



# Regione Emilia-Romagna

Assessorato Ambiente e Sviluppo Sostenibile

Assessorato Sicurezza Territoriale, Difesa del Suolo e della Costa, Protezione Civile

AT05



Provincia di Bologna

## RILIEVO DELLA SUBSIDENZA NELLA PIANURA EMILIANO-ROMAGNOLA

## ANALISI INTERFEROMETRICA





Referenti per la Regione Emilia-Romagna:

**Giuseppe Bortone**, Direttore Generale Ambiente, Difesa del Suolo e della Costa;

**Vinicio Ruggeri**, Responsabile del Servizio Pianificazione di Bacino e della Costa, Assessorato Sicurezza Territoriale, Difesa del Suolo e della Costa, Protezione Civile.

Referenti per la Provincia di Bologna - Settore Ambiente:

Il Direttore **Gianpaolo Soverini e Paola Cavazzi**.

Hanno collaborato alla realizzazione del progetto:

**Flavio Bonsignore** - Responsabile del progetto (ARPA, Ingegneria Ambientale).

**Tele-Rilevamento Europa T.R.E. s.r.l.** : Analisi interferometrica.

**Gabriele Bitelli e Luca Vittuari** (DISTART-Università di Bologna), **Flavio Bonsignore** (ARPA, Ingegneria Ambientale): verifica ed elaborazione dei risultati dell'analisi interferometrica, analisi dei movimenti.

**Monica Branchi** (ARPA, Ingegneria Ambientale): elaborazioni cartografiche.

Copertina: elaborazione grafica di Leda Ferrari.

## INDICE

<b>1. PREMESSA</b>	<b>1</b>
<b>2. OBIETTIVI ED ATTIVITA' REALIZZATE</b>	<b>2</b>
<b>3. ANALISI INTERFEROMETRICA</b>	<b>2</b>
<b>3.1 Introduzione</b>	<b>2</b>
<b>3.2 Metodologia</b>	<b>3</b>
<b>3.3 Strategia di Progetto</b>	<b>5</b>
3.3.1 Dati utilizzati	5
3.3.2 Selezione dell'immagine master	10
3.3.3 L'area d'interesse	11
3.3.4 Analisi interferometrica	14
3.3.5 La tecnica dei diffusori permanenti	14
<b>3.4 Risultati dell'analisi</b>	<b>15</b>
3.4.1 Punto di Riferimento	15
3.4.2 I parametri di qualità: Coerenza e Deviazione Standard	16
3.4.3 Assenza di PS: principali motivazioni	17
<b>4. VERIFICA ED ELABORAZIONE DEI RISULTATI DELL'ANALISI INTERFEROMETRICA</b>	<b>19</b>
<b>4.1 Premessa</b>	<b>19</b>
<b>4.2 Il materiale disponibile</b>	<b>19</b>
4.2.1 I dati ERS	20
4.2.2 I dati ENVISAT	21
4.2.3 I punti di riferimento nell'analisi interferometrica	24
<b>4.3 Analisi dei risultati, problematiche e confronti con gli esiti delle campagne di livellazione geometrica</b>	<b>26</b>
4.3.1 Problematiche legate al dato interferometrico	27
4.3.2 Confronti con i dati di livellazione geometrica e realizzazione del database	42
4.3.3 Realizzazione dei prodotti finali	48
<b>5. ANALISI DEI MOVIMENTI VERTICALI DEL SUOLO</b>	<b>49</b>
<b>5.1 Periodo 1992-2000</b>	<b>49</b>

5.2	<i>Periodo 2002-2006</i>	54
6.	<b>CONCLUSIONI</b>	63
7.	<b>APPENDICE -Approfondimenti tecnici</b>	66

**ALLEGATI:**

1. Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 1992-2000,  
Scala 1:250.000;
2. Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 1992-2000 –  
provincia di Bologna – Scala 1:100.000;
3. Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 1992-2000 –  
Zona costiera – Scala 1:100.000;
4. Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2002-2006 –  
Scala 1:250.000;
5. Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2002-2006 –  
provincia di Bologna – Scala 1:100.000;
6. Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2002-2006 –  
Zona costiera – Scala 1:100.000;

