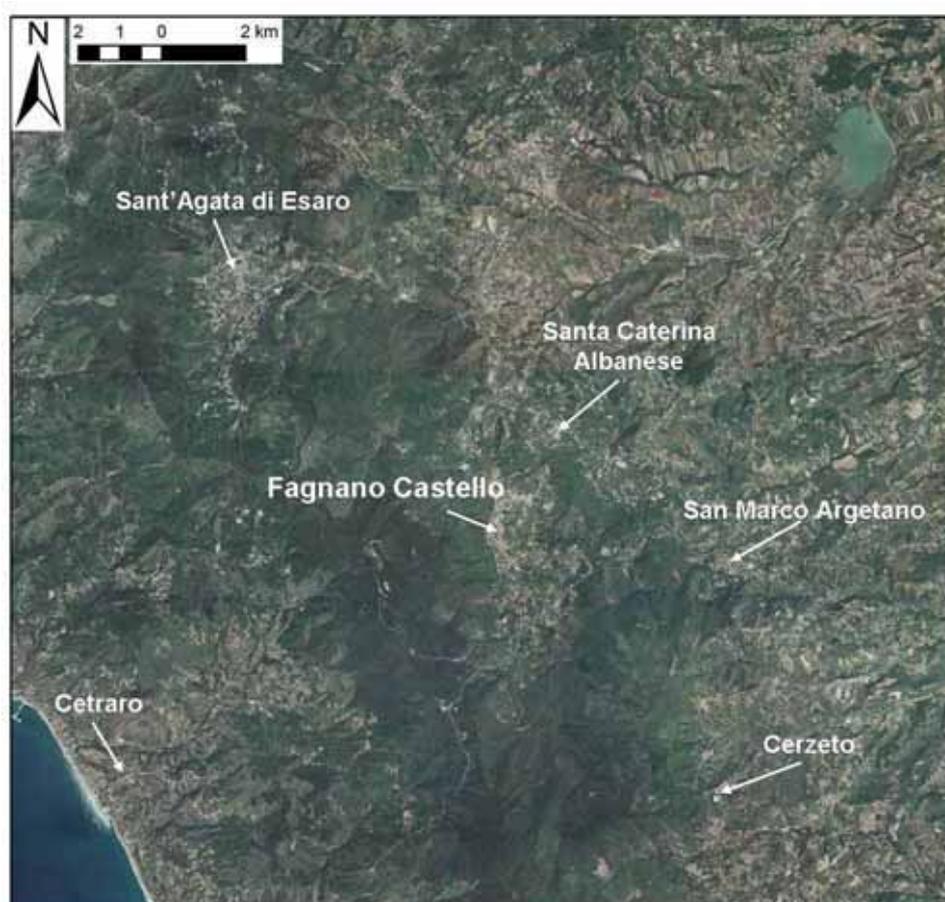


Figura 89 - Ubicazione dell'area oggetto di studio.

I dati satellitari sono stati aggiornati sino all'ultima immagine acquisita dal satellite RADARSAT e disponibile per essere elaborata. Ciò ha consentito di individuare le aree soggette a dissesti e monitorare le deformazioni superficiali associate riducendo quanto più possibile l'intervallo di tempo tra l'ultima misura dello spostamento ed il verificarsi dell'evento. Inoltre nell'area è stato possibile individuare dai dati PS altri dissesti che presentavano le medesime caratteristiche di quello calamitoso e per i quali è stato suggerito un monitoraggio *in situ*.

#### Inquadramento geologico

L'area oggetto d'indagine si trova ai piedi del bordo orientale della Catena Costiera, sul versante occidentale del Bacino di Crati (Figura 90 e Figura 91). Quest'area è interessata da un'intensa attività tettonica ed in particolare, nella zona di Fagnano Castello è presente una delle tre principali faglie normali con direzione N-S che costituiscono il sistema di faglie recenti e attive che separa la Catena Costiera, in cui affiorano terreni metamorfici con coperture mioceniche-plioceniche, dal bacino sedimentario plio-pleistocenico del Bacino di Crati (Tortorici et al., 1995).

Dati geologici e morfologie poco mature dei piani di faglia suggeriscono che il sistema di Faglie della Valle del Crati è attivo dal Pliocene medio (700 ka).

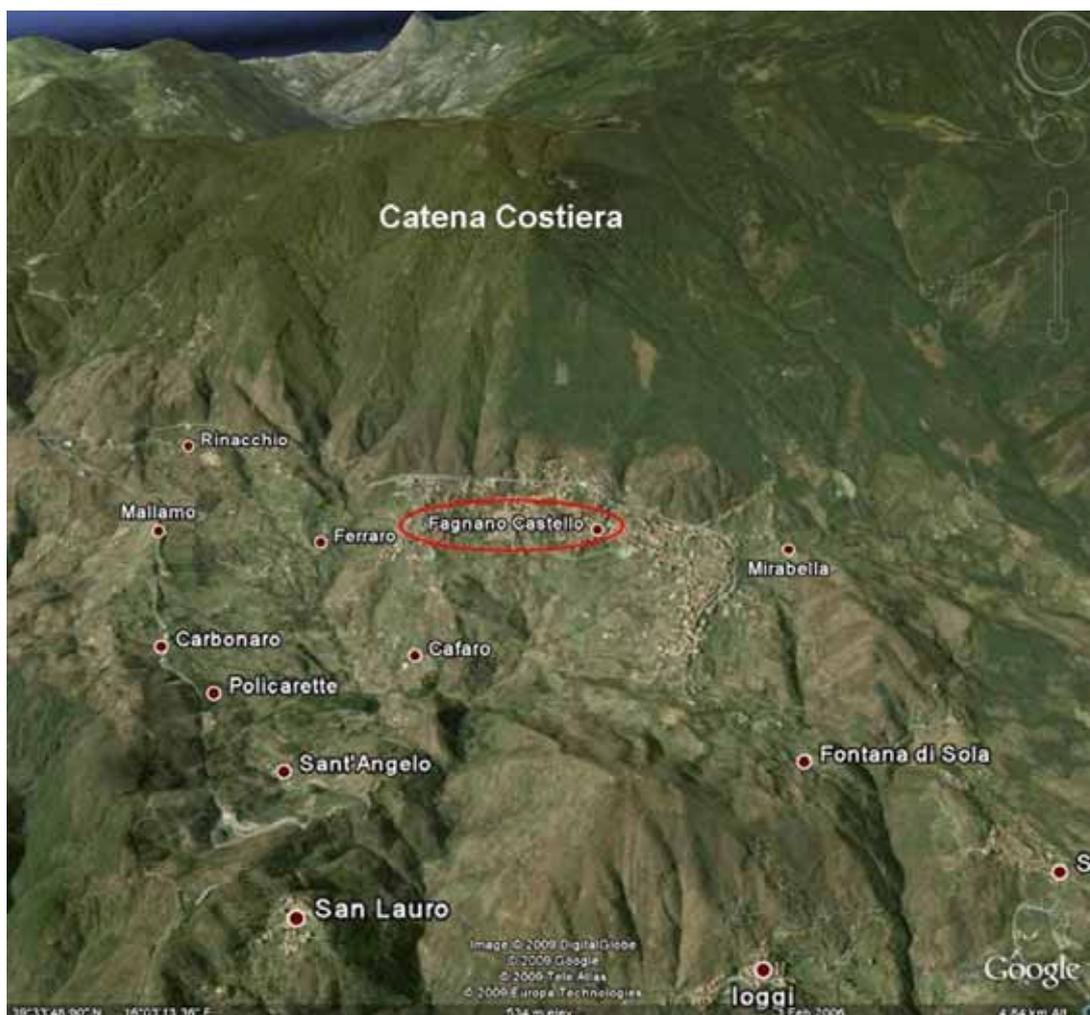


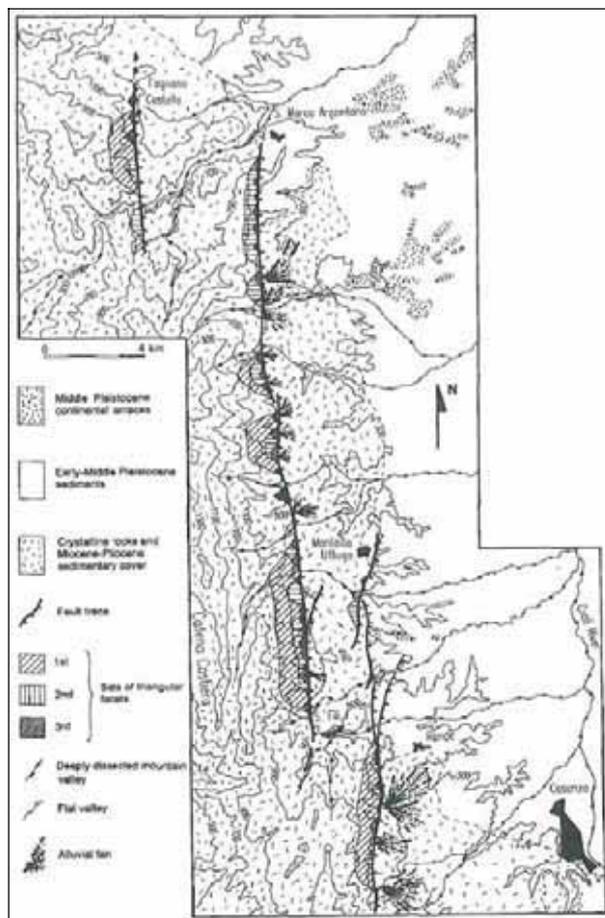
Figura 90 - Vista 3D dell'area di Fagnano Castello (da GoogleEarth).

Nel dettaglio, facendo riferimento alla Carta geologica in scala 1:50.000 di Lanzafame & Zuffa (1976) (Figura 92), ad occidente della faglia affiorano metabasiti e calcari del Giurassico sup.-Cretaceo inf., attribuiti da questi Autori al Complesso Liguride, su cui poggiano per sovrascorrimento terreni metamorfici (per lo più anfiboliti, serpentiniti e granofels) del Complesso Calabride (Paleozoico). Il sistema di faglie N-S, particolarmente evidente dalla netta scarpata rettilinea che borda il settore occidentale di tetto in sollevamento (*hanging wall*) (Figura 91), mette in contatto tali depositi a W con terreni per lo più argilloso-marnosi del Miocene ad E (Lanzafame & Zuffa, 1976). Conoidi alluvionali e depositi detritici recenti si sviluppano sul settore di letto (*footwall*) della faglia, coprendo gran parte del centro abitato e del settore orientale dell'area in esame (Figura 92) (Casagli et al., 2009).

In corrispondenza dell'abitato di Fagnano Castello numerosi fenomeni franosi sono mappati sia nel Piano di Assetto Idrogeologico (PAI) redatto dall'Autorità di Bacino della Regione Calabria che nella cartografia del Progetto IFFI (Figura 97). In analogia con la situazione studiata da questo Centro di Competenza per l'area di Cerzeto e dei comuni limitrofi (Casagli et al., 2006) (Figura 89), è plausibile

che il marcato contrasto litologico presente lungo la faglia di Fagnano Castello sia all'origine dei numerosi dissesti idrogeologici che interessano tutto il settore centro-orientale del centro abitato.

L'analisi dei dati satellitari, integrati con dati topografici (CTR e DTM) disponibili al Centro di Competenza UNIFI-DST, ha permesso di individuare nuovi dissesti, effettuare una riperimetrazione dei fenomeni franosi mappati nelle cartografie precedenti, di rivalutarne lo stato di attività e di proporre quindi una nuova mappatura dei fenomeni franosi per l'area di Fagnano Castello (Figura 99).



**Figura 91 - Carta morfotettonica del sistema di faglie della Valle del Crati, con indicati i tre principali segmenti di faglia ad andamento N-S e assetto normale (da Tortorici et al., 1995).**

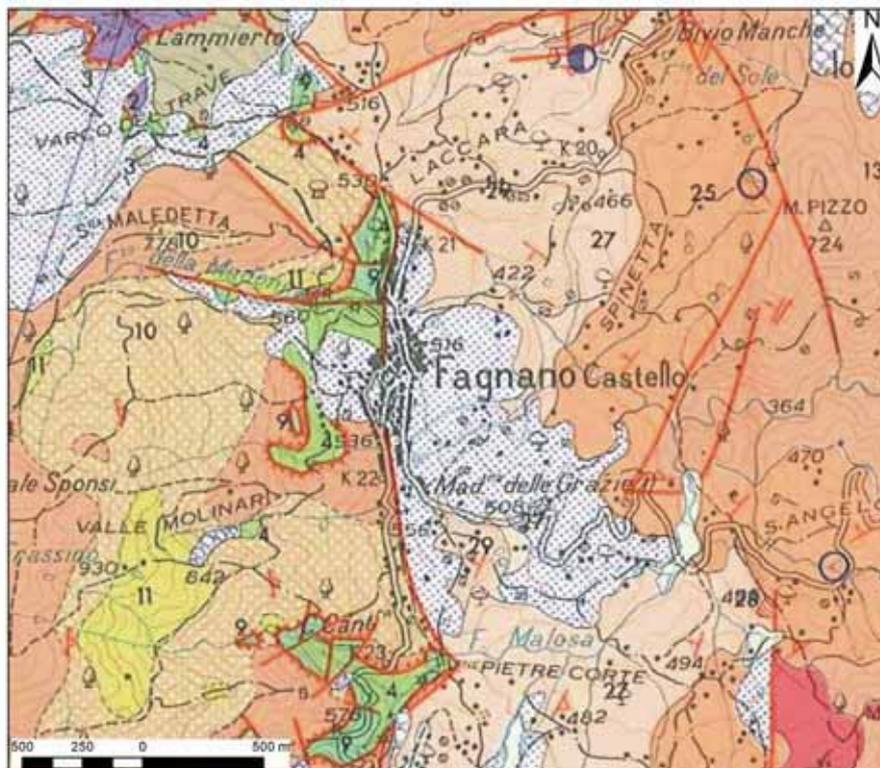


Figura 92 - Stralcio della carta geologica in scala 1:50.000 di Lanzafame e Zuffa (1976) per l'area di Fagnano Castello. Legenda: Complesso Liguride: 4-Metabasiti, 9-Calcari; Complesso Calabride: 10-Anfiboliti, 11-Serpentiniti, 13-Granofels; Miocene: 25-Conglomerati, 27/28/29 – Argille marnose e marne calcaree; in puntinato blu falde e coni di detrito.

#### Dati satellitari:

L'elaborazione dei dati satellitari, realizzata da TRE con la tecnica PSInSAR, ha fornito i seguenti dataset (Tabella 8):

- ERS ascendente tra Giugno 1995 e Giugno 2000 (Figura 93),
- ERS discendente tra Maggio 1992 e Dicembre 2000 (Figura 93),
- RADARSAT *Standard beam* ascendente tra Marzo 2003 e Settembre 2008 (Figura 94),
- RADARSAT *Standard beam* discendente tra Marzo 2003 e Agosto 2008 (Figura 94).

Satellite	Orbita	Elaborazione	Numero scene	Intervallo temporale
ERS1/2	asc	SPSA	22	24/06/1995- 18/06/2000
ERS1/2	disc	SPSA	78	17/05/1992- 20/12/2000
RADARSAT	asc	SPSA	75	18/03/2003- 23/09/2008
RADARSAT	disc	SPSA	69	19/03/2003- 07/08/2008

Tabella 8 - Dati interferometrici satellitari acquisiti per il sito di Fagnano Castello.

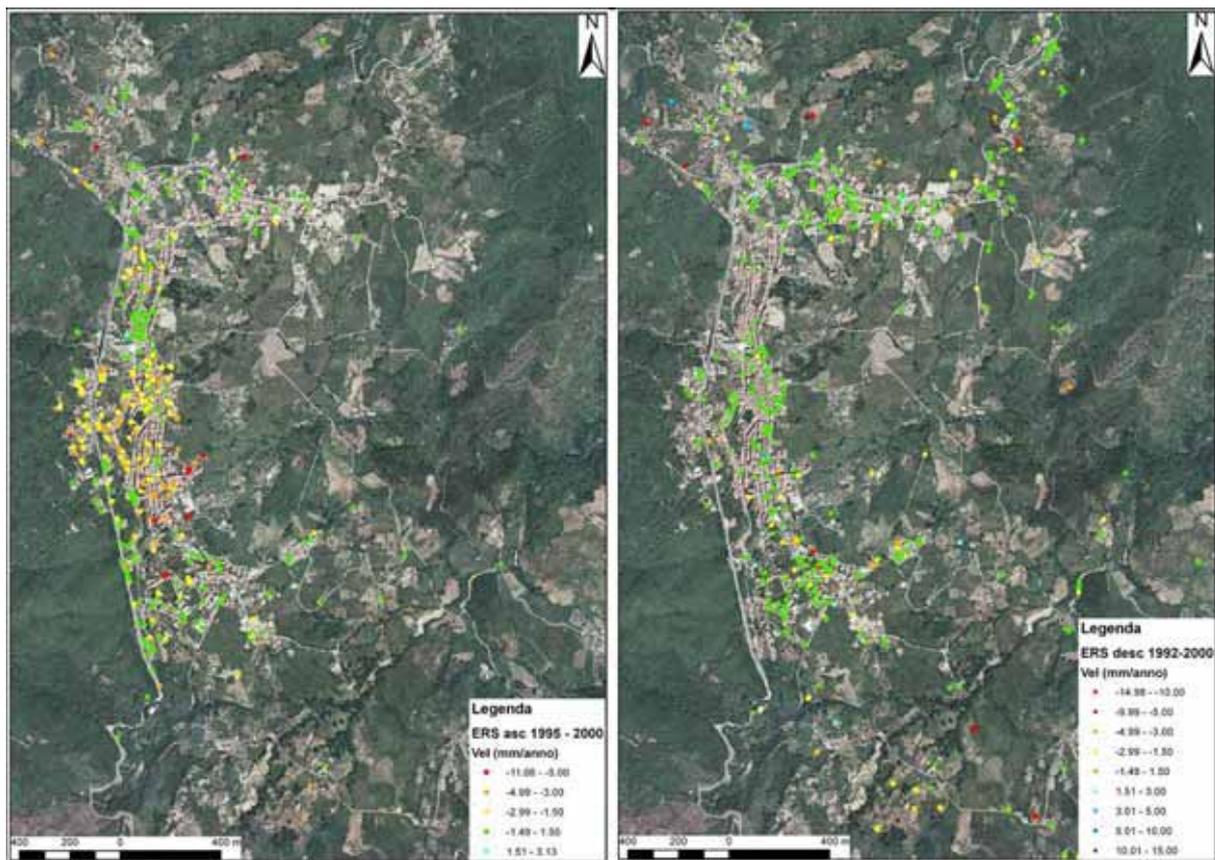


Figura 93 – Distribuzione PS ERS ascendenti (sinistra) e discendenti (destra) nel centro abitato di Fagnano Castello.

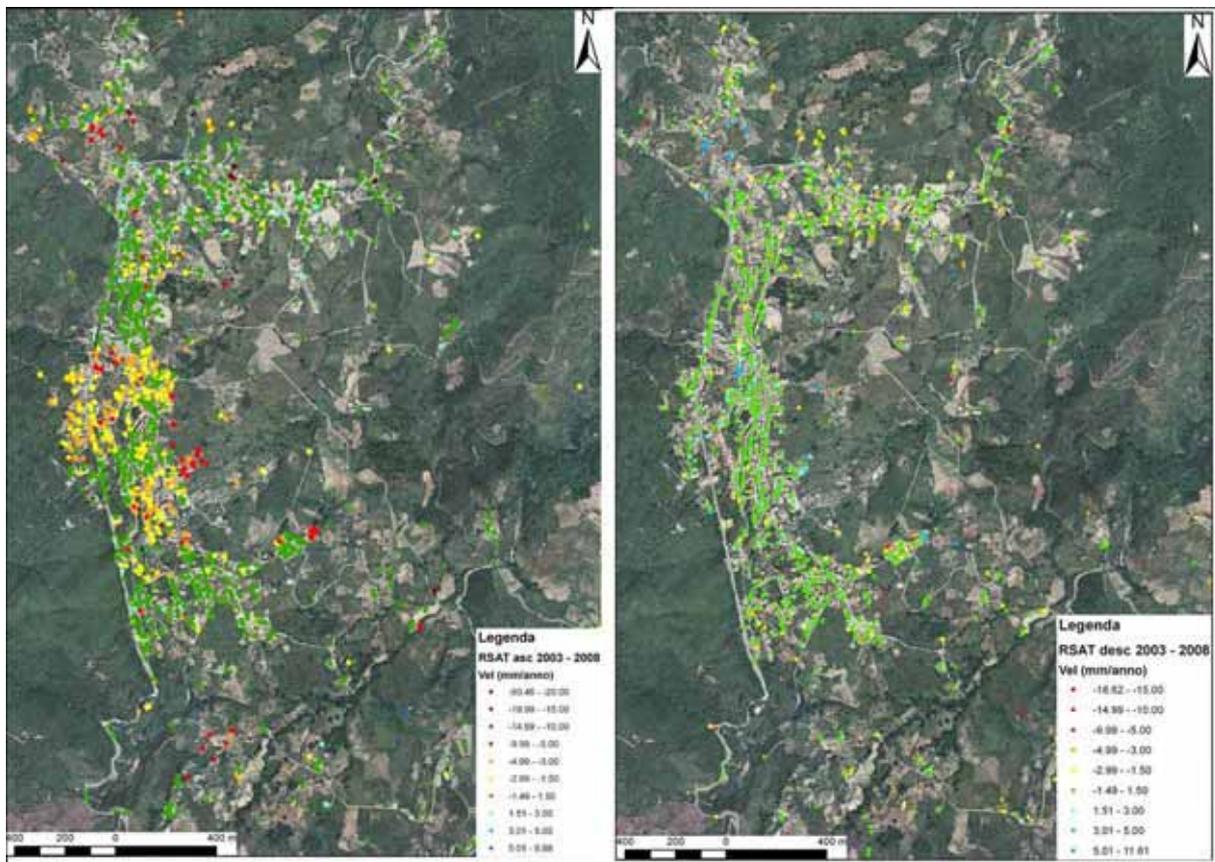
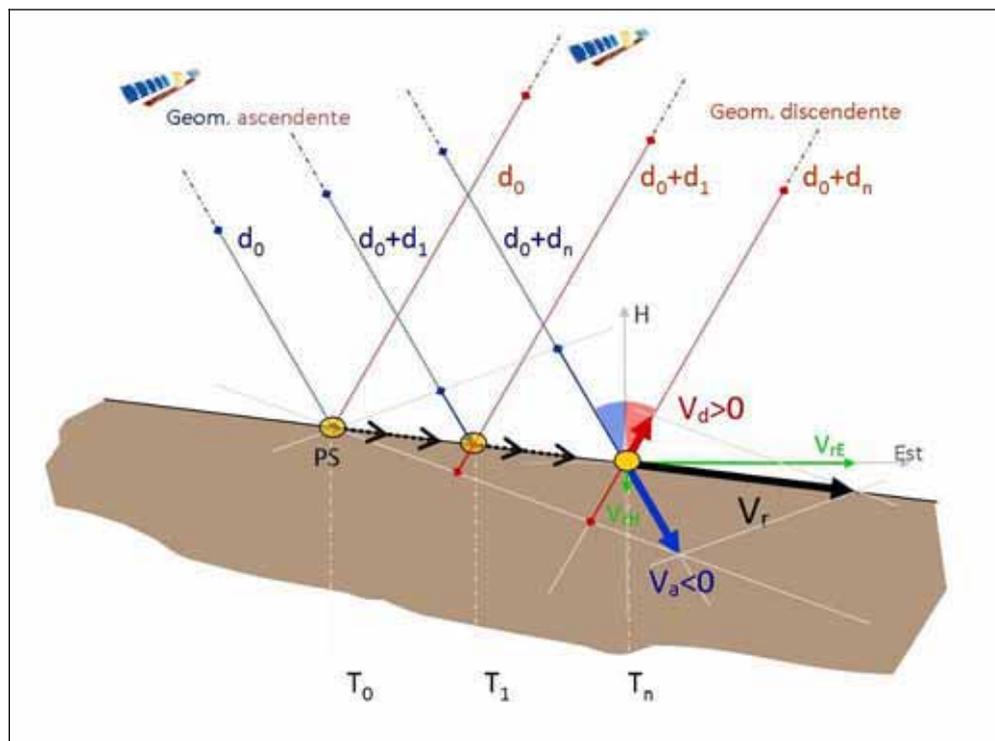


Figura 94 - Distribuzione PS RADARSAT ascendenti (sinistra) e discendenti (destra) nel centro abitato di Fagnano Castello.

### Analisi dei dati satellitari

La disponibilità di entrambe le geometrie di acquisizione, ascendente e discendente, migliora sensibilmente la quantità e la qualità delle informazioni ricavabili sui fenomeni analizzati. In particolare, la combinazione delle misure di deformazione calcolate da *dataset* di immagini acquisite in geometria ascendente e *dataset* acquisiti in geometria discendente, può fornire un'indicazione sul cinematico in atto poiché permette di ricostruire la componente E-W e quella verticale del vettore spostamento (Figura 95).



**Figura 95** – Dalla combinazione delle misure rilevate in geometria ascendente ( $V_a$ ) e discendente ( $V_d$ ) si possono ricavare le componenti E-W ( $V_{rE}$ ) e verticale ( $V_{rH}$ ) del vettore spostamento ( $V_r$ ) (immagine fornita da TRE).

In generale, per effettuare la combinazione delle due geometrie di acquisizione e stimare la componente orizzontale E-W e verticale del moto di un bersaglio, è necessario che il punto considerato risulti individuato dall'analisi multi-interferometrica come un bersaglio radar in entrambe le geometrie. Nella pratica, la condizione che le due geometrie di acquisizione identifichino a terra esattamente lo stesso bersaglio radar è raramente verificata. Per implementare la scomposizione del moto prima descritta è dunque necessario procedere con un ricampionamento dei bersagli radar secondo una griglia a maglia regolare.

Dal punto di vista operativo, i dati PS RADARSAT sono stati quindi ricampionati su una griglia regolare di 50x50 m. Per ciascuna cella e per entrambe le geometrie è stata assegnata la media dei valori di velocità di deformazione di tutti i bersagli radar che ricadono all'interno della cella stessa. I valori di velocità così ottenuti dai due *dataset* sono stati quindi combinati ricavando la componente verticale e orizzontale E-W del vettore spostamento.

Il nuovo inventario dei fenomeni franosi proposto sulla base dei dati satellitari e delle elaborazioni successive per la ricostruzione delle componenti del vettore spostamento è riportato in Figura 99.

Dal confronto con le precedenti cartografie PAI ed IFFI si osserva che:

1. sono stati mappati nuovi fenomeni franosi nel settore N e S del centro abitato;
2. sono stati ampliati verso monte i limiti delle frane che nella cartografia PAI ed IFFI lambivano il centro abitato; tali fenomeni risultano quindi interessare gran parte dell'area urbanizzata e del cimitero;

- sono stati classificati come attivi gran parte dei fenomeni franosi che interessano il centro abitato ed il cimitero sulla base dei dati RADARSAT aggiornati ad Agosto 2008.

Ulteriori considerazioni possono essere dedotte dal confronto tra i dati ERS (periodo 1992-2000) e RADARSAT (periodo 2003-2008) e dall'analisi delle componenti del vettore spostamento:

- Alcuni fenomeni che interessano il centro abitato sono stati classificati nel nuovo inventario proposto come quiescenti, poiché i dati ERS mostravano movimenti che non sono proseguiti nel periodo monitorato da RADARSAT;
- I due più estesi fenomeni franosi attivi che interessano la parte centrale del paese, attivi già dal 1995, sono caratterizzati da movimenti con una elevata componente orizzontale ed una bassa o nulla componente verticale. Questo può essere interpretato come indizio di superfici di scivolamento a bassa pendenza, che interessano i depositi detritici superficiali. La prevalente direzione verso E delle deformazioni risulterebbe quindi in accordo con la cinematica di tali dissesti.
- Dall'analisi delle serie temporali dei PS è risultato evidente che gli incrementi di deformazione dei fenomeni che interessano il centro abitato ed il cimitero sono fortemente stagionali (Figura 99), suggerendo quindi una netta corrispondenza tra gli eventi piovosi più significativi e l'aumento della velocità di deformazione.
- Per l'area del cimitero, l'analisi delle componenti del moto dei bersagli radar ha permesso di perimetrare con maggiore accuratezza i fenomeni franosi individuati (Figura 96 e Figura 98), che risultano difficilmente interpretabili dall'analisi dei soli dati topografici. Difatti, il settore orientale del cimitero mostra una netta prevalenza di spostamenti con elevata componente verso E, con velocità misurate per tale componente comprese tra i 2 e 8 mm/anno; mentre il movimento che interessa il settore occidentale presenta una direzione prevalente verso W, con velocità inferiori ai 3 mm/anno. Il cimitero risulta quindi interessato da movimenti differenziali attribuibili a due distinti fenomeni franosi con diversa direzione di spostamento.

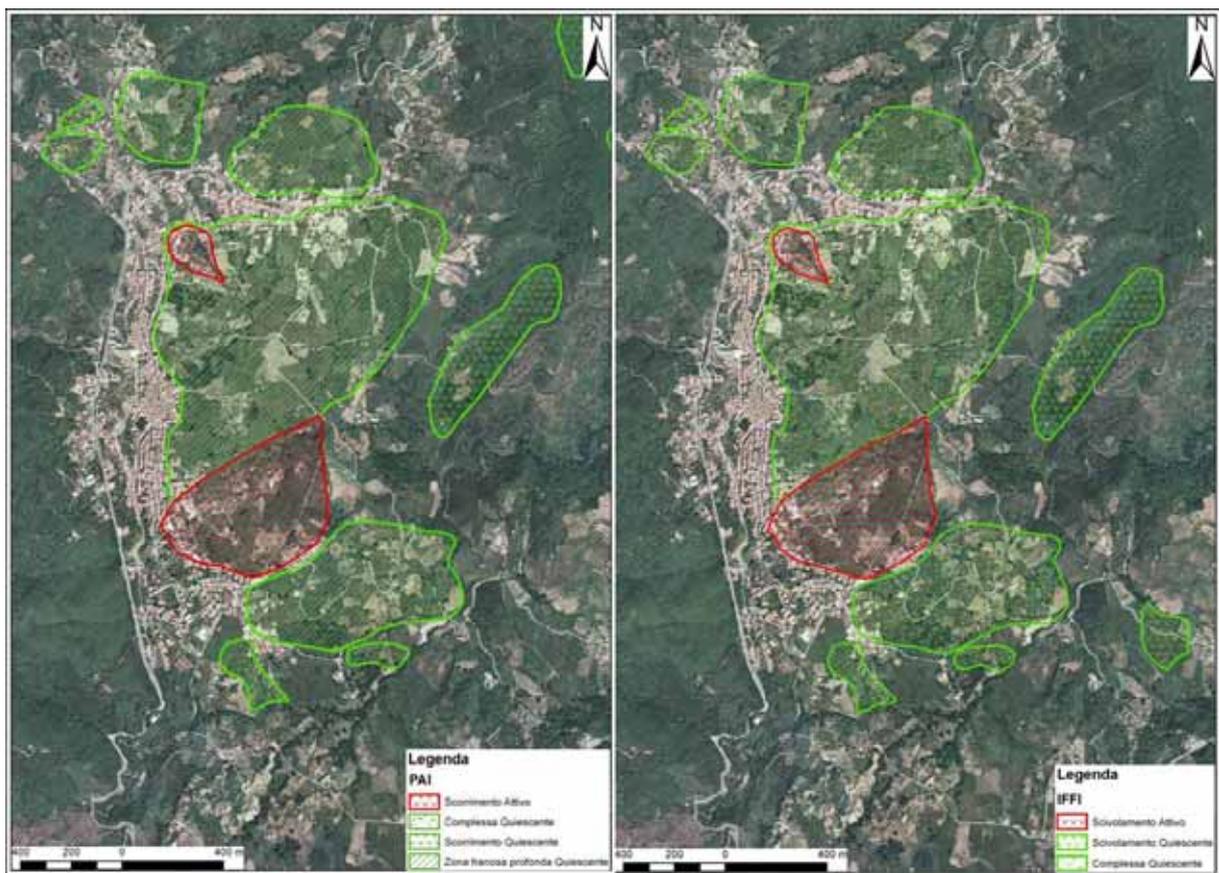


**Figura 96 - Particolare dell'inventario dei fenomeni franosi sul centro abitato di Fagnano Castello. In basso vengono visualizzate le componenti E-W dei vettori spostamento dei PS RADARSAT. Le frane che interessano il centro abitato hanno una prevalente componente E del movimento, in accordo con la**

**morfologia. Nell'area del cimitero la differenza nella direzione della componente del vettore ha permesso di distinguere due fenomeni franosi con diverse direzioni di movimento.**

Sulla base delle considerazioni sopra esposte è stato suggerito al DPC di monitorare i fenomeni attivi individuati nel centro urbano. L'analisi dei dati satellitari effettuata nell'abitato di Fagnano Castello ha portato ad una valutazione rapida dei dissesti, i cui tempi ristretti non hanno consentito una caratterizzazione spaziale e temporale dei fenomeni individuati. Ad esempio, date le caratteristiche evolutive dei fenomeni franosi individuati nell'area, effettuare un'analisi combinata dei dati satellitari con serie pluviometriche potrebbe fornire dati quantitativi più dettagliati sulla correlazione tra gli eventi di precipitazione e l'accelerazione dei fenomeni franosi. Inoltre l'integrazione di questi dati con dati raccolti *in situ* consentirebbe un'accurata caratterizzazione dei fenomeni attivi al fine di valutare i possibili scenari di rischio residuo e di pianificare gli eventuali interventi di mitigazione.

Per quanto riguarda i possibili interventi di mitigazione del rischio, si è rilevato come la tipologia di dissesti di Fagnano Castello sia analoga a quella osservata in centri abitati limitrofi interessati in precedenza da dissesti rilevanti per le aree urbanizzate, quali Cerzeto, Mongrassano e Rota Greca, Lungro. Gran parte del centro abitato è infatti localizzato su depositi detritici e cataclastici, associati ad una faglia di importanza regionale. A causa del marcato contrasto di permeabilità fra i litotipi messi a contatto dalla faglia, la falda freatica è presumibilmente sub-affiorante ed alimenta sorgenti di contatto tettonico. Sulla base di tali considerazioni, si è ritenuto che la causa principale dei fenomeni di instabilità sia rappresentata dalle condizioni idrogeologiche locali, sulle quali si è reputato necessario intervenire attraverso opportune opere di regimazione delle acque superficiali e profonde, al fine di assicurare una efficace e duratura riduzione del rischio su tutto il centro abitato.



**Figura 97 - Fenomeni franosi mappati nel PAI dall'Autorità di Bacino della Regione Calabria (sinistra) e nell'IFFI dall'Ispra.**

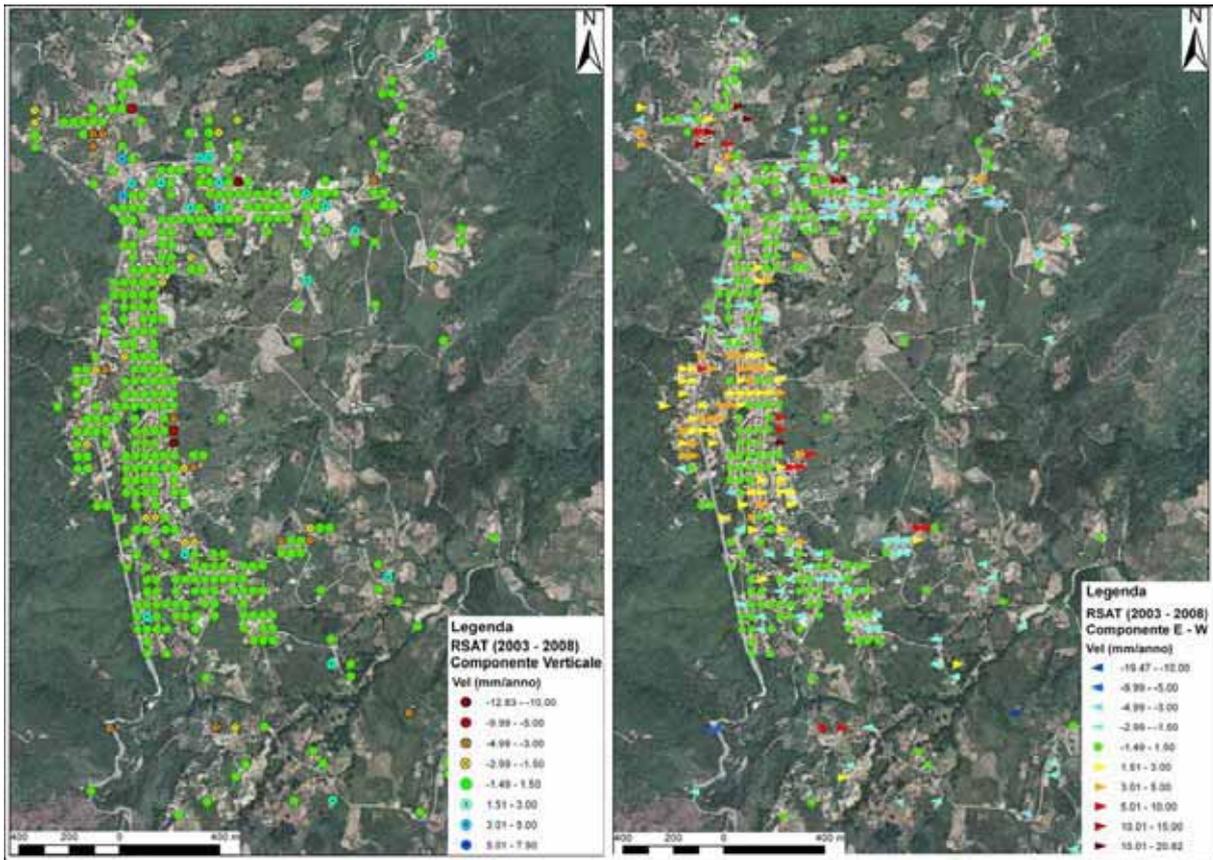


Figura 98 - Componente verticale (sinistra) e orizzontale (destra) del vettore spostamento dei PS RADARSAT ricampionati su celle regolari di 50x50 m.