## 1. PREMESSA

Le attività inerenti il presente progetto costituiscono il completamento delle attività già avviate nell'ambito del lavoro complessivo denominato "*Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola*" la cui realizzazione la Regione Emilia-Romagna ha affidato ad ARPA tramite i seguenti incarichi:

1. con D.G.R. n° 1542 del 30/07/2004 per un importo pari a **€ 125.000** relativamente al progetto "*Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola. Stralcio di attività finalizzate alla misura di una rete di livellazione a supporto dell'analisi interferometrica*";
2. con D.G.R. n° 2793 del 30/12/2004 per un importo pari a **€ 207.395** relativamente al progetto "*Misure di livellazione di alta precisione della rete costiera di controllo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola*";
3. con D.G.R. n° 1218 del 25/07/2005 per un importo pari a **€65.143** relativamente al progetto "*Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola. Il stralcio di attività finalizzate alla misura di una rete di livellazione a supporto dell'analisi interferometrica*";
4. con D.G.R. n° 1218 del 25/07/2005 per un importo pari a **€ 150.715,16** relativamente al progetto "*Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola – analisi interferometrica*";
5. **il completamento - con il presente progetto - delle attività relative al progetto complessivo "*Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola*" è stato finanziato tramite le economie realizzate sui progetti di cui ai punti 2 e 3 per un importo complessivo pari a € 91.521 e tramite ulteriori contributi della Regione Emilia-Romagna per € 21.764 e della Provincia di Bologna per € 30.000 (Convenzione tra Regione, Provincia di Bologna e ARPA, approvata con D.G.R. n° 1908 del 29/12/2006).**

I progetti di cui ai punti 1, 2 e 3 hanno riguardato in particolare la realizzazione delle misure di livellazione - attività preliminari, rilievi di campagna ed elaborazioni. Gli elaborati finali sono stati consegnati alla Regione nell'ottobre 2005 (punto 1) e nel marzo del 2006 (punti 2 e 3). Conseguiti i risultati derivanti dalle misure topografiche si è proceduto, tramite il progetto di cui al punto 4, all'avvio della fase successiva relativa, in particolare, all'analisi interferometrica e all'aggiornamento del database della rete regionale di controllo della subsidenza (rete di livellazione) con un primo stralcio di

attività conclusosi nel novembre del 2006 e riguardante la realizzazione dell'analisi interferometrica e l'avvio dei lavori di aggiornamento del database. Per il completamento di tali attività è stato attivato nel dicembre 2006 il presente progetto relativo, segnatamente, all'elaborazione dei dati interferometrici ai fini della realizzazione di carte delle velocità di movimento verticale del suolo e al completamento dell'aggiornamento del database.

## **2. OBIETTIVI ED ATTIVITA' REALIZZATE**

Gli obiettivi del lavoro complessivo menzionato in premessa "*Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola*" sono:

1. la lettura aggiornata del fenomeno della subsidenza nell'ambito della pianura emiliano-romagnola, da realizzarsi con il metodo dell'interferometria differenziale, supportato dalla misura di una rete di livellazione (sottoinsieme della rete regionale);
2. l'aggiornamento del database della rete regionale di controllo della subsidenza (rete di livellazione).

In particolare, nel presente rapporto vengono presentate le attività relative al punto 1:

- analisi interferometrica;
- elaborazione dei dati interferometrici ai fini della redazione di carte delle velocità di movimento verticale del suolo nei periodi 1992-2000 e 2002-2006 ed analisi dei risultati.

## **3. ANALISI INTERFEROMETRICA**

### **3.1 INTRODUZIONE**

La Tecnica PS (*Permanent Scatterers Technique* - PSInSAR<sup>TM</sup>) è stata sviluppata e brevettata dal Politecnico di Milano e concessa in licenza esclusiva a TRE, primo *spin-off* commerciale del Politecnico, nel 2000. Si tratta di uno strumento molto efficace per il monitoraggio ad alta precisione di fenomeni di deformazione della superficie terrestre, basato sull'impiego di serie temporali d'immagini radar satellitari.