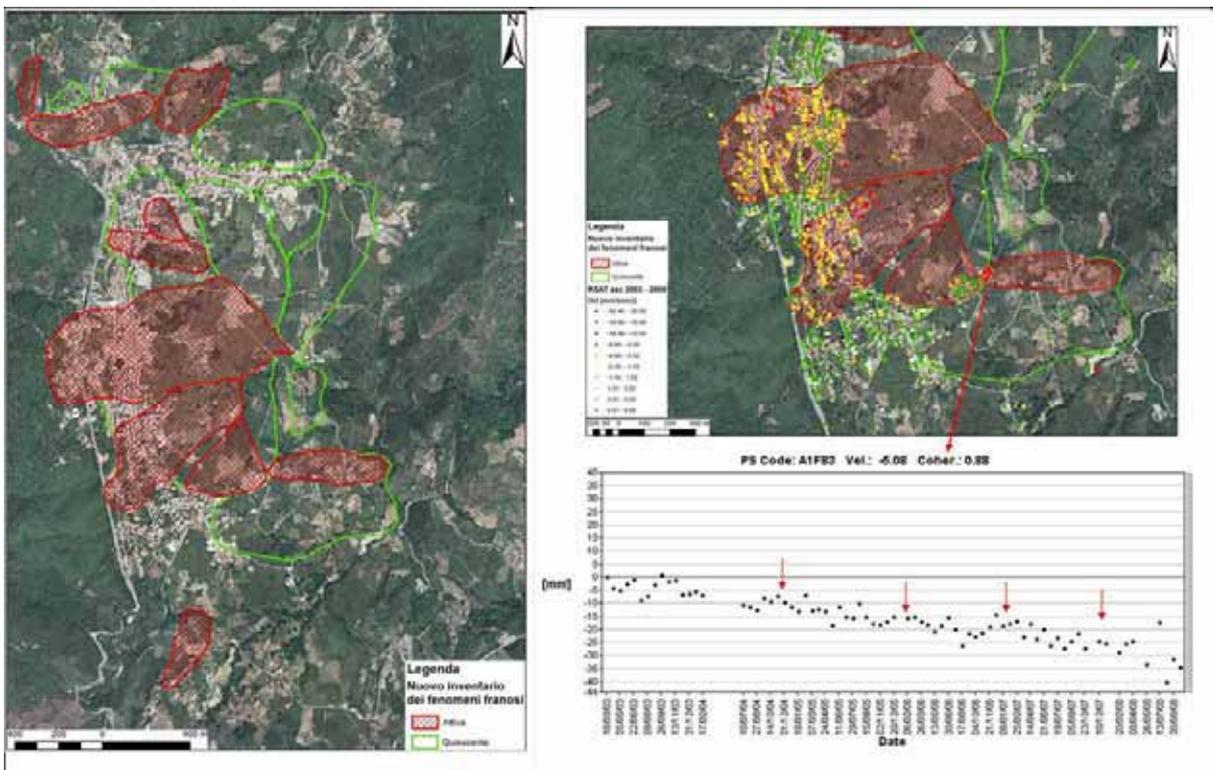


Figura 99 - Nuovo inventario dei fenomeni franosi proposto per il centro abitato di Fagnano Castello. A destra particolare di una serie temporale di un PS localizzato nel settore orientale del cimitero in cui si osserva la spiccata stagionalità delle deformazioni. Le frecce indicano il gennaio di ciascun anno

## 6.2 Early-warning

Un sistema di allertamento rapido *early-warning* è generalmente basato su un sistema di monitoraggio e sorveglianza (*monitoring*) del territorio capace di rilevare, i più importanti parametri connessi con il verificarsi di eventi, preliminarmente identificati in fase di previsione e prevenzione, identificativi e rappresentativi dell'evoluzione nel tempo e nello spazio dell'evento distruttivo e dei suoi effetti.

Un sistema di sorveglianza basato su una strumentazione convenzionale geodetica e geotecnica impiegata normalmente per il monitoraggio delle deformazioni superficiali, come le reti GPS, le stazioni totali, gli estensimetri e gli inclinometri, non risponde alla necessità di un sistema di monitoraggio in tempo reale su area vasta o scala locale in aree impervie. Infatti, questi strumenti permettono di misurare solo gli spostamenti superficiali in alcuni punti e necessitano dell'accesso all'area instabile per l'installazione. In tempo reale, un efficace sistema di sorveglianza e un'adeguata strumentazione di controllo delle deformazioni superficiali, quali parametri indicatori dell'evoluzione temporale dei fenomeni di dissesto, specialmente di quelli che evolvono a scala locale, fornisce i dati necessari per la determinazione dei livelli di criticità legati al possibile verificarsi di scenari d'evento potenzialmente distruttivi.

Le tecniche interferometriche satellitari possono da questo punto di vista superare le metodologie di monitoraggio convenzionali, grazie alle caratteristiche di copertura areale, alla continuità temporale ed alla multi-temporalità delle riprese, alla possibilità di ottenere misure di deformazioni superficiali in modo non invasivo, senza quindi entrare in diretto contatto con l'area indagata e di conseguenza controllando luoghi di difficile accesso.

L'obiettivo di un sistema di *early-warning* basato su dati radar satellitari prevede l'uso delle misure delle deformazioni superficiali fornite dai dati PS quali indicatori delle condizioni di instabilità dei dissesti, sia su area vasta che a scala di versante. Dall'analisi delle serie storiche dei bersagli radar si determina un modello di segnalazione capace di indicare accelerazioni dei tassi di spostamento o variazioni nel *trend* di deformazione legate allo sviluppo di moti precursori. Tali variazioni devono essere riconducibili ed indicative di situazioni a rischio legate allo sviluppo di deformazioni superficiali.

Fino ad ora le tecniche satellitari multi-interferogramma non sono mai state applicate in modo operativo per un monitoraggio e sorveglianza in tempo reale di fenomeni di dissesto idrogeologico che prevedesse l'aggiornamento dei dati PS con scadenza regolare, al fine di valutare nel tempo l'evoluzione dei fenomeni individuati. Per tale scopo e sulla base delle competenze maturate dal Centro di Competenza UNIFI-DST nell'ambito dell'interpretazione dei dati radar satellitari, sono stati effettuati dei tentativi per l'individuazione di una metodologia che prevede l'uso delle misure delle deformazioni superficiali quali indicatori di instabilità dei dissesti idrogeologici. In particolare, l'obiettivo specifico della determinazione del modello di segnalazione consiste nella ricerca dei criteri per l'individuazione di situazioni a rischio legate allo sviluppo o accelerazioni di deformazioni superficiali.

Di seguito viene riportato il caso di studio di Caltanissetta, dove sono stati effettuati i tentativi di selezionare i bersagli radar che presentano un cambiamento del loro comportamento all'interno dell'ultimo periodo della rispettiva serie temporale di spostamento. È stato selezionato il caso di Caltanissetta in quanto vi si è verificato un dissesto preceduto da deformazioni superficiali registrate dai bersagli radar e riconducibili a moti precursori.

### 6.2.1 Caltanissetta

Il centro abitato di Caltanissetta l'11 Agosto 2008 è stato interessato da numerosi dissesti legati a fenomeni franosi (quartiere Santa Flavia e Sant'Anna - Figura 100) e ad una violenta emissione di gas, acqua e fango (località Santa Barbara). Il getto ha raggiunto un'altezza di circa 40 m. I prodotti espulsi, composti essenzialmente da materiale argilloso, hanno ricoperto una porzione approssimativamente circolare di terreno di circa 12.000 m<sup>2</sup> di superficie, con un diametro massimo di 120 m circa ed uno spessore massimo di 3,5 m, per un volume di materiale di circa 10.000 m<sup>3</sup>. Alcune abitazioni sono state evacuate a causa di fratture e spaccature sulle strutture portanti. Pali della corrente elettrica sono stati divelti e le strade asfaltate hanno riportato grosse lesioni, con spaccature, cunette e avvallamenti di quasi un metro. Danni sono stati riscontrati anche sulla strada statale 122 ed in alcuni edifici del Villaggio Santa Barbara. In seguito a questi eventi parossistici, il Dipartimento di Protezione Civile ha richiesto al Centro di Competenza UNIFI-DST una valutazione tecnica sulle condizioni di dissesto. La valutazione è stata effettuata mediante l'analisi di dati satellitari elaborati della società TRE (Casagli et al., 2009).

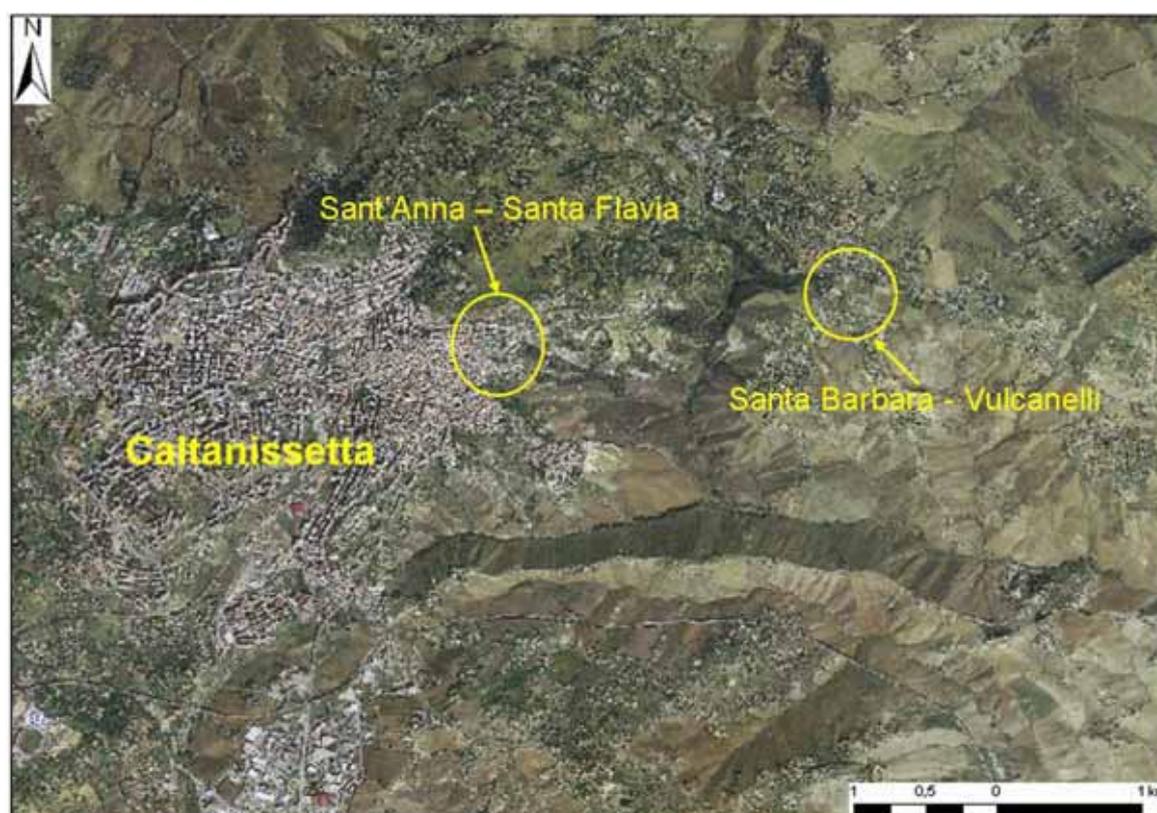


Figura 100: Ubicazione delle aree interessate dai dissesti dell'11 Agosto 2008 (Casagli et al., 2009).

#### Dati Satellitari

I dati satellitari analizzati dal Centro di Competenza consistono in immagini ERS acquisite in orbita discendente tra l'11/11/1992 ed il 18/11/2000 ed immagini RADARSAT acquisite in orbita ascendente tra il 21/03/2003 ed il 09/08/2008, con analisi local sull'area dei Vulcanelli (Tabella 9)

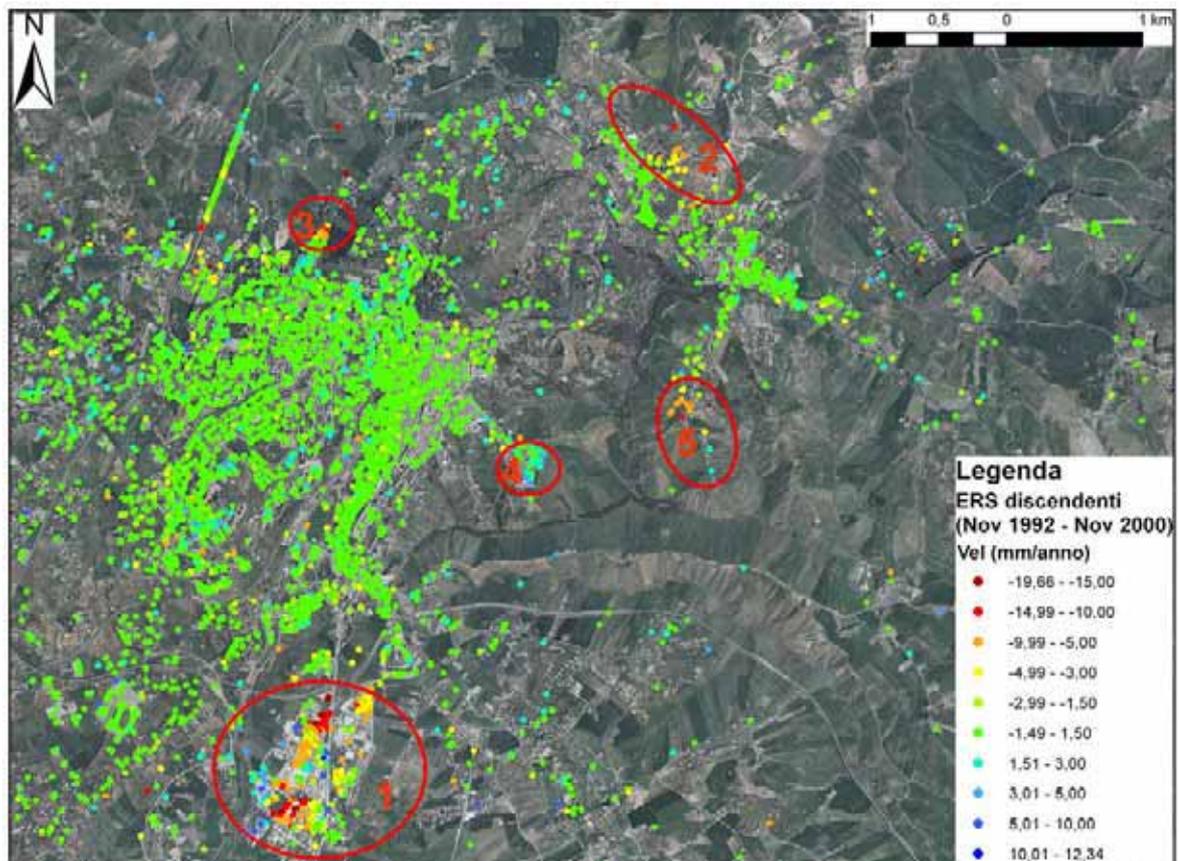
Satellite	Geometria	Periodo	Tipo elaborazione	Area indagata
ERS	discendente	11/11/1992- 18/11/2000	<i>regional</i>	90 km <sup>2</sup>

ERS	discendente	11/11/1992- 18/11/2000	<i>local</i> (su Vulcanelli)	5 km <sup>2</sup>
RADARSAT <i>Standard Beam</i>	ascendente	21/03/2003- 09/08/2008	<i>regional</i>	90 km <sup>2</sup>
RADARSAT <i>Standard Beam</i>	ascendente	21/03/2003- 09/08/2008	<i>local</i> (su Vulcanelli)	5 km <sup>2</sup>

**Tabella 9 - Dati satellitari elaborati per il sito Caltanissetta (Casagli et al., 2009).**

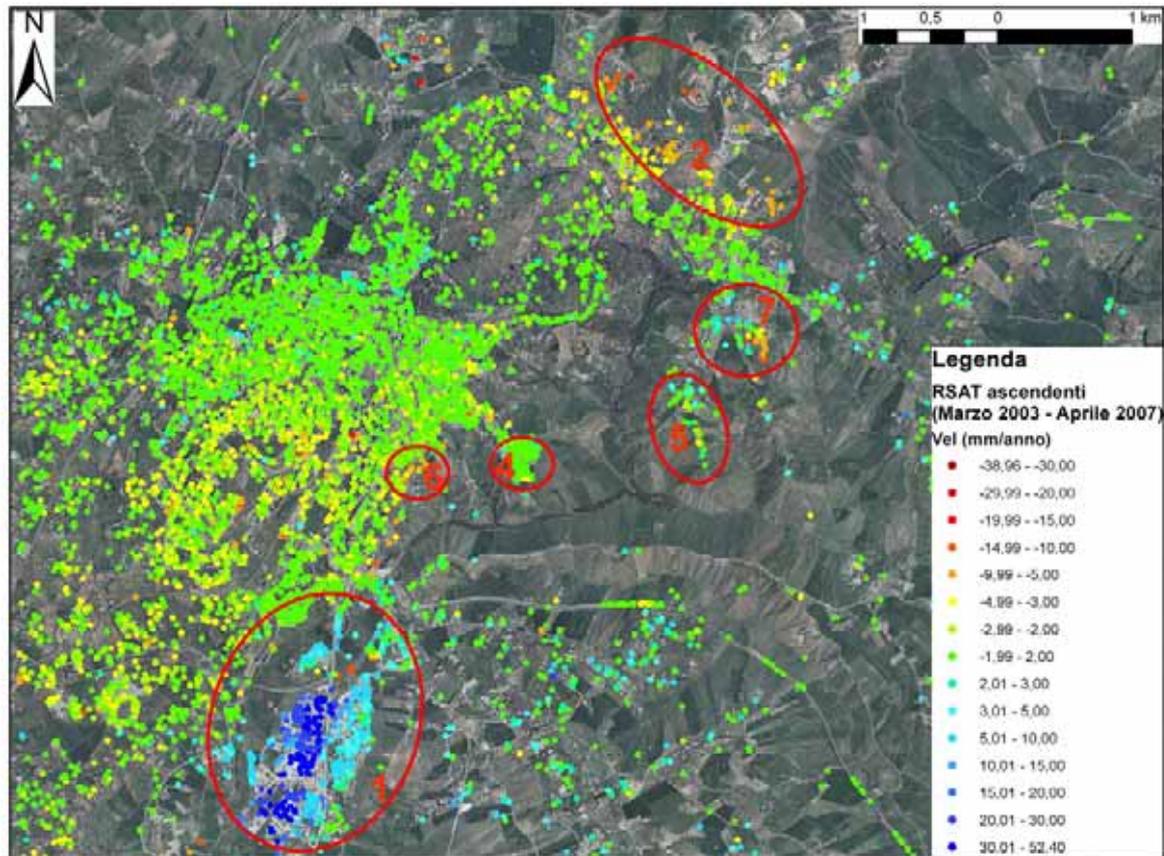
### Analisi dei dati satellitari

L'analisi dei dati satellitari effettuata su area vasta sull'intera area di Caltanissetta ed alla scala di dettaglio su Santa Barbara-Vulcanelli ha consentito di individuare le aree soggette a deformazioni superficiali riconducibili a fenomeni di instabilità di versante e ad espansione delle argille (Figura 101 e Figura 102).



**Figura 101: Distribuzione dei PS ERS discendenti nell'area di Caltanissetta. Cerchiate in rosso le aree soggette a deformazione del suolo rilevate su area vasta: 1) zona industriale S, 2) Portella San Michele, 3) zona di Via Borremans, nella parte N del centro abitato, 4) zona del castello di Pietrarossa, 5) contrada Terrapelata a S di Santa Barbara, 6) fianco orientale del Viale regina Margherita, 7) area dei Vulcanelli. In particolare per l'area 1 Vallone et al. (2008) suggeriscono che le deformazioni siano dovute a fenomeni**

di espansione delle argille, in base anche ai risultati ottenuti da specifiche indagini geotecniche. I dissesti che interessano le aree 2, 3, 4, 5 e 6 sono state interpretati come correlati ad instabilità di versante. (Casagli et al., 2009).



**Figura 102: Distribuzione dei PS RADARSAT ascendenti nell'area di Caltanissetta. Cerchiate in rosso le aree soggette a deformazione del suolo rilevate su area vasta. Per i dettagli sulle aree individuate si rimanda alla Figura 101. (Casagli et al., 2009).**

Su questi dati satellitari e sulla base della conoscenza delle caratteristiche evolutive spaziali e temporali dei dissesti individuati, in collaborazione con TRE, è stato condotto un test per l'individuazione di *trend* anomali all'interno delle serie temporali.

In dettaglio l'analisi condotta ha seguito le seguenti fasi:

1. Il dataset RADARSAT elaborato, aggiornato all'immagine subito precedente all'evento, è stato sottocampionato su griglia regolare quadrata di lato 100m. Ogni cella della griglia regolare riporta al centro un PS sintetico la cui serie storica rappresenta la media delle serie storiche dei PS contenuti nella cella (la mediazione permette di lavorare su serie storiche meno rumorose) (Figura 103).
2. Un primo approccio al calcolo dei parametri di *trend* e di anomalia ha visto l'analisi delle serie storiche mediante un modello polinomiale di primo ordine unitamente a sinusoidi per la valutazione della stagionalità. Tale modello, lineare con stagionalità, viene stimato per la parte pregressa della serie storica ed utilizzato come predizione dell'andamento della serie storica nell'intervallo di *update*.

I valori di spostamento dell'aggiornamento vengono quindi confrontati con il modello predetto. I punti le cui serie storiche nell'*update* si discostano sufficientemente dal modello predetto vengono segnalati come andamenti anomali. In pratica si tratta di un approccio basato su un "anti-modello": s'individuano tutte le serie storiche che si discostano dal modello lineare con stagionalità (Figura 104).

Nel caso specifico, come parametro di anomalia è stato utilizzato il rapporto tra la somma degli errori tra il dato reale dell'aggiornamento ed il modello predetto e la deviazione standard.

3. Un secondo approccio al calcolo dei parametri di *trend* e di anomalia ha visto l'utilizzo non di un anti-modello lineare con stagionalità ma di un'analisi *distribution free* con l'utilizzo di medie mobili calcolate sui dati dell'intervallo pregresso.

In dettaglio, sui dati pregressi viene calcolata la media mobile semplice di ordine 12 ed il relativo scarto quadratico medio e la predizione dell'andamento della serie storica nell'*update* viene estrapolato dai valori della media mobile dell'anno precedente all'aggiornamento (i.e. si assume che nell'intervallo di update l'andamento debba essere lo stesso di quello della media mobile dell'anno precedente, andando quindi ad eliminare la stagionalità ed assunto che il comportamento deformativo dell'area sia costante rispetto all'anno precedente) (Figura 105).

Anche in questo secondo approccio vengono quindi calcolate le differenze tra il dato reale di spostamento nell'intervallo di *update* e l'andamento predetto e viene usato come parametro di anomalia il rapporto tra le differenze tra il dato reale e la serie predetta e lo scarto quadratico medio.

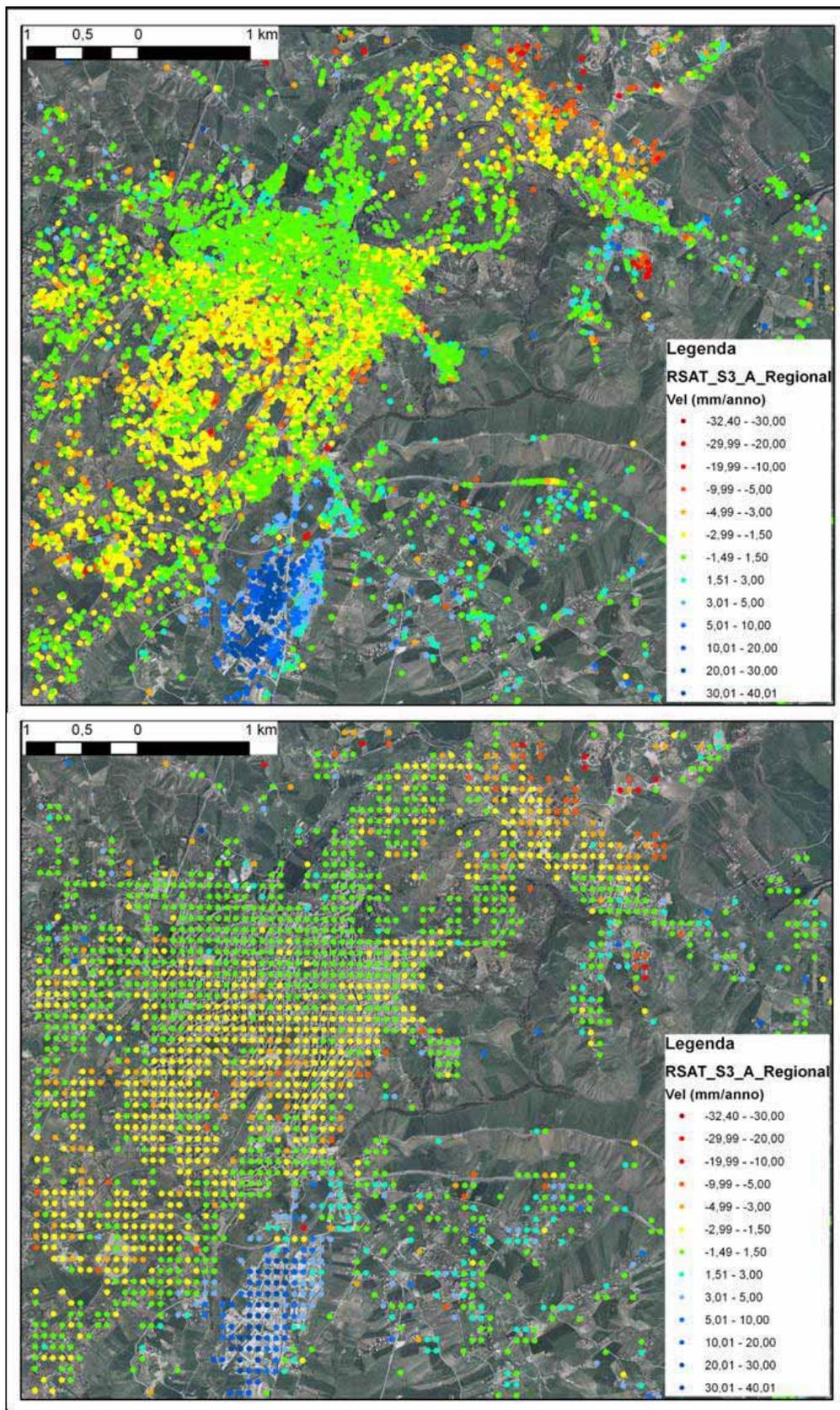


Figura 103 - Sopra il dataset *raw* dei RADARSAT asc aggiornati al 9 Agosto 2008, sotto i PS sintetici elaborati con griglia regolare 100m x 100m, visualizzati per classi velocità.

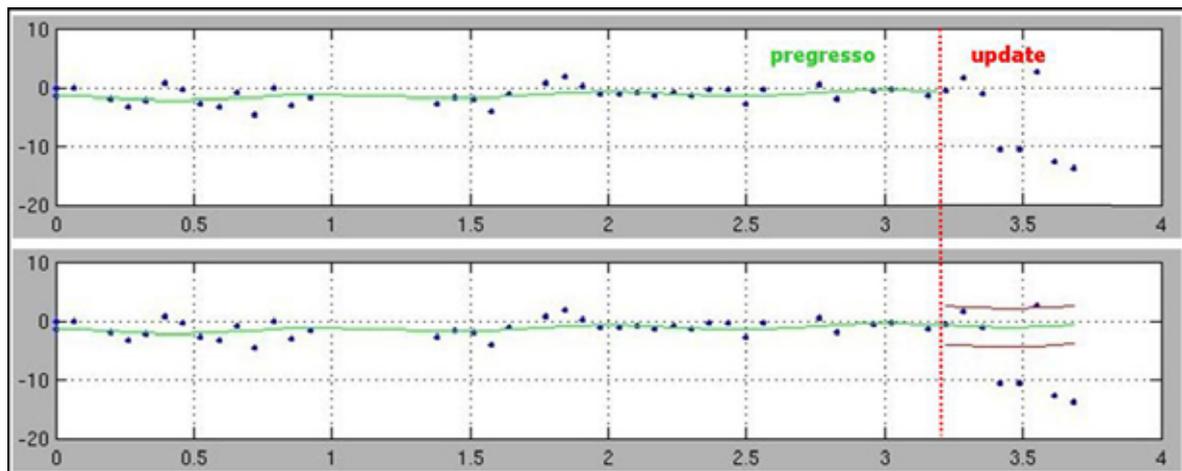


Figura 104 -Utilizzo di un “anti-modello” lineare per l’individuazione di serie storiche anomale. In verde il modello lineare con sinuosità stimato sull’intervallo pregresso ed usato come predizione nell’intervallo di *update*. In rosso la deviazione standard valutata sul modello stimato per il pregresso ed utilizzata come “error bar” per il confronto tra i dati reali dell’*update* ed il modello predetto.

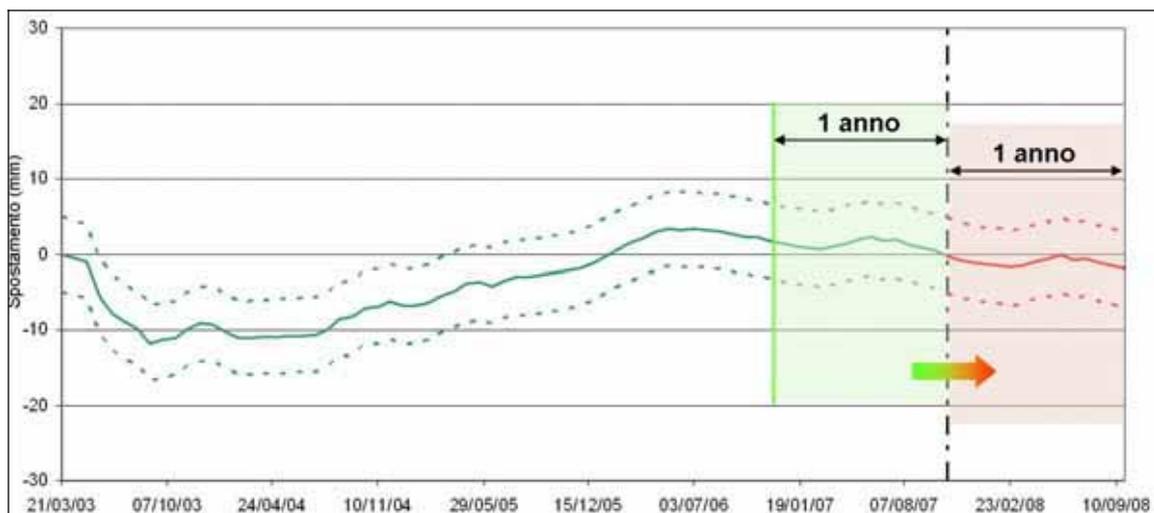


Figura 105: Utilizzo della media mobile asimmetrica di ordine 12, calcolata sul pregresso (in verde continuo) e del relativo scarto quadratico medio (in verde tratteggiato), per la stima della serie storica predetta e del relativo scarto quadratico medio nell’intervallo di *update* (in rosso). L’andamento dell’anno precedente all’aggiornamento viene estrapolato per fare la predizione nell’*update*.

4. La sogliatura sui valori dei parametri di anomalia ha permesso di individuare chiaramente PS con incrementi anomali delle deformazioni nell’intervallo di aggiornamento nell’area dei Vulcanelli-Santa Barbara, con entrambi gli approcci utilizzati (zona 1 in Figura 106). I dati hanno individuato anche altre zone “anomale” per comportamento della serie storica nell’intervallo di aggiornamento (Figura 106): l’area Monte San Giuliano (zona 2) , l’area industriale sud (zona 3) e l’area centro-occidentale del centro abitato (zona 4).
5. I PS sintetici segnalati come anomali sono stati quindi raggruppati spazialmente (*clustering*) (Figura 107) utilizzando un algoritmo semplice che scarta le celle anomale isolate (cioè le celle di 100m x 100m in il cui PS sintetico al centro è stato indicato come anomalo nell’aggiornamento ma che sono circondate da celle a comportamento non anomalo) e raggruppa le celle anomale vicine. Sono attualmente oggetto di studio modelli geostatistici di analisi spaziale più complessi finalizzati non solo alla delimitazione delle aree contenenti PS

anomali, ma anche alla valutazione del gradiente di anomalia all'interno delle stesse aree segnalate.

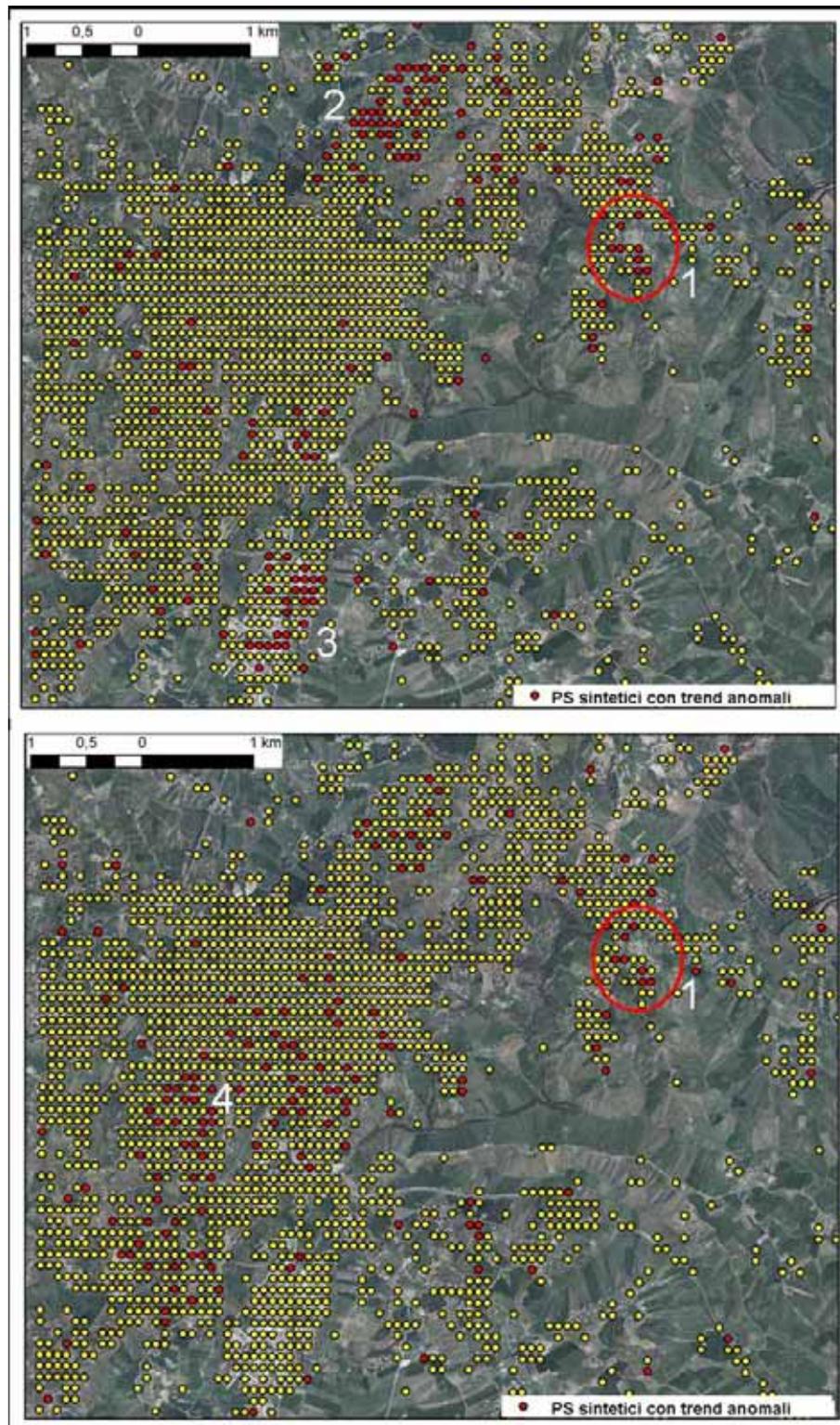


Figura 106: PS sintetici sogliaati sui valori degli indici di anomalia. In alto gli indici di anomalia sono quelli calcolati con il primo approccio (“anti-modello” lineare), in basso è stato usato il secondo approccio (media mobile). La zona 1 corrisponde all’area Vulcanelli-Santa Barbara. Per le altre aree indicate si rimanda al testo.

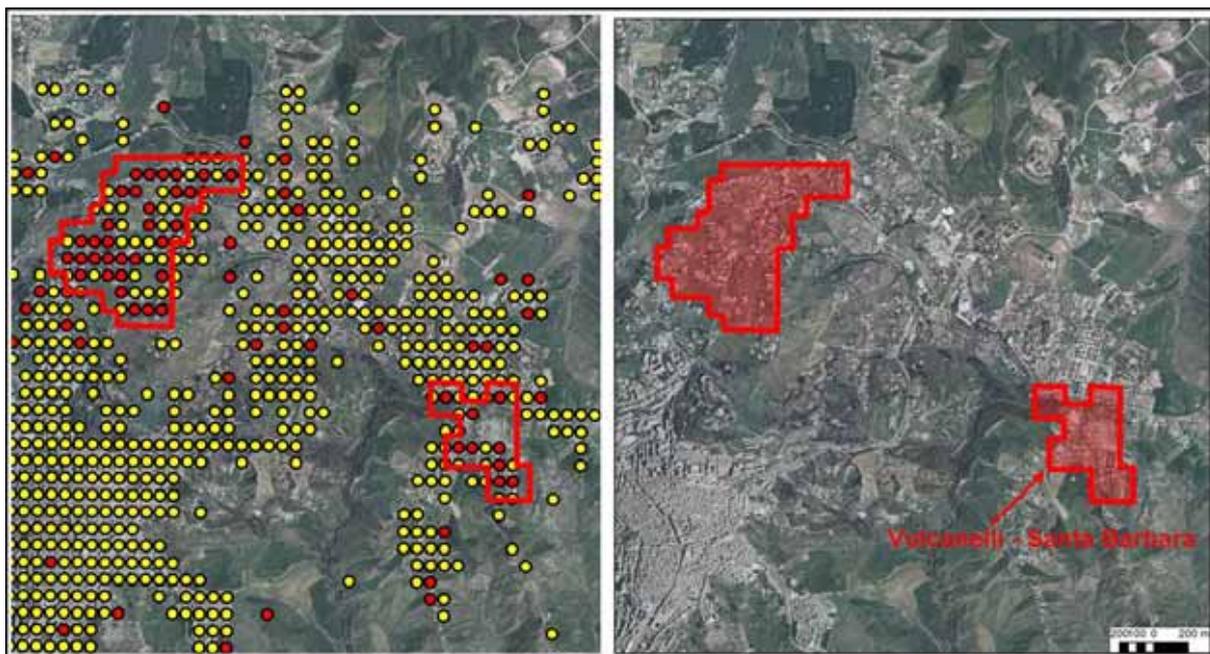


Figura 107: Particolare dei *cluster* con PS sintetici segnalati come anomali nel settore NE di Caltanissetta.