I sistemi radar satellitari coerenti e nello specifico i radar di tipo SAR (*Synthetic Aperture Radar*) utilizzati nella presente elaborazione sono in grado di misurare la distanza tra il sensore e il bersaglio, registrando il tempo intercorso tra l'emissione dell'onda elettromagnetica e la ricezione del segnale retro-diffuso dal bersaglio stesso.

Grazie alla loro periodicità di acquisizione (circa mensile) i dati SAR forniscono misure ripetute della distanza sensore-bersaglio. Il confronto della distanza misurata in istanti di tempo diversi consente di mettere in luce eventuali spostamenti del bersaglio.

La Tecnica PS si pone come obiettivo quello di sfruttare tutte le acquisizioni disponibili su una stessa area ed individuare quei bersagli (*Permanent Scatterers*) che mantengono inalterate nel tempo le proprie caratteristiche elettromagnetiche. Per ciascuno di essi è possibile stimare e rimuovere il disturbo atmosferico, e quindi ricostruire la storia dei movimenti nell'intervallo di tempo analizzato.

### **3.2 METODOLOGIA**

Il complesso di algoritmi che costituisce l'analisi PS consta di diverse fasi. La prima fase prevede l'individuazione, all'interno degli archivi dei satelliti ERS1 e ERS2 (Agenzia Spaziale Europea, ESA), del satellite ENVISAT (ESA) e del satellite RADARSAT (Agenzia Spaziale Canadese, CSA) del *dataset* di immagini più idoneo per l'area ed i periodi di interesse.

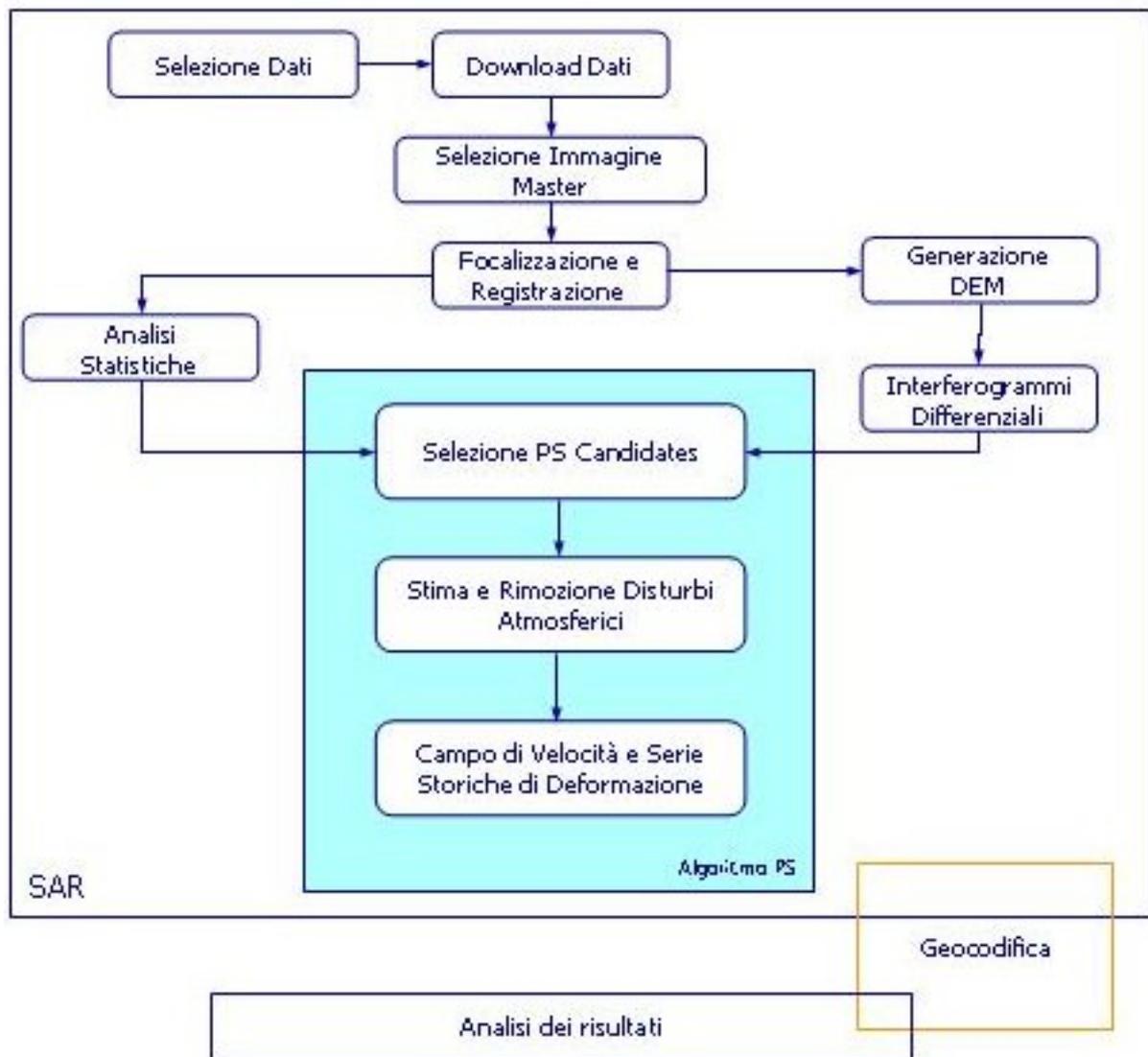
Successivamente viene selezionata l'immagine denominata *master* che costituirà il riferimento temporale e geometrico per tutte le altre immagini, denominate *slave*.

L'analisi procede con la fase di *focalizzazione* che consente di trasformare i dati grezzi (*raw*), in matrici di numeri complessi corrispondenti ai segnali di ampiezza e di fase. Segue l'operazione di *registrazione*, ovvero tutte le immagini vengono riferite ad un'unica geometria così che a pixel omologhi in immagini diverse corrispondano le stesse celle di risoluzione al suolo da cui la *generazione degli interferogrammi* differenziali.

Il passo successivo è rappresentato dallo *studio delle statistiche* dei segnali di ampiezza e di fase che consente l'individuazione di quei bersagli (pixel) candidati a divenire Permanent Scatterers (*PS Candidates*) grazie ai quali è possibile stimare e rimuovere il disturbo atmosferico di ciascuna immagine.

Si passa infine alla *stima degli spostamenti* su tutti i pixel che risultino avere un elevato rapporto segnale-rumore e all'operazione finale di *geocodifica* dei risultati, che ne rende possibile il loro utilizzo in ambiente GIS.

La figura seguente schematizza il processo di elaborazione.



**Fig. 1** - Schema a blocchi del processo di elaborazione della Tecnica PS.

### 3.3 STRATEGIA DI PROGETTO

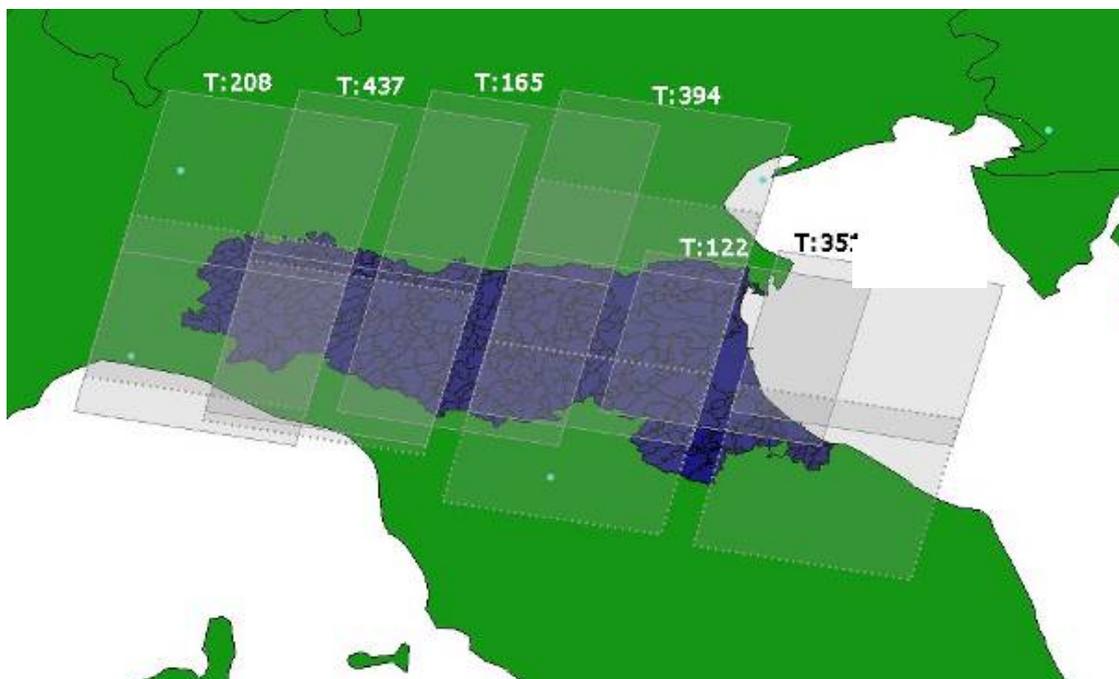