Nel caso specifico l'analisi ha condotto alla valutazione delle anomalie di *trend* segnalate:

- per l'area Vulcanelli-Santa Barbara (area 1 in Figura 106) l'incremento anomalo degli spostamenti nelle serie storiche dei PS è stato valutato come ad alta criticità ed è da correlare al progressivo incremento della deformazione che ha portato alla violenta emissione di gas, acqua e fango dell'Agosto del 2008 (Figura 108);
- per l'area di Monte San Giuliano e l'area centro-occidentale del paese (rispettivamente zona 2 e zona 4 in Figura 106), interessate da movimenti gravitativi legati alla presenza di un substrato argilloso causa di dissesti generalizzati lungo i versanti del centro abitato, le anomalie sono state attribuite ad un incremento delle deformazioni avvenuto nel febbraio 2007, ma con un livello di criticità medio-basso poiché molto limitato nel tempo e con bassi incrementi di deformazione (Figura 109);
- per l'area industriale sud (zona 3 in Figura 106) l'anomalia segnalata è stata valutata come a bassa criticità poiché correlata ad un decremento delle deformazioni indotte dall'espansione delle argille in un'area di recente urbanizzazione.

Lo scopo di un sistema di *early-warning* basato su dati radar satellitari è individuare non fenomeni deformativi in genere (*detection*), ma solo quei fenomeni deformativi che presentano incrementi anomali di velocità in fase di monitoraggio satellitare (*monitoring*). Caltanissetta fornisce un chiaro esempio di questa distinzione: l'area soggetta a deformazioni gravitative nel settore NE del centro abitato, con velocità in abbassamento rispetto al satellite, facilmente individuabile dall'analisi della distribuzione delle velocità, non viene segnalata in fase di monitoraggio poiché non presenta incrementi anomali di velocità di abbassamento (Figura 111). Al contrario l'area NO, che viene segnalata per incrementi anomali della deformazione, visualizzata per velocità medie di deformazione nell'intero periodo coperto dall'elaborazione satellitare, risulta compresa nella classe di stabilità (velocità media compresa tra +1,5 e -1,5 mm/anno).

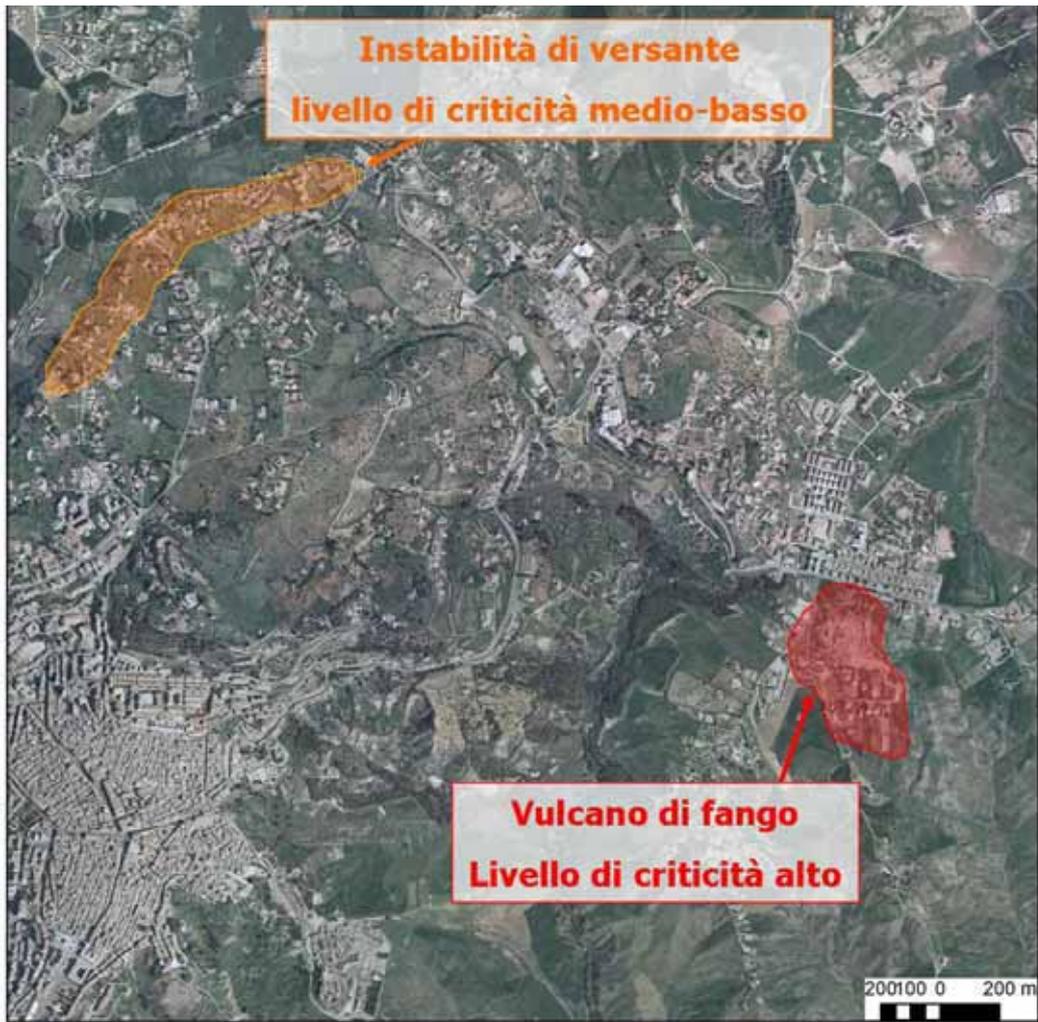


Figura 108: Particolare dell'area NE di Caltanissetta con relativa delimitazione degli eventi anomali e valutazione dei livelli di criticità.

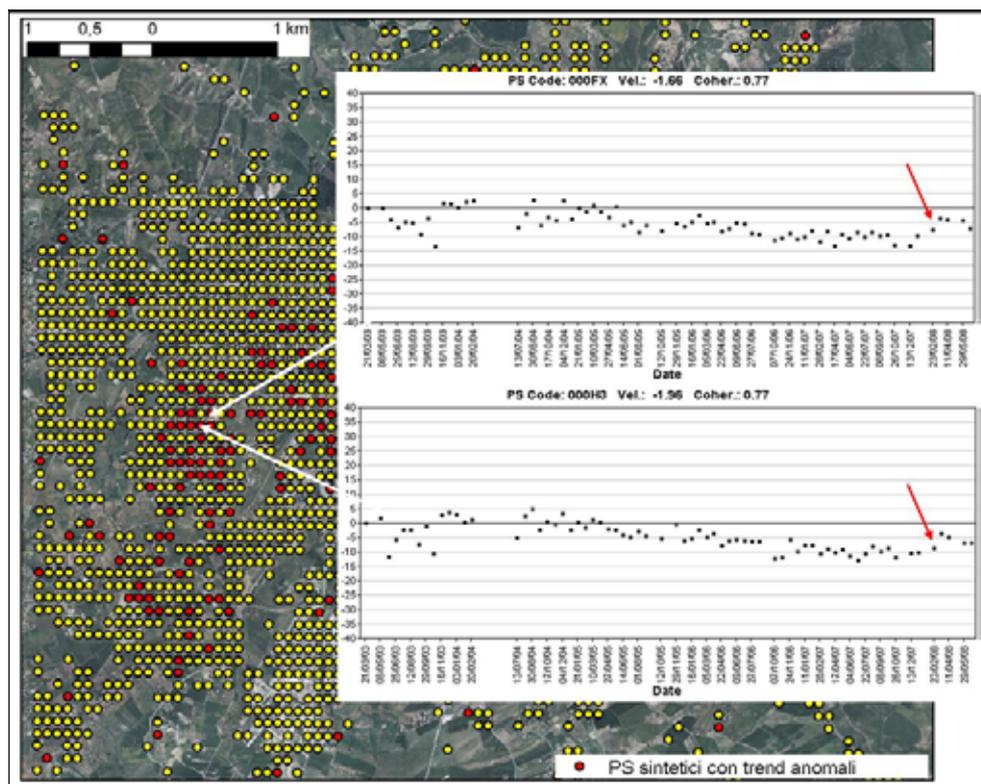


Figura 109: Evento deformativo del febbraio 2007 individuato dall'analisi dei *trend* anomali nell'area centro-occidentale di Caltanissetta .

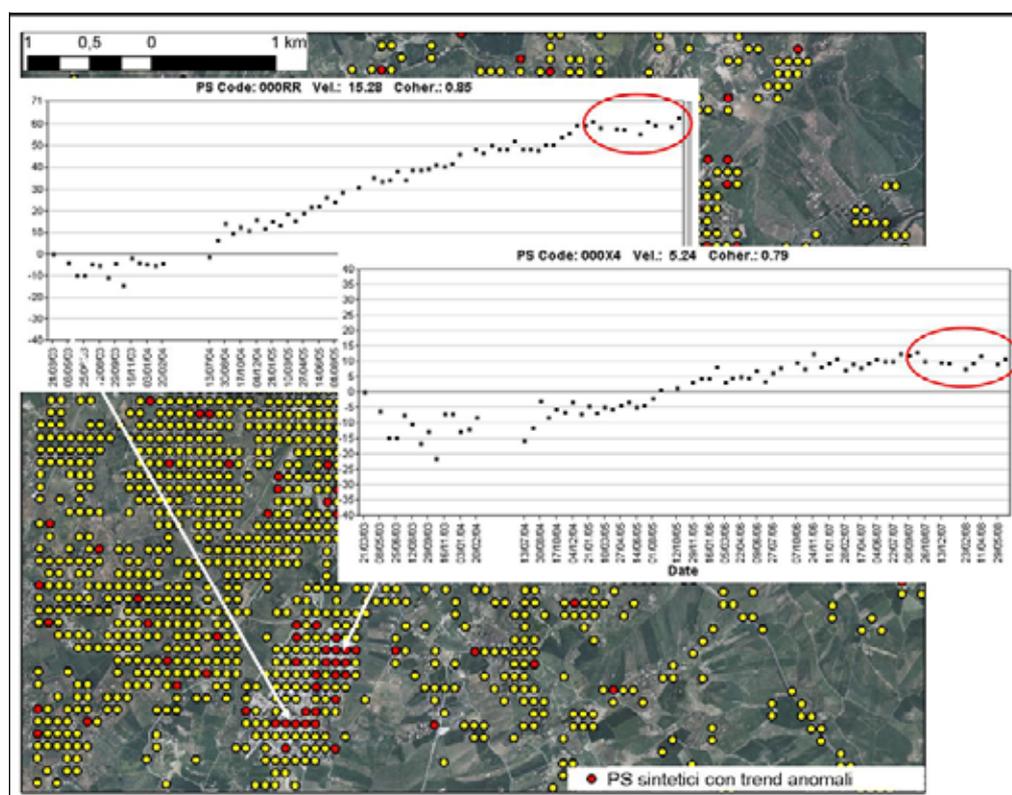


Figura 110: Decremento del sollevamento osservato dalle serie storiche dei PS sintetici con *trend* anomali individuati nell'area 3.

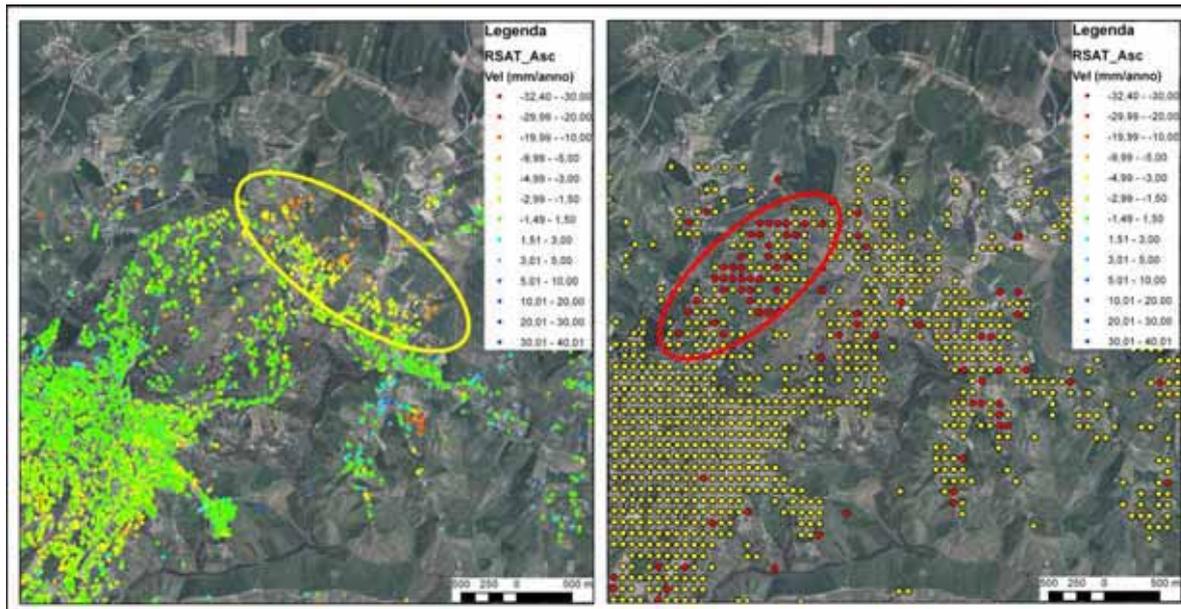


Figura 111: A sinistra i dati PS raw visualizzati per velocità media, a destra i PS sintetici visualizzati per anomalia di trend (in rosso quelli con trend anomali, in giallo quelli con *trend* non-anomali). Dal confronto si osserva che l'area in giallo individuabile in fase di *detection* non è evidenziata come anomala in fase di *monitoring*, mentre l'area segnalata come anomala in fase di *monitoring* presenta velocità medie classificabili come stabili durante la *detection*.

## 7 DISCUSSIONI E PROSPETTIVE FUTURE

Nell'ambito del presente dottorato di ricerca sono state applicate le tecniche di interferometria radar satellitare nell'ambito di diversi progetti che, affrontando diverse tipologie di movimenti di massa localizzati, hanno permesso di effettuare un'analisi critica delle potenzialità e dei limiti di questo strumento in riferimento alla valutazione dei movimenti di massa localizzati per scopi di protezione civile. Ma prima di discutere dell'applicabilità della tecnica in contesti di protezione civile, è corretto affrontare sulla base dei risultati ottenuti, quella che è l'applicabilità della tecnica al controllo dei dissesti idrogeologici.

### **Applicabilità dei dati PS alla valutazione dei dissesti**

Le applicazioni effettuate nel lavoro di tesi congiuntamente ai lavori relativi alla stessa tematica presenti in letteratura hanno permesso di valutare l'applicabilità della tecnica interferometrica satellitare alle diverse tipologie di movimenti di massa localizzati.

Le caratteristiche di precisione, copertura areale e multi-temporalità dell'interferometria radar satellitare consentono di effettuare l'individuazione di aree instabili, anche in zone di scarsa accessibilità o su area vasta, e di osservare la loro evoluzione nel tempo, con tempi e costi piuttosto contenuti rispetto alle tecniche di controllo tradizionali.

La radar-interpretazione fornisce un valido apporto in fase di individuazione, mappatura e caratterizzazione dei dissesti, ma si deve sempre considerare il limite di applicabilità per una serie di fattori legati alle caratteristiche interne della tecnica stessa.

La principale limitazione è dovuta alla possibilità di misurare soltanto movimenti caratterizzati da un'evoluzione lenta o molto lenta e l'impossibilità di controllare fenomeni ad evoluzione rapida (Sez. 3). Deformazioni che superano i 5-10 mm/anno (in riferimento alle caratteristiche di acquisizione dei satelliti ad oggi disponibili) possono infatti essere equivocate e provocare problemi di decorrelazione temporale che riducono o compromettono la qualità dei risultati dell'analisi.

Un ulteriore limite all'applicabilità della tecnica riguarda la difficoltà, o spesso l'impossibilità di ricavare misure di deformazione in presenza di fitta copertura vegetale. La vegetazione riduce infatti la penetrazione del segnale radar al suolo, induce problemi di decorrelazione e limita la presenza di bersagli radar che possono fungere da scatteratori permanenti.

Un'ultima problematica da considerare riguarda la relatività delle misure. Le misure di deformazione dei dati PS vengono riferite alla posizione di un punto di riferimento a terra di coordinate note (*reference point*) e possono essere quindi soggette a *offset* indotti dai movimenti cui è soggetto il punto di riferimento stesso. Tali *offset* possono essere rimossi in fase di *processing* o di *post-processing* ma possono indurre un errore al confronto quantitativo delle misure interferometriche satellitari con i dati *in situ* (inclinometri, misure GPS, ecc.).

Dal punto di vista della scala spaziale alla quale viene eseguita l'analisi, tale problematica non rappresenta una limitazione soprattutto se l'estensione dell'area investigata rientra all'interno di un singolo dataset di punti. Tale questione viene di seguito discussa anche in funzione della tipologia di dissesti monitorabili con dati PS e della tipologia di prodotti ottenibili dalla fase di radar-interpretazione.

### **Scala spaziale di radar-interpretazione dei dati PS**

E' possibile effettuare una radar-interpretazione a diverse scale spaziali, grazie alle caratteristiche di copertura areale, multi-temporalità e precisione delle misure di deformazione dei dati satellitari.

Operare a diverse scale spaziali consente sia di individuare e mappare fenomeni di dissesto su area vasta, sia effettuare un controllo delle deformazioni di singoli centri abitati o versanti instabili.

Nella sezione 5.2 è stato visto che l'analisi dei dati PS può essere condotta a diverse scale, quali quella nazionale, su area vasta e a scala locale. Nell'ambito dei diversi progetti condotti in ambito nazionale che hanno visto la radar-interpretazione effettuata in differenti aree test, è stato possibile identificare le diverse tipologie di dissesti individuabili e mappabili in funzione delle diverse scale spaziali di analisi, ed inoltre andare ad identificare le mappe e gli elaborati che è possibile produrre alle rispettive scale. In Figura 112 viene riportata una sintesi dell'applicabilità della radar-interpretazione alle diverse scale spaziali di analisi, con le rispettive tipologie di dissesti monitorabili e le mappe ed elaborati derivanti dalla caratterizzazione dei fenomeni alla scala di dettaglio.

Scala Spaziale	Scala di radar-interpretazione	Tipologia di dissesto	Mappe ed elaborati
Scala Nazionale	<1:100.000	Grandi aree in subsidenza (estese piane alluvionali o aree deltizie dei principali fiumi nazionali, ingenti estrazioni di fluidi dal sottosuolo), deformazioni in aree vulcaniche.	Mappa dei dissesti
Area Vasta	1:25.000	Aree in subsidenza (piane alluvionali anche di dimensioni ridotte, estrazione di fluidi o scavi nel sottosuolo), fenomeni franosi, tettonica attiva, deformazioni in aree vulcaniche.	Mappa Inventario dei dissesti; Aggiornamento della Mappa Inventario Fenomeni Franosi con classificazione in funzione dello stato di attività e dell'intensità dei fenomeni.
Scala Locale	1:10.000	Aree in subsidenza sino alla scala di fenomeni locali, fenomeni franosi a scala di versante, <i>sinkholes</i> .	Mappa Inventario di dettaglio dei dissesti; Aggiornamento delle Mappe Inventario dei Fenomeni Franosi classificati per tipologia, stato attività ed intensità; Elaborati con dati di caratterizzazione dei dissesti.