#### 3.3.1 Dati utilizzati

Sull'area oggetto di studio l'analisi degli archivi di immagini ESA ha portato all'individuazione di 5 Track per la geometria discendente e 5 per quella ascendente che ricoprono l'area di interesse considerata.

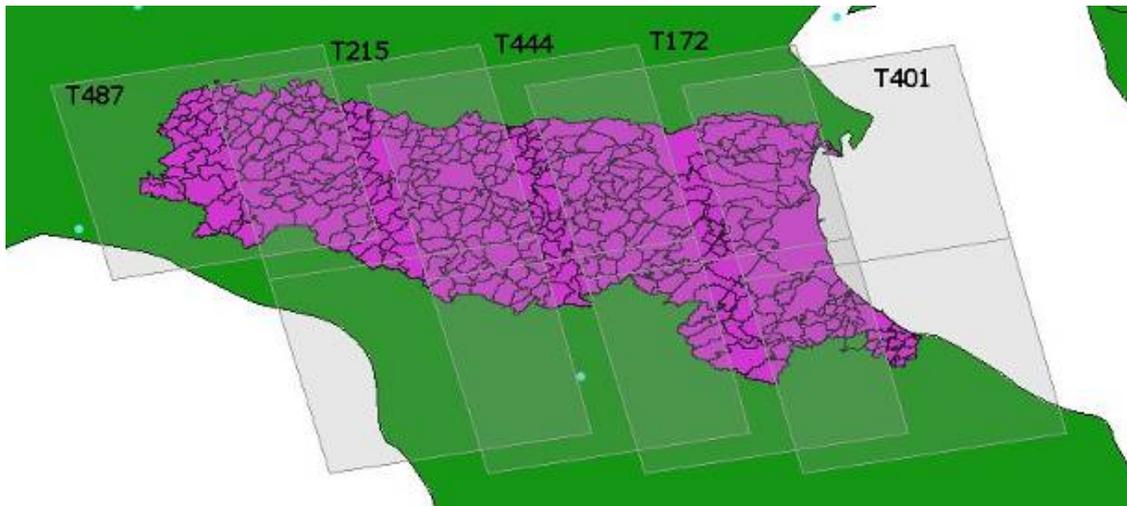
Ogni immagine ESA è identificata dalla data di acquisizione, dal numero di Track - corrispondente al numero d'orbita del satellite - e dal numero di Frame che identifica la porzione di area all'interno della singola Track. Le geometrie di acquisizione disponibili si distinguono in ascendente e discendente in funzione dei passaggi del sensore da sud verso nord o da nord verso sud.

Per un'analisi completa ed esaustiva dell'area si è deciso di analizzare per i satelliti ERS (arco temporale 1992-2000) solo il *dataset* discendente mentre per il satellite ENVISAT (arco temporale fine 2002-2006), a causa dell'esiguo numero di immagini disponibili in archivio, sia il *dataset* ascendente che quello discendente per un totale di 523 immagini SAR processate. La carenza d'immagini nel biennio 2000-02 ha reso impossibile la saldatura tra il primo e il secondo periodo.

In Fig. 2 e Fig. 3 vengono mostrate le coperture geografiche dei *dataset* ESA utilizzati.