**Figura 112 – Valori delle scale di radar-interpretazione con le relative tipologie di dissesto valutabili e le mappe ed elaborati producibili.**

In riferimento alla scala nazionale, è doveroso sottolineare il fatto che l'individuazione e la mappatura delle aree soggette a deformazione superficiale e la relativa mappa dei dissesti prodotta riporta delle informazioni di massima ed indicative delle aree coinvolte, in quanto la scala di analisi non consente di valutare alcuna variazione spaziale dei dissesti. Inoltre è necessario considerare il fatto che un'analisi dei dati PS ad una scala spaziale di 1:100.000 andrebbe inevitabilmente ad interessare zone coperte da varie unità di *processing* che, seppur omogeneizzate su area vasta e quindi apparentemente confrontabili, sono sempre ognuna con il proprio *reference point*. E' quindi concettualmente sbagliato confrontare quantitativamente i dati di spostamento e poi di velocità di aree coperte da PS di unità di

*processing* diverse. Lo scopo del progetto PST, unico esempio di copertura nazionale con dati interferometrici satellitari, non ha infatti lo scopo di individuare e mappare a scala nazionale i dissesti, ma grazie alle caratteristiche di copertura areale, multi-temporalità e precisione delle misure di deformazione dei dati satellitari, quello di fornire uno strumento per la pianificazione territoriale che arrivi ad operare alla scala del singolo edificio.

Una radar-interpretazione condotta su area vasta consente di estrarre le informazioni dai dati satellitari per effettuare una valutazione preliminare dei dissesti individuati e mappati.

L'analisi dei dati satellitari a scala locale consente di individuare e mappare in dettaglio i dissesti e, integrando dati di superficie e di sottosuolo, permette di caratterizzare temporalmente e spazialmente i dissesti. Le informazioni sui movimenti di massa in esame ottenute in fase di radar-interpretazione possono essere per creare e aggiornare mappe inventario dei dissesti. L'informazione fornita dai dati di spostamento e poi di velocità può essere inserita all'interno delle mappe inventario in modo differente in funzione della tipologia del dissesto.

La mappa dei fenomeni franosi riporta la distribuzione spaziale dei movimenti di versante passati ed ancora identificabili sul territorio al momento della realizzazione dell'inventario stesso, includendo spesso informazioni che riguardano la tipologia e lo stato di attività dei fenomeni. L'informazione fornita dall'analisi del dato interferometrico può essere inclusa in una mappa inventario come classificazione dei fenomeni in funzione dell'intensità e dello stato di attività. La mappa delle aree in subsidenza può fornire informazioni sulle cause del dissesto, l'estensione spaziale e l'evoluzione temporale del fenomeno. Inoltre, associando l'informazione fornita dai dati PS, è possibile individuare le aree di massima deformazione e quelle recentemente coinvolte dal fenomeno. Per quanto riguarda la mappa degli sprofondamenti (*sinkholes*), si può associare l'informazione delle velocità di spostamento fornite dai PS ad una mappa che identifica le aree soggette alla formazione di sprofondamenti. Ad esempio si possono individuare aree che presentano elevati valori di velocità su una mappa del censimento delle cavità sotterranee, nel caso di sprofondamenti per cause antropiche, o su una mappa delle aree soggette a dissesti per dissoluzione dei carbonati, nel caso di sprofondamenti per cause naturali.

Oltre alla scala spaziale di radar-interpretazione, è doveroso discutere anche della scala temporale che consente di valutare le attività di analisi dei dati PS in funzione dell'intervallo temporale all'interno del quale vanno ad inserirsi. La suddivisione temporale adottata nel presente progetto di dottorato si basa sulla suddivisione in tempo reale e tempo differito presente all'interno della Dir. P.C.M., 2004. Ciò consente conseguentemente di discutere delle attività di interpretazione e le applicazioni dei dati interferometrici satellitari per la valutazione dei dissesti ai fini di protezione civile.

### **Scala temporale: Valutazione dei dissesti con dati PS nel tempo differito**

Dalle diverse applicazioni effettuate nell'ambito del dottorato è emerso che i dati PS sono un valido strumento per le attività svolte nel tempo differito, atte a consentire l'identificazione, la mappatura e la caratterizzazione, spaziale e temporale, dei movimenti di massa attraverso lo studio e la determinazione delle cause dei fenomeni calamitosi, all'identificazione dei rischi e all'individuazione delle aree del territorio soggette ai rischi stessi.

I risultati ottenuti all'interno del progetto SAR.net, con le aree test di Roma e Napoli (sez. 5.2.2 e 5.3), hanno consentito di evidenziare le potenzialità della tecnica nella valutazione dei dissesti in grandi aree urbane nel tempo differito, inserendo all'interno delle attività di caratterizzazione dei dissesti anche i dati di deformazione superficiale forniti dai PS.

Nello specifico, le attività di valutazione dei dissesti nel tempo differito si vanno ad inserire nella fase di previsione e prevenzione dei rischi idrogeologici, definita sempre all'interno della direttiva. Una attività di mappatura e caratterizzazione spaziale e temporale dei dissesti consente infatti di poter ottenere una mappa inventario dei dissesti di dettaglio che, riportando lo stato della natura con la

distribuzione spaziale dei fenomeni passati ed ancora individuabili sul territorio al momento della realizzazione dell'inventario stesso, costituisce la base per qualsiasi attività di mitigazione del rischio. Una stesura definitiva di una mappa inventario deve sempre comprendere un'attività di validazione con dati di verità a terra in quanto nessuna valutazione può considerarsi conclusiva finché non vengono effettuati gli opportuni confronti con dati di monitoraggio *in situ* e controlli di campagna.

Con il progetto PST si vuole estendere la valutazione dei dissesti per scopi di pianificazione territoriale a tutto il territorio nazionale. I dati PS, che al momento della stesura della presente tesi di dottorato sono ancora in fase di *processing*, sono stati prodotti con uno standard quanto più omogeneo a scala nazionale, ricordando comunque che i dati ERS1/2 ed ENVISAT sono stati processati con 2 tecniche diverse (PS-InSAR e SU-DIFSAR rispettivamente). Il primo lotto del progetto ha visto un aggiornamento dei dati ENVISAT al 2008, con un limite minimo di 35 immagini (sez. 5.2.1.1). E' stato appena approvato il secondo lotto di produzione di dati PS ENVISAT aggiornati al 2010, con l'obiettivo di coprire quanto più territorio nazionale con dati PS il più possibile aggiornati. Essendo un Piano Straordinario, si pone come obiettivo quello della pianificazione territoriale nel tempo differito, ma consente di mettere le basi per un Piano Ordinario di Telerilevamento, che preveda tempi minori di consegna dei dati processati e intervalli stabiliti di aggiornamento.

La realizzazione da parte del MATTM di questo progetto sta consentendo di affrontare diverse questioni inerenti la produzione su scala nazionale dei dati PS e l'interpretazione a diverse scale spaziali dei dati per la valutazione dei dissesti. In dettaglio le questioni principali affrontate sono le seguenti:

- Standard omogenei di produzione del dato PS: sono stati definiti criteri di *processing* dei dati, di individuazione dei punti di misura e di omogeneizzazione dei dati PS estesi a tutto il territorio nazionale. Tali criteri sono stati definiti per un compromesso tra qualità del dato fornito, tempi e costi di elaborazione da progetto;
- Tempi di elaborazione e fornitura dei dati radar: da progetto i dati ENVISAT sarebbero dovuti essere aggiornati a novembre 2008. In realtà l'ultima immagine acquisita dal satellite e fornita da ESA al data provider non sempre corrisponde a tale data in quanto l'archivio ESA non era stato aggiornato in tempi utili per iniziare il *processing* dei dati. Inoltre al momento sono ancora in fase di *processing* i dati ERS1/2 ed ENVISAT nell'area del N Italia. Ciò consentirà di affrontare le problematiche della disponibilità e dell'acquisizione dei dati nell'ambito di un Piano Ordinario di Telerilevamento, orientato verso il monitoraggio del territorio e quindi verso il tempo reale;
- Interpretazione dei dati PS: come è stato più volte sottolineato, le caratteristiche di precisione, copertura areale e multi-temporalità dell'interferometria radar satellitare consentono di effettuare una radar-interpretazione a diverse scale spaziali. Al momento della stesura della presente tesi di dottorato sono in corso le analisi del dato PS a scala locale in 2 aree test con diverse tipologie di geoprocessi attivi, e nello specifico un fenomeno franoso che interessa un centro abitato e un'area in subsidenza per compattazione dei sedimenti in una piana alluvionale. Ciò consentirà di valutare i limiti e le potenzialità dell'utilizzo di un dato PS prodotto a scala nazionale per l'interpretazione dei dissesti.

Non appena i dati PS verranno forniti dal MATTM, l'utilizzo e l'integrazione dei dati radar satellitari per individuazione, mappatura e caratterizzazione, stesura di mappe inventario dei dissesti e valutazione del rischio saranno uno strumento operativo a scala nazionale.

Ma per un uso operativo per scopi di protezione civile, devono essere discussi i punti chiave per trasferire le attività di utilizzo dei dati PS dal tempo differito al tempo reale. E' difatti in questo intervallo temporale, quello in cui si svolgono le attività di protezione civile, con eventi da monitorare solitamente concentrati nello spazio e che richiedono l'individuazione e la sorveglianza di eventi potenzialmente distruttivi, la preparazione di un'emergenza, la previsione a breve termine del verificarsi di una crisi e la successiva gestione fino al suo superamento.

### Scala temporale: Valutazione dei dissesti con dati PS nel tempo reale

Al fine di discutere di un futuro utilizzo operativo dei dati PS nel tempo reale si devono affrontare le problematiche inerenti all'inserimento dei dati radar satellitari nella fase di monitoraggio e sorveglianza definita dalla direttiva nell'ambito del Sistema di Allerta Nazionale.

Sino ad ora il monitoraggio di aree interessate da Dissesti è stato effettuato su segnalazione del DPC con aggiornamento delle immagini radar all'ultima acquisizione del satellite disponibile nell'archivio dell'agenzia spaziale o della società di distribuzione, ma senza contemplare un successivo aggiornamento dei dati con scadenza temporale definita, come nel caso analizzato di Fagnano Castello (sez. 6.1.1).

Dalle diverse applicazioni effettuate nell'ambito di numerosi progetti di ricerca è emerso che le tecniche satellitari multi-interferogramma risultano predisposte per lo sviluppo di un sistema di sorveglianza satellitare a scala nazionale, ma necessitano la soddisfazione di una serie di requisiti di seguito discussi:

- Copertura del territorio

La maggior parte dei satelliti attualmente disponibili possiede una frequenza di acquisizione mensile (es. 24 giorni per RADARSAT, 35 giorni per ERS ed ENVISAT). Essa risulta comunque piuttosto elevata e impedisce di osservare situazioni ad alto rischio che richiedono una maggiore frequenza di controllo.

L'operatività delle nuove missioni spaziali, quali la costellazione di satelliti italiani COSMO-SkyMed, permetterà di risolvere in parte tale problematica, migliorando la frequenza di acquisizione sui siti di interesse, consentendo di effettuare un controllo più efficace delle deformazioni, di individuare movimenti precursori e, conseguentemente, di segnalare rapidamente le situazioni di criticità.

- Acquisizione dei dati

Dal punto di vista operativo, le procedure *standard* di distribuzione dei dati radar satellitari da parte delle diverse agenzie spaziali o delle società di distribuzione, può avvenire secondo differenti modalità, in relazione al tempo di consegna richiesto dall'utente.

Esistono dei protocolli tra le agenzie spaziali e le autorità nazionali di protezione civile, come ad esempio l'*Earth Watching Project* di ESA (<http://earth.esa.int/ew/>) o l'*International Charter on Space and Major Disasters* (<http://www.disasterscharter.org/>), che a seguito di un evento naturale disastroso permettono nell'arco di pochi giorni di trasferire le immagini da satellite alle autorità coinvolte. I protocolli attualmente esistenti sono però concentrati sulle immagini ottiche acquisite prima e dopo l'evento, normalmente utili per la mappatura dei danni indotti dai fenomeni naturali, ma non contemplano il trasferimento di grandi *dataset* di immagini radar per elaborazioni interferometriche. Il progetto europeo SAFER ora in svolgimento è orientato anche alla valutazione dei tempi che intercorrono tra la richiesta del dato per l'area investigata, la consegna da parte dell'ESA e la restituzione dei PS elaborati dal *data provider*. I risultati ottenuti nell'ambito dei diversi progetti concorreranno ad effettuare una stima quanto più realistica dei tempi necessari per la distribuzione dei dati radar satellitari da parte delle diverse agenzie spaziali o delle società di distribuzione.

- Elaborazione e aggiornamento delle misure

Una volta acquisite e trasferite le immagini, inizia la catena interferometrica che include tutte le elaborazioni, dalla focalizzazione delle immagini fino alla produzione dei dati PS. Il tempo necessario per effettuare questo iter dipende da vari fattori tra i quali i più importanti sono rappresentati da:

- numero di immagini radar da elaborare;
- estensione dell'area da analizzare;
- standard di produzione del dato PS;
- capacità di calcolo dei processori utilizzati per le elaborazioni;
- criteri scelti per l'aggiornamento delle misure (strategie di processing e frequenza di aggiornamento).

La tempistica richiesta in fase di elaborazione dipende sia dalla strategia di *processing* selezionata, sia dalla frequenza scelta per l'aggiornamento delle misure.

All'interno del progetto SAR.net, nell'area test di Napoli, è stato sperimentato un monitoraggio su area vasta con aggiornamento del dataset di PS RADARSAT ogni 6 mesi. Questo test ha permesso di stabilire che il confronto tra 2 *dataset* risulta difficile per le seguenti motivazioni: i) il *processing* delle immagini nel II *dataset* non viene ovviamente ripreso dall'ultima immagine del dataset precedente, bensì viene rifatto sin dalla prima immagine. Ciò comporta una migliore stima delle componenti atmosferiche e orbitali e a una più efficace identificazione dei bersagli radar, con conseguenti variazioni nei valori di spostamento rispetto al *dataset* precedente; ii) il riprocessamento delle immagini non garantisce il mantenimento delle esatte coordinate lat-long dei PS individuati per l'analisi SPSA. Difatti la posizione dei PS è affetta da un errore dovuto alla fase di georeferenziazione per il passaggio da coordinate SAR a coordinate geografiche (WGS84) e per l'allineamento dei PS su supporto cartografico mediante traslazione rigida.

Riferendosi ai tempi complessivi necessari per effettuare un *processing* con la tecnica PS, questi possono essere anche molto ristretti. Alcune applicazioni hanno dimostrato che questi possono ridursi a un paio di giorni, dalla ricezione del *dataset* di immagini SAR alla fornitura del dato elaborato. Inoltre, poiché le nuove missioni spaziali, quali RADARSAT-2 e TerraSAR-X prevedono, previo pagamento di un sovrapprezzo, l'accesso al dato nell'arco delle 24 ore dall'acquisizione, si può ipotizzare che nell'arco di 3 giorni dall'ultima acquisizione di interesse sull'area indagata possa essere consegnato l'aggiornamento delle misure.

La frequenza di aggiornamento delle misure satellitari è strettamente connessa ai tempi di rivisitazione dei satelliti sullo stesso sito. Benché in fase di emergenza risulti opportuno attuare strategie di aggiornamento del dato con frequenza pari a quella di acquisizione del sensore utilizzato, le esperienze condotte nelle aree test nell'ambito del progetto SAR.net e le sperimentazioni eseguite sui modelli di segnalazione dei *trend* anomali, hanno mostrato che la selezione di un intervallo di aggiornamento più ampio permette di ricavare un risultato più affidabile e robusto.

- Radar-Interpretazione

Una volta completata l'elaborazione del *dataset* di immagini aggiornato, si attivano le attività di integrazione con dati ancillari (carte topografiche, foto aeree o immagini ottiche da satellite ad altissima risoluzione) e di integrazione con dati di superficie e di sottosuolo, per l'individuazione, mappatura e caratterizzazione dei dissesti.

La tempistica legata a questa fase dipende sia dalla disponibilità di dati ancillari per supportare l'interpretazione delle misure satellitari, sia dai criteri scelti per il confronto tra successivi aggiornamenti finalizzati all'individuazione delle eventuali accelerazioni anomale delle deformazioni all'interno delle serie temporali nell'ambito di un sistema di *early-warning*.

Tali considerazioni mettono in luce la necessità di definire protocolli per la distribuzione rapida dei dati tra le agenzie spaziali e le autorità di protezione civile nazionali e di sviluppare robuste e ben pianificate catene di elaborazione dei dati che includano le modalità e i tempi per l'accesso alle immagini SAR, le elaborazioni interferometriche e la fase di radar-interpretazione per la valutazione dei movimenti di massa localizzati.

## 8 CONCLUSIONI

Nel corso del dottorato di ricerca sono state applicate le tecniche di interferometria radar satellitare nell'ambito di differenti progetti che, affrontando diverse tipologie di movimenti di massa localizzati e diverse scale di analisi spaziali e temporali, hanno permesso di effettuare un'analisi critica delle potenzialità e dei limiti di questo strumento in riferimento alla valutazione dei dissesti per scopi di protezione civile.

A partire dagli anni '90 la disponibilità dei dati interferometrici satellitari ed il conseguente sviluppo di nuove tecniche di elaborazione dei dati, ha portato ad una crescita nell'utilizzo dei dati radar per lo studio delle deformazioni superficiali del terreno indotte da fenomeni naturali quali subsidenze, attività vulcanica, terremoti, ecc., o antropiche, quali estrazione di fluidi dal sottosuolo, attività mineraria, ecc. Negli ultimi anni in particolare, grazie agli sforzi per semplificare il loro utilizzo, l'utilizzo dei dati radar comincia ad estendersi da un ambito prettamente di ricerca, ad un uso più operativo per la gestione dei rischi naturali ad integrazione delle tecniche convenzionali.

Lo sforzo principale della presente ricerca è stato proprio quello di analizzare criticamente i risultati emersi alle diverse scale di interpretazione dei dati nell'ottica di loro un futuro utilizzo in una rete di monitoraggio satellitare a scala nazionale per scopi gestione del rischio idrogeologico in ambito di protezione civile. Inoltre, grazie al coinvolgimento di autorità nazionali, regionali e locali che si occupano di pianificazione territoriale e protezione civile, è stato possibile discutere dell'utilizzo operativo dei dati PS quale strumento a supporto delle attività da loro svolte quotidianamente.

Le sperimentazioni effettuate nei tre anni hanno avuto quindi un duplice scopo: da una parte individuare nell'ambito delle numerose tipologie di movimenti di massa, quelli che presentano caratteristiche evolutive favorevoli al monitoraggio con dati PS, dall'altra di delineare le potenzialità della tecnica per un impiego in riferimento alle esigenze di monitoraggio e gestione del rischio idrogeologico alle diverse scale spaziali e temporali, al fine di definire un futuro protocollo operativo di utilizzo dei dati interferometrici satellitari.

La prima finalità è stata raggiunta integrando le conclusioni derivanti dai casi presenti in letteratura sull'applicabilità della tecnica InSAR satellitare alle diverse tipologie di dissesto con le valutazioni derivanti dai risultati conseguiti sui fenomeni oggetto del presente studio. Le tipologie di movimenti di massa su cui è stata concentrata l'analisi sono stati i fenomeni franosi, le subsidenze, in particolare che coinvolgono grandi aree urbane, ed i *sinkholes*. È stato confermato che questa tecnica si presta in modo soddisfacente al monitoraggio delle prime due tipologie di dissesto, andando però ad escludere frane con velocità che non rientrano nell'intervallo molto o estremamente lento come colamenti di detrito e crolli. I casi di sprofondamento che interessano la superficie del suolo con improvvisi e repentini collassi che avvengono nel corso di un ristretto arco di tempo (6-24 ore), non possono essere monitorati con tecnica PSI date le elevate velocità di innesco e sviluppo.

La seconda finalità è stata affrontata andando a suddividere le attività di analisi dei dati satellitari in funzione della diversa scala temporale (tempo reale e tempo differito sulla base della Dir. P.C.M., 2004) in cui vanno ad inserirsi. Inoltre, all'interno del tempo differito, è stata valutata l'applicabilità ed i risultati ottenuti alle diverse scale spaziali di radar-interpretazione. È stato così possibile definire delle linee guida per l'utilizzo operativo dell'informazione fornita dal dato radar satellitare nelle varie fasi di interpretazione dei dissesti, dall'individuazione e mappatura alla caratterizzazione spaziale e temporale dei fenomeni, al monitoraggio di aree segnalate come a rischio.

In riferimento alla scala temporale, dalle diverse applicazioni effettuate nell'ambito del dottorato è emerso che i dati PS sono un valido strumento per le attività svolte nel tempo differito, atte a consentire l'identificazione, la mappatura e la caratterizzazione, spaziale e temporale, dei movimenti di massa attraverso lo studio e la determinazione delle cause dei fenomeni calamitosi, all'identificazione dei rischi e all'individuazione delle aree del territorio soggette ai rischi stessi.

Nello specifico, le attività di valutazione dei dissesti nel tempo differito si vanno ad inserire nella fase di previsione e prevenzione dei rischi idrogeologici, definita sempre all'interno della direttiva. Una attività di mappatura e caratterizzazione spaziale e temporale dei dissesti consente infatti di poter ottenere una mappa inventario dei dissesti di dettaglio che, riportando lo stato della natura con la

distribuzione spaziale dei fenomeni passati ed ancora individuabili sul territorio al momento della realizzazione dell'inventario stesso, costituisce la base per qualsiasi attività di mitigazione del rischio. Una stesura definitiva di una mappa inventario deve sempre comprendere un'attività di validazione con dati di verità a terra in quanto nessuna valutazione può considerarsi conclusiva finché non vengono effettuati gli opportuni confronti con dati di monitoraggio *in situ* e controlli di campagna.

Per un uso operativo per scopi di protezione civile, devono essere discussi i punti chiave per trasferire le attività di utilizzo dei dati PS dal tempo differito al tempo reale. E' difatti in questo intervallo temporale, quello in cui si svolgono le attività di protezione civile, con eventi da monitorare solitamente concentrati nello spazio e nel tempo, che richiedono l'individuazione e la sorveglianza di eventi potenzialmente distruttivi, la preparazione di un'emergenza, la previsione a breve termine del verificarsi di una crisi e la successiva gestione fino al suo superamento.

Al fine di discutere di un futuro utilizzo operativo dei dati PS nel tempo reale si devono affrontare le problematiche inerenti l'inserimento dei dati radar satellitari nella fase di monitoraggio e sorveglianza definita dalla direttiva nell'ambito del Sistema di Allerta Nazionale. Sino ad ora il monitoraggio di aree interessate da dissesti è stato effettuato su segnalazione del DPC con aggiornamento delle immagini radar all'ultima acquisizione del satellite disponibile nell'archivio dell'agenzia spaziale o della società di distribuzione, ma senza contemplare un successivo aggiornamento dei dati con scadenza temporale definita. Per arrivare ad un sistema operativo di monitoraggio satellitare devono essere affrontati i principali problemi inerenti la copertura del territorio, i tempi di acquisizione dei dati radar satellitari, di elaborazione ed aggiornamento delle misure, ed infine i tempi necessari per le attività di radar-interpretazione.

In riferimento alla scala spaziale di analisi dei dati satellitari, le diverse applicazioni nelle aree test hanno dimostrato che è possibile effettuare una radar-interpretazione a diverse scale spaziali, quali quella nazionale, su area vasta e a scala locale, grazie alle caratteristiche di copertura areale, multi-temporalità e precisione delle misure di deformazione dei dati satellitari. Operare a diverse scale spaziali consente sia di individuare e mappare fenomeni di dissesto su area vasta, sia effettuare un controllo delle deformazioni di singoli centri abitati o versanti instabili. Inoltre, nell'ambito dei diversi progetti condotti in ambito nazionale che hanno visto la radar-interpretazione effettuata in differenti aree test, è stato possibile identificare le diverse tipologie di dissesti individuabili e mappabili in funzione delle diverse scale spaziali di analisi, ed inoltre andare ad identificare le mappe e gli elaborati che è possibile produrre alle rispettive scale.

Nell'ambito del presente progetto di ricerca, per la prima volta è stato possibile analizzare un dato PS processato a scala nazionale. Difatti, con il progetto PST si vuole estendere la valutazione dei dissesti per scopi di pianificazione territoriale a tutto il territorio nazionale. I dati PS, che al momento della stesura della presente tesi di dottorato sono ancora in fase di *processing*, sono stati prodotti con uno standard quanto più omogeneo a scala nazionale. Essendo un Piano Straordinario, si pone come obiettivo quello della pianificazione territoriale nel tempo differito, ma consente di mettere le basi per un Piano Ordinario di Telerilevamento, che preveda tempi minori di consegna dei dati processati e intervalli stabiliti di aggiornamento. La realizzazione di questo progetto sta consentendo di affrontare diverse questioni inerenti la produzione su scala nazionale dei dati PS e l'interpretazione a diverse scale spaziali dei dati per la valutazione dei dissesti, quali la definizione di standard omogenei di produzione del dato PS, tempi di fornitura ed elaborazione e quelli di radar-interpretazione.

Le considerazioni emerse dalla valutazione critica dei risultati ottenuti nell'ambito del dottorato mettono in luce le potenzialità del dato interferometrico satellitare per un uso operativo come sistema di monitoraggio satellitare a scala nazionale. Ma emerge inoltre la necessità di definire protocolli per la distribuzione rapida dei dati tra le agenzie spaziali e le autorità di protezione civile nazionali e di sviluppare robuste e ben pianificate catene di elaborazione dei dati che includano le modalità e i tempi per l'accesso alle immagini SAR, le elaborazioni interferometriche e la fase di radar-interpretazione per la valutazione dei movimenti di massa localizzati. Inoltre, nell'ottica di un futuro Sistema di Allerta Nazionale basato su dati interferometrici satellitari, devono essere svolti ulteriori test con dati elaborati a scala nazionale per la fase di *post-processing* volta all'individuazione e segnalazione di aree con comportamento anomalo di deformazione superficiale (*early-warning*).

---

## **RINGRAZIAMENTI**

## 9 BIBLIOGRAFIA

- Alvarez W., Ammerman A.J., Renne P., Karner D.B., Terrenato N., Montanari A., 1996 – *Quaternary fluvial-volcanic stratigraphy and geochronology of the Capitoline Hill in Rome* - *Geology* 24, 751-754
- Ambrosi C. & Crosta G.B. (2006) - *Large sackung along major tectonic features in the Central Italian Alps*. *Engineering Geology*, vol. 83, nn. 1-3, pp. 183-200, February 2006.
- Arnaud A., Adam N., Hanssen R., Inglada J., Duro J., Closa J., and Eineder M. (2003) - *ASAR ERS interferometric phase continuity*. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 21-25 July 2003, Toulouse (France).
- ARPA Emilia-Romagna 2007 – *Il monitoraggio della subsidenza a scala regionale in Emilia-Romagna*. Pres. Convegno “La subsidenza in Emilia-Romagna. Il monitoraggio tramite interferometria satellitare. Esperienze a confronto” – 3 dicembre 2007, Bologna.
- Autorità di Bacino del fiume Arno, 2007 – *Analisi dei fenomeni di subsidenza nel bacino del fiume Arno tramite l'utilizzo della tecnica di interferometria satellitare PSInSAR. ARPA e Regione Emilia-Romagna*. Pres. Convegno “La subsidenza in Emilia-Romagna. Il monitoraggio tramite interferometria satellitare. Esperienze a confronto” – 3 dicembre 2007, Bologna.
- Barberi F., Buanasorte G., Cioni, R., Fiordelisi A., Foresi L., Iaccarino S., Laurenzi M.A., Sbrana A., Vernia L., Villa I.M., 1994 - *Plio-Pleistocene geological evolution of the geothermal area of Tuscany and Lazio* - *Memorie descrittive della Carta Geologica d'Italia* 49, 77-134.
- Basili R., Bosi C., 1996 - *Morfo-litostratigrafia dell'area romana in sinistra Tevere* - *Il Quaternario* 9, 273-280.
- Bell J.W., Amelung F., Ferretti A., Bianchi M., Novali F., 2008 - *Permanent scatterer InSAR reveals seasonal and long-term aquifer-system response to groundwater pumping and artificial recharge*. *Water Resources Research*, 44, W02407, doi:10.1029/2007WR006152.
- Bellotti P., Chiocchini U., Cipriani N., Milli S., 1993 - *I sistemi deposizionali nei sedimenti clastici pleistocenici affioranti nei dintorni di Ponte Galeria (sud ovest di Roma)* - *Bollettino della Società Geologica Italiana* 112, 923-941.
- Bellucci F., 1994 – *Nuove conoscenze stratigrafiche sui depositi vulcanici del sottosuolo del settore meridionale della Piana Campana* – *Boll. Soc. Geol. It.*, 113, 395-420.
- Berardino P., Costantini M., Franceschetti G., Iodice A., Pietranera L., Rizzo V., 2003 - *Use of differential SAR interferometry in monitoring and modelling large slope instability at Maratea (Basilicata, Italy)*. *Engineering Geology*, vol. 68, nn. 1-2, pp. 31-51, February 2003.
- Boccaletti M., Calamita F., Deiana G., Gelati R., Lentini F., Massari F., Moratti G., Pescatore T., Ricci Lucchi F., Tortorici L., 1990 - *Migrating foredeep-thrust belt system in the northern Apennines and southern Alps* - *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 77, 3-14.
- Boccaletti M., Ciaranfi N., Cosentino D., Deiana G., Gelati R., Lentini F., Massari F., Moratti G., Pescatore T., Ricci Lucchi F., Tortorici L., 1990b - *Palinspatic restoration and paleogeographic reconstruction of the peri-Tyrrhenian area during the Neogene* - *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 77, 41-50.
- Bürgmann R., Hilley G.E., Ferretti A., 2006 - *Resolving Vertical Tectonics in the San Francisco Bay Area from Permanent Scatterer InSAR and GPS Analysis*. *Geology*, 34. Pp.221-224.
- Campolunghi M.P., Capelli G., Funicello R., Lanzini M., 2007 – *Geotechnical studies for foundation settlement in Holocene alluvial deposits in the City of Rome (Italy)* – *Engineering geology*, 89, 9-35.

- Canuti P., Casagli N., Catani F., Farina P., 2005a - *Landslide hazard mapping at a basin scale using remote-sensing data and neural networks*. 4th International Symposium on Landslide Risk Mitigation and Protection of Cultural and Natural Heritage. Kyoto (Japan), 15-16 January 2005. International Consortium on Landslides (ICL).
- Canuti P., Casagli N., Farina P., Ferretti A., Marks F., Menduni G., 2005b - *Land subsidence in the Arno river basin studied through SAR interferometry*. Proc. of SISOLS 2005, Seventh International Symposium on Land Subsidence. Shanghai, China, 23-28 October 2005, 1, 407-416.
- Caramanna G., Ciotoli G., Nisio S., 2008 - *A review of natural sinkhole phenomena in Italian plain areas*. Natural Hazard, 45 (2), pp. 145-172.
- Casagli N., Catani F., Vaselli O., Del Conte S., Benedetti A.I., Cigna F., Giannini L., 2008 - *Valutazione dei dissesti nell'area di Caltanissetta-Santa Barbara con dati elevati da satellite*. Rapporto n. 2.0. Presidenza del Consiglio dei Ministri, Dipartimento della Protezione Civile, Aprile 2009.
- Casagli N., Colombo D., Ferretti A., Guerri L., Righini G., 2008 - *Case Study on Local Landslide Risk Management During Crisis by Means of Remote Sensing Data*. Proceedings of the First World Landslide Forum, Tokyo Japan.
- Casella V. & Galetto R., 1998 - *Tecniche innovative per il rilevamento terrestre, aereo e da satellite*. Atti della 2<sup>a</sup> Conferenza Nazionale ASITA, Bolzano, 24-27 Novembre 1998, Volume 1.
- Cavinato G.P., De Rita D., Milli S. Zarlenga F., 1992 - *Correlazione tra i principali eventi tettonici, sedimentari, vulcanici ed eustatici che hanno interessato l'entroterra (conche intrappeniniche) e il margine costiero tirrenico laziale durante il Pliocene superiore ed il Pleistocene* - Studi Geologici Camerti 1992/1, 109-114.
- Cioni R., Laurenzi M.A., Sbrana A., Villa I.M., 1993 - *40Ar/39Ar chronostratigraphy of the initial activity in the Sabatini Volcanic Complex (Italy)* - Bollettino della Società Geologica Italiana 112, 251-263.
- Civetta L., Orsi G., Pappalardo L., Fischer R.V., Heiken G., Ort M., 1997 - *Geochemical zoning, mingling, eruptive dynamics and depositional processes. The campanian Ignimbrite, Campi Flegrei caldera, Italy* - J. Volcanol. Geotherm. Res., 75: 183-219.
- CNR1991 - Carboni M. G., Funicello R., Parotto M., Marra F., Salvi S., Corazza A., Lombardi L. & Feroci M., 1991 - *Geologia e idrogeologia del centro storico di Roma. Progetto strategico Roma Capitale*, CNR, Roma.
- Colesanti C., Ferretti A., Prati C., Rocca F., 2001 - *Comparing GPS, Optical Leveling and Permanent Scatterers*. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Vol. 6, 2001, pp 2622-2624.
- Colesanti C., Ferretti A., Novali F., Prati C., Rocca F., 2003a - *SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the Permanent Scatterers Technique*. IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens., 41 (7). pp. 1685-1701.
- Colesanti C., Ferretti A., Prati C., Rocca F., 2003b - *Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique*. Engineering Geology, 68 (2003) 3 -14.
- Colesanti C., Le Mouelic S., Bennati M., Raucoules D., Carnec C., Ferretti A., 2005 - *Detection of mining related ground instabilities using the Permanent Scatterers Technique - a case study in the east of France*. International Journal of Remote Sensing, 26 (1), 201-207.
- Colesanti C. & Wasowski J., 2006 - *Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry*. Engineering Geology 88 (2006) 173-199.

- Colombo D., Farina P., Moretti S., Nico G., Prati C., 2003 - *Land subsidence in the Firenze-Prato-Pistoia basin measured by means of spaceborne SAR interferometry*. Proc. of IGARSS 2003, Toulouse, Francia.
- Corazza A., 2004 - *Il rischio di sprofondamenti in Italia: le attività del Dipartimento della Protezione Civile*. 1° seminario sullo stato dell'arte dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio. Roma, 20-21 Maggio 2004, 319-330.
- Corniello A., de Riso R., Ducci D., 1999 - *Carta Idrogeologica della Provincia di Napoli (scala 1:250.000)* - In: *Uso integrato di metodologie per la realizzazione di Carte della Vulnerabilità delle falde all'inquinamento a scala regionale: l'esempio della Provincia di Napoli* - Atti 3° Convegno Nazionale sulla Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee per il III Millennio - CNR-GNDICI, Pubb. 2008, pp. 1.263-1.272.
- Costantini M., Rosen P., 1999 - *A generalized phase unwrapping approach for sparse data* - Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), vol. 1, pp. 267-269, Hamburg, Germany, 28 June - 2 July 1999.
- Costantini M., Rosen P.A. and C.L.Werner (2000a) - *Preventing and masking out unreliable results for critical quantitative applications of phase unwrapping* - Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), vol. 7, pp. 3199-3201, Honolulu, Hawaii, USA.
- Costantini M, Iodice A., Magnapane L. and Pietranera L. 2000b - *Monitoring terrain movements by means of sparse SAR differential interferometric measurements* - Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), vol. 7, pp. 3225-3227, Honolulu, Hawaii, USA.
- Cruden D.M., 1991 - *A simple definition of a landslide*. IAEG Bull., 43, 27-29.
- Cruden D.M. & Varnes D.J., 1994 - *Landslide types and processes*. Turner A.K. & Schuster R.L. (Editors), *Landslides: Investigation and Mitigation*: Sp. Rep. 247, Transportation Research Board, National research Council, National Academy Press, Washington, DC, 36-75.
- D'Agostino N., Selvaggi G., 2004 - *Crustal motion along the Eurasia-Nubia plate boundary in the Calabrian Arc and Sicily and active extension in the Messina Straits from GPS measurements*. *J. Geophys. Res.*, vol. 109, B11402, doi:10.1029/2004JB002998.
- D'Amato Avanzi G., Gianecchini R., Puccinelli A., Verani M., 2004 - *Assetto geologico e pericolosità da sinkholes in aree urbane: il caso di Camaiole (Toscana, Italia)*. 1° seminario sullo stato dell'arte dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio. Roma, 20-21 Maggio 2004, 331-346.
- De Rita D., Milli S., Rosa C., Zarlenga F., 1991 - *Un'ipotesi di correlazione tra la sedimentazione lungo la costa tirrenica della campagna romana e l'attività vulcanica dei Colli Albani*. Studi Geologici Camerti volume speciale 1991/2, 343-349.
- De Rita D., Funicello R., Corda L., Sposato A., Rossi U., 1993 - *Volcanic Unit* - In: Di Filippo, M. (Ed.), *Sabatini Volcanic Complex*. Consiglio Nazionale Delle Ricerche, Progetto Finalizzato " Geodinamica " Monografie Finali 11, pp. 33-79.
- De Rita D., Faccenna C., Funicello R., Rosa C., 1995 - *Stratigraphy and volcano-tectonics* - In: Trigila R. (Ed.). *The Volcano of the Alban Hills*. Tipografia S.G.S., pp. 33-71.
- De Rita D., Bertagnini A., Faccenna C., Landi P., Rosa C., Zarlenga F., Di Filippo M., Carboni M.G., 1997 - *Evoluzione geopetrografica-strutturale dell'area tolfetana*. Bollettino della Società Geologica Italiana 116, 143-175.

- De Sanctis L., Mandolini A., Viggiani G.M.B. 2006 – *Finite element analysis of the excavation of the new Garibaldi station of Napoli underground* – In: Numerical Modelling of Construction Processes in Geotechnical Engineering for Urban Environment. Triantafyllidis ed., pp. 57-67.
- De Sanctis L., 2007 – *Scavi profondi in ambito urbano* – Tesi di dottorato di ricerca in Ingegneria Geotecnica (inedita) – Università degli Studi di Napoli “Parthenope”.
- Deino A.L., Orsi G., de Vita S., Piochi M, 2004 – *The age of the Neapolitan Yellow Tuff caldera forming eruption assessed by  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating method* – Journal of Vulcanology and Geothermal Research, 133, 157-170.
- Della Vedova B., Bellini S., Pellis G., Squarci P., 2001 - *Deep temperatures and surface heat flow distribution* - In: Vai, G.B., Martini, I.P. (Eds.), Anatomy of an Orogen: The Apennines and Adjacent Mediterranean Basin. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht the Netherlands, pp. 65–67.
- Di Girolamo P., GhiarabM.R., Lirer L., Munno R., Rolandi G., Stanzione D., 1984 – *Vulcanologia e petrologia dei Campi Flegrei* – Boll. Soc. Geol. It., 103, 349-413.
- Dir. P.C.M. 27/02/2004 - *Indirizzi operativi per la gestione organizzativa e funzionale del Sistema di Allerta Nazionale per il rischio idrogeologico ed idraulico ai fini di protezione civile.*
- Di Vito M.A., Isaia R., Orsi G., Southon J., D’Antonio M., de Vita S., Pappalardo L., Piochi M., 1999 – *Volcanism and deformation since 12,000 years at the Campi Flegrei caldera (Italy)* – J. Volcanol. Geotherm. Res., 91, 221-246
- Dixon T.H., Amelung F., Ferretti A., Novali F., Rocca F., Dokkas R., Sella G., Kim S.W., Wdowinski S., Whitman D., 2006 - *Subsidence and flooding in New Orleans*. Nature, 441, pp. 587-588.
- Dumas, B., Guerey, P., Lhenaff, R., Raffy, J., 1982 - *Le soulèvement quaternaire de la Calabrie méridionale*. Revue Géol. Dynam. Géograph. Phys., vol. 23, pp. 27–40.
- Elias P, Kontoes C., Papoutsis I, Kotsis I, Marinou A, Paradissis D., Sakellariou D., 2009 - *Permanent Scatterer InSAR Analysis and Validation in the Gulf of Corinth*. Sensors 2009, 9, 46-55; doi:10.3390/s90100046.
- Faccenna C., Funicello R., Marra F., 2005 – *Inquadramento geologico strutturale dell’area romana* – In: “La geologia di Roma. Il Centro Storico”. Mem. descr. della Carta Geol. D’Italia, 50, 31-46.
- Farina P., Colombo D., Fumagalli A., Gontier E., Moretti S. (2003) - *Integration of Permanent Scatterers Analysis and High Resolution Optical Images within Landslide Risk Analysis*. FRINGE 2003 – Frascati, pp 1-8.
- Farina P., Colombo D., Fumagalli A., Marks F., Moretti S., 2006 - *Permanent Scatterers for landslide investigations: outcomes from the ESA-SLAM project*. Engineering Geology, v. 88, p.200-217.
- Farina P., Casagli N., Ferretti A., 2007 - *Radar-interpretation of InSAR measurements for landslide investigations in civil protection practices*. First North American Landslide Conference, June 3-8, 2007.Vail, Colorado.
- Ferranti L., Monaco C., Morelli D., Antonioli F., Maschio L., 2008 - *Holocene activity of the Scilla Fault, Southern Calabria: Insights from coastal morphological and structural investigations*. Tectonophysics, 453, pp. 74-93
- Ferretti A., Basilico M., Novali F., Prati C., 2004 – *Possibile utilizzo dei dati radar satellitari per individuazione e monitoraggio di fenomeni di sinkholes* – 1° seminario sullo stato dell’arte dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio. Roma, 20-21 Maggio 2004, 415-424.

- Ferretti A., Prati C., Rocca F., 2000a - *Measuring Subsidence with SAR Interferometry: Applications of the Permanent Scatterers Technique*. Proceedings of the Sixth International Symposium on Land Subsidence, Vol. II, SISOLS2000, 24-29 Settembre 2000, Ravenna, pp. 67-79.
- Ferretti A., Prati C., Rocca F., 2000b - *Non-linear subsidence rate estimation using Permanent Scatterers in Differential SAR interferometry*. Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 38 (5), 2202-2212.
- Ferretti A., Prati C., Rocca F., 2001 - *Permanent Scatterers in SAR interferometry*. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 39 (1), 8–20.
- Ferretti A., Prati C., Rocca F., Casagli N., Farina P., Young, B., 2005 - *Permanent Scatterers technology: a powerful state of the art tool for historic and future monitoring of landslides and other terrain instability phenomena*. Proc. of 2005 International Conference on Landslide Risk Management, Vancouver, Canada.
- Ferrucci F., Gaudiosi G., Pino N.A., Luongo G., Hirn A., Mirabile L., 1989 - *Seismic detection of a major Moho upheaval beneath the Campania volcanic area (Naples, Southern Italy)* - Geophys. Res. Lett., 16, 1317–1320.
- Fisher R.V., Orsi G., Ort M., Heiken G., 1993 - *Mobility of large-volume pyroclastic flow, emplacement of the Campanian Ignimbrite, Italy* - J. Volcanol. Geotherm. Res., 56, 205-220.
- Fornaseri M., 1985 - *Geochronology of volcanic rocks from Lazio (Italy)* - Rendiconti della Società Italiana di Mineralogia e Petrografia 40, 73-106.
- Funicello R., Giordano G., 2005 - *Carta geologica del Comune di Roma (Volume 1)* - <http://www.geologis.it/CartaRoma/index1.htm>
- Funicello R., Locardi, E., Parotto, M., 1976 - *Lineamenti geologici dell'area sabatina orientale* - Bollettino della Società Geologica Italiana, 95, 831-849.
- Funing G. J., Burgmann R., Ferretti A., Novali F., Fumagalli A., 2007 - *Creep on the Rodgers Creek fault, northern San Francisco Bay area from a 10 year PS-InSAR dataset*. Geophysical Research Letters, 34, L19306, doi:10.1029/2007GL030836.
- Goes S., Giardini D., Jenny S., Hollenstein C., Kahle H.-G., Geiger A., 2004 - *A recent tectonic reorganization in the south-central Mediterranean*. Earth Planet. Sci. Lett., vol. 226, pp. 335–345.
- Gvirtzman Z., Nur A., 2001 - *Residual topography, lithospheric structure and sunken slabs in the central Mediterranean*. Earth Planet. Sci. Lett., vol. 187, pp. 117–130.
- Hilley G.E., Burgmann R., Ferretti A., Novali F., Rocca F., 2004 - *Dynamics of slow-moving landslides from Permanent Scatterer analysis*. Science, 304 (5679), 1952-1955.
- Karner D.B. & Marra F., 1998 - *Correlation of fluvio deltaic aggradational sections with glacial climate history: a revision of the Pleistocene stratigraphy of Rome* - Bulletin Geological Society of America 110, 748-758
- Karner D.B., Marra F., Renne P.R., 2001 - *The history of the Monti Sabatini and Alban Hills volcanoes: groundwork for assessing volcanic-tectonic hazards for Rome* - Journal of Volcanology and Geothermal Research 107, 185-219.
- Karner D.B. & Renne P.R., 1998 -  *$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology of Roman volcanic province tephra in the Tiber River valley: age calibration of Middle Pleistocene sea-level changes* - Bulletin Geological Society of America 110, 740-747.
- Ippolito F., Ortolani F., Russo M., 1973 - *Struttura marginale tirrenica dell'Appennino campano: reinterpretazioni di dati di antiche ricerche di idrocarburi* - Mem. Soc. Geol. Ital., 12, 27–250.

- IUGS/WGL, 1995 - *A suggested method for describing the rate of movement of a landslide*. IAEG Bull., 52, 75-78.
- Lanari R., Berardino P., Borgstro S., Del Gaudio C., De Martino P., Fornaro G., Guarino S., Ricciardi G.P., Sansosti E., Lundgren P., 2004 - *The use of IFSAR and classical geodetic techniques for caldera unrest episodes: application to the Campi Flegrei uplift event of 2000*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 133, 247-260.
- Lanari R., Casu F., Manzo M., Lundgren P., 2007 - *Application of the SBAS-DInSAR technique to fault creep: A case study of the Hayward fault, California*. Remote Sensing of Environment, 109, 20-28.
- Lanzafame G. & Zuffa G.G., 1976 - *Geologia e Petrografia del Foglio Bisignano - Bacino del Crati, Calabria - con Carta Geologica alla scala 1:50.000* – Geol. Rom., 15, 223-270.
- Locardi E., Lombardi G., Funicello R., Parotto M., 1976 - *The main volcanic group of Lazio (Italy): relations between structural evolution and petrogenesis* - Geologica Romana 15, 279-300.
- Malatesta A., Zarlenga F., 1988 - *Evidence of Middle Pleistocene marine transgressions along the mediterranean coast* - Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 68, 311-315.
- Malkawi A.I.H., Alawneh A.S., Abu-Safaqah O.T., 1999 - *Effects of organics matter on the physical and physicochemical properties of an illitic soil* – Applied Clay Science 14, 257-278.
- Manzo M., Ricciardi G.P., Casu F., Ventura G., Zeni G., Borgstrom S., Berardino P., Del Gaudio C., Lanari R., 2005 - *Surface deformation analysis in the Ischia Island (Italy) based on spaceborne radar interferometry*. Journal of Volcanology and Geothermal Research 151, pp.399-416.
- Mariani M., Prato R., 1988 - *I bacini neogenici costieri del margine tirrenico: approccio sismo-stratigrafico* - Mem. Soc. Geol. Ital., 41, 519-531.
- Marra F. & Rosa C., 1995 - *Stratigrafia ed assetto geologico dell'area romana* – In: “La geologia di Roma. Il Centro Storico”. Mem.descr. della Carta Geol. D'Italia, 50, 47-112.
- Marra F., Rosa, C., De Rita, D., Funicello, R., 1998 - *Stratigraphic and tectonic features of the Middle Pleistocene sedimentary and volcanic deposits in the area of Rome (Italy)* - Quaternary International 47/48, 51-63.
- Massironi M., Zampieri D., Bianchi M., Schiavo A., Franceschini A. (in stampa) - *Use of PSInSAR™ data to infer active tectonics: Clues on the differential uplift across the Giudicarie belt (Central-Eastern Alps, Italy)*. Tectonophysics.
- Massonnet D. & Feigl K.L., 1998 - *Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface*. Rev. Geophys., 36. 441-500.
- Milia, A., 1999 - *Aggrading and prograding infill of a pery-tyrrhenian basin (Naples Bay, Italy)* - Geo-Mar. Lett., 19, 237-244.
- Meisina C., Zucca F., Conconi F., Verri F., Fossati D., Ceriani M., Allievi J., 2007 - *Use of Permanent Scatterers technique for large-scale mass movement investigation*. Quaternary International 171-172, pp.90-107.
- Meisina C., Zucca F., Fossati D., Ceriani M., Allievi J., 2006 - *Ground deformations monitoring by using the Permanent Scatterers Technique: the example of the Oltrepo Pavese (Lombardia, Italy)*, Engineering Geology, 88, 240-259.
- Milia A., Torrente, M.M., 1997 - *Evoluzione tettonica della Penisola Sorrentina (margine peritirrenico campano)*. Boll. Soc. Geol. Ital., 116, 487-502.
- Milli S., Zarlenga, F., 1991 - *Analisi di facies dei depositi tirreniani (Duna Rossa) affioranti nell'area di Castel Porziano-Pomezia (Roma). Una revisione ambientale*. Il Quaternario 4, 233-248.

- Milli S., 1992 - *Analisi di facies e ciclostratigrafia in depositi di piana costiera e marino marginali. Un esempio nel Pleistocene del Bacino Romano* - Unpublished Ph.D. dissertation, Università Di Roma "La Sapienza", Roma.
- Milli S., 1994 - *High-frequency sequence stratigraphy of the middle-late Pleistocene to Holocene deposits of the Roman Basin (Rome, Italy): relationships among high-frequency eustatic cycles, tectonics and volcanism* - In: Posamentier, H.W., Mutti, E. (Eds.), Second High-Resolution Sequence Stratigraphy Conference. Tremp, Spain, 20-27 June 1994.
- Milli S., 1997. *Depositional setting and high-frequency sequence stratigraphy of the Middle-Upper Pleistocene to Holocene deposits of the Roman Basin*. *Geologica Romana* 33, 99-136.
- Milli S., 2001 - *Elephants and their environment: a reconstruction of the Middle-Late Pleistocene to Holocene paleogeography of the Rome area using facies and physical stratigraphic analyses* - Field trip guide, 1st International Congress "The World of Elephants" Rome, 16-20 October 2001.
- Musson R.M.W., Haynes M., Ferretti A., 2004 - *Space-based tectonic modelling in subduction areas using PSInSAR*. *Seismological Research Letters*, 75 (5), 598-606.
- Ogniben L. 1969 - *Schema introduttivo alla geologia del confine calabro-lucano*. *Mem. Soc. Geol. It.*, 8: 453-763.
- Orsi G., Civetta L., D'Antonio M., Di Girolamo P., Piochi M., 1995 – *Step filling and development of the three-layers magma chamber: the Neapolitan Yellow Tuff case history* – *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 67, 291-312.
- Orsi G., De Vita S., Di Vito M., 1996 – *The restless, resurgent Campi Flegrei nested caldera (Italy): constraints on its evolution and configuration* – *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 74, 179-214.
- Pancioli V., Raetz H., Campolmi T., Casagli N., 2008 - *Terrafirma Landslide Services for Europe based on Space-borne InSAR Data*. *Proceedings of the First World Landslide Forum*: 81-84, Tokyo, Japan.
- Parcharidis I., Fomelis M., Kourkoulis P., Wegmuller U. (2009) - *Persistent Scatterers InSAR to detect ground deformation over Rio-Antirio area (Western Greece) for the period 1992–2000*. *Journal of Applied Geophysics*, 68, 348-355.
- Patacca, E., Sartori, R., Scandone, P., 1990 - *Tyrrhenian basin and apenninic arcs: kinematic relations since late Tortonian times* - *Memorie della Società Geologica Italiana* 45, 425-451.
- Prati C., Colombo D., Giannico C., Novali F., Tamburini A. (2008) – *Monitorare il Territorio da Satellite - Interferometria SAR Satellitare e Tecnica dei Permanent Scatterers*. Materiale didattico del corso di formazione.
- Righini G., Del Ventisette C., Costantini M., Malvarosa F., Minati F., 2008 - *Space-borne SAR Analysis for Landslides Mapping in the Framework of the PREVIEW Project*. *Proceedings of the First World Landslide Forum*, Tokyo Japan.
- Rizzo V. & Tesauro M., 2000 – *SAR Interferometry and Field Data of Randazzo Landslide (Eastern Sicily, Italy)*. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, Volume 25, Issue 9.
- Rosen P.A., Hensley S., Joughin I.R., Li F.K., Madsen S.N., Rodriguez E., Goldstein R.M., 2000 - *Synthetic aperture radar interferometry*. *Proc. I.E.E.E.* 88 (3). 333-382.
- Rosi M. & Sbrana A., 1987 – *The Phlegrean Fields* – *Quaderni de "La Ricerca Scientifica"*, 114, 1-175.
- Scandone P., 1979 – *Origin of the Tyrrhenian Sea and Calabrian arc* – *Boll. Soc. Geol. It.*, 98, 27-34.
- Squarzonni C., Allemand P., Delacourt C., 2003 – *Nine years of spatial and temporal evolution of the La Valette landslide observed by SAR Interferometry*. *Engineering Geology* 68, 2003.

- Stramondo S., Bozzano F., Marra F., Wegmuller U., Cinti F.R., Moro M., Saroli M., 2008 - *Subsidence induced by urbanisation in the city of Rome detected by advanced InSAR technique and geotechnical investigations*. Remote Sensing of Environment, Volume 112, 3160-3172
- Strozzi T., Farina P., Corsini A., Ambrosi C., Thüning M., Zilger J., Wiesmann A., Wegmüller U., Werner C., 2005 – *Survey and monitoring of landslide displacements by means of L-band satellite SAR interferometry*. Landslides 2005 vol.2, n.3, pp 193-201.
- Tellini A., 1893 - *Carta geologica dei dintorni di Roma. Regione alla destra del Tevere*. Scala 1:15.000.
- Tortorici L., Monaco C., Tansi C., Cocina O., 1995 – *Recent and active tectonics in the Calabrian arc, Southern Italy – Tectonophysics*, 243, 37-55
- TRE - Tele-Rilevamento Europa S.r.l. (2003) - *Analisi di deformazioni superficiali e di movimenti di caposaldi mediante elaborazione di dati radar satellitari con la tecnica dei Permanent Scatterers*. Maggio 2003. 29 pp.
- TRE - Tele-Rilevamento Europa S.r.l. (2008) – *PSInSAR – Manuale d'uso*. Gennaio 2008. 84 pp.
- Turco E., Schettino A., Pierantoni P.P., Santarelli G., 2006 - *The Pleistocene extension of the Campania Plain in the framework of the southern Tyrrhenian tectonic evolution: morphotectonic analysis, kinematic model and implications for volcanism* - In: De Vivo, B. (Ed.), *Volcanism in the Campania Plain: Vesuvius, Campi Flegrei and Ignimbrites*. Elsevier, Series “Developments in Volcanology”, vol. 9, pp. 27–51.
- Vilardo G., Ventura G., Terranova C., Matano F., Nardò S. (2009) - *Ground deformation due to tectonic, hydrothermal, gravity, hydrogeological, and anthropic processes in the Campania Region (Southern Italy) from Permanent Scatterers Synthetic Aperture Radar Interferometry*. Remote Sensing of Environment, 113, 197-212.
- Ventriglia U., 2002 – *Geologia del Territorio del Comune di Roma*- Amministrazione Provinciale di Roma – Difesa del Suolo.
- Verri A., 1915 - *Cenni spiegativi della Carta Geologica di Roma pubblicata dal R. Uff. Geologico su rilevamento del Tenente Generale A. Verri*. Istituto Geogr. De Agostini, Novara, pp. 56.
- Westaway, R., 1993 - *Quaternary uplift of Southern Italy*. J. Geophys. Res., vol. 98, pp. 21741-21772.
- Westaway, R., 2002 - *The Quaternary evolution of the Gulf of Corinth, central Greece: Coupling between surface processes and flow in the lower continental crust*. Tectonophysics, vol. 348, pp. 269–318.
- Westaway, R., Pringle, M., Yurtmen, S., Demir, T., Bridgland, D., Rowbotham, G., Maddy, D., 2004 - *Pliocene and Quaternary regional uplift in western Turkey: The Gediz river terrace staircase and the volcanism at Kula*. Tectonophysics, vol. 391, pp. 121–169.
- Westaway, R., Guillou, H., Yurtmen, S., Beck, A., Bridgland, D., Demir, T., Scaillet, S., Rowbotham, G., 2006 - *Late Cenozoic uplift of western Turkey: Improved dating of the Kula Quaternary volcanic field and numerical modelling of the Gediz river terrace staircase*. Global Planet. Change, vol. 51, pp. 131–171.
- Wohletz K., Orsi G., de Vita S., 1995 – *Eruptive mechanisms of the Neapolitan Yellow Tuff interpreted from stratigraphic, chemical and granulometric data* – J. Volcanol. Geotherm. Res., 67, 263-290.
- Wortel, M. J. R., Spakman, W., 2000 - *Subduction and slab detachment in the Mediterranean-Carpathian region*. Science, vol. 290, pp. 1910–1917.