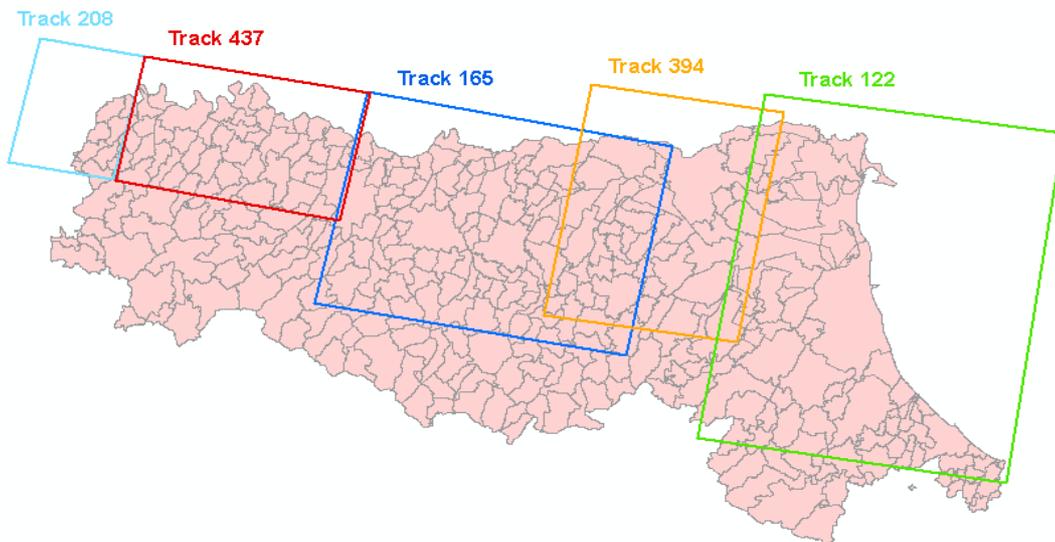


**Fig. 2** - Copertura geografica dei *dataset* ESA discendenti utilizzati e area di interesse.

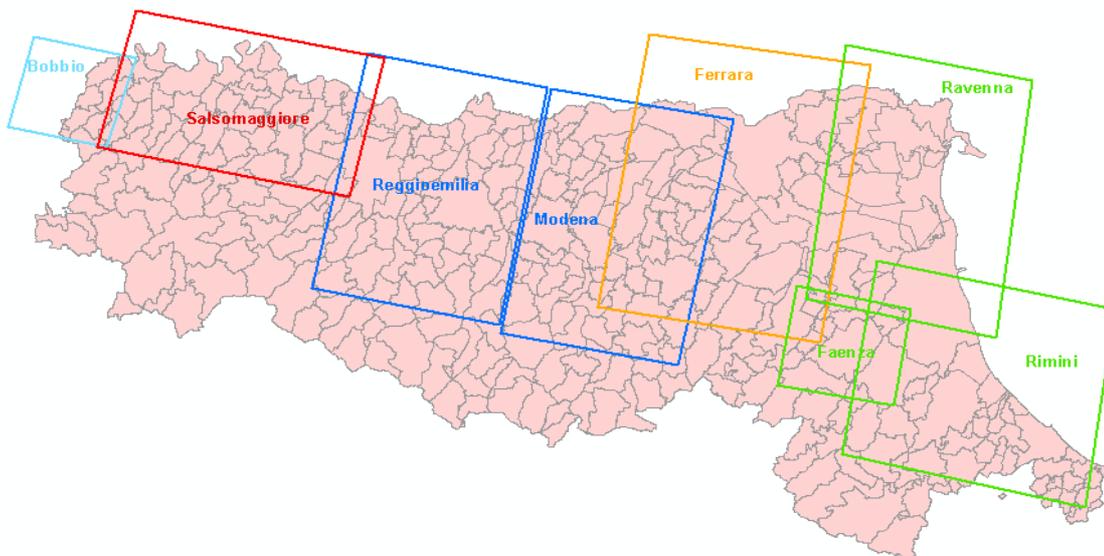


**Fig. 3** - Copertura geografica dei *dataset* ESA ascendenti utilizzati e area di interesse.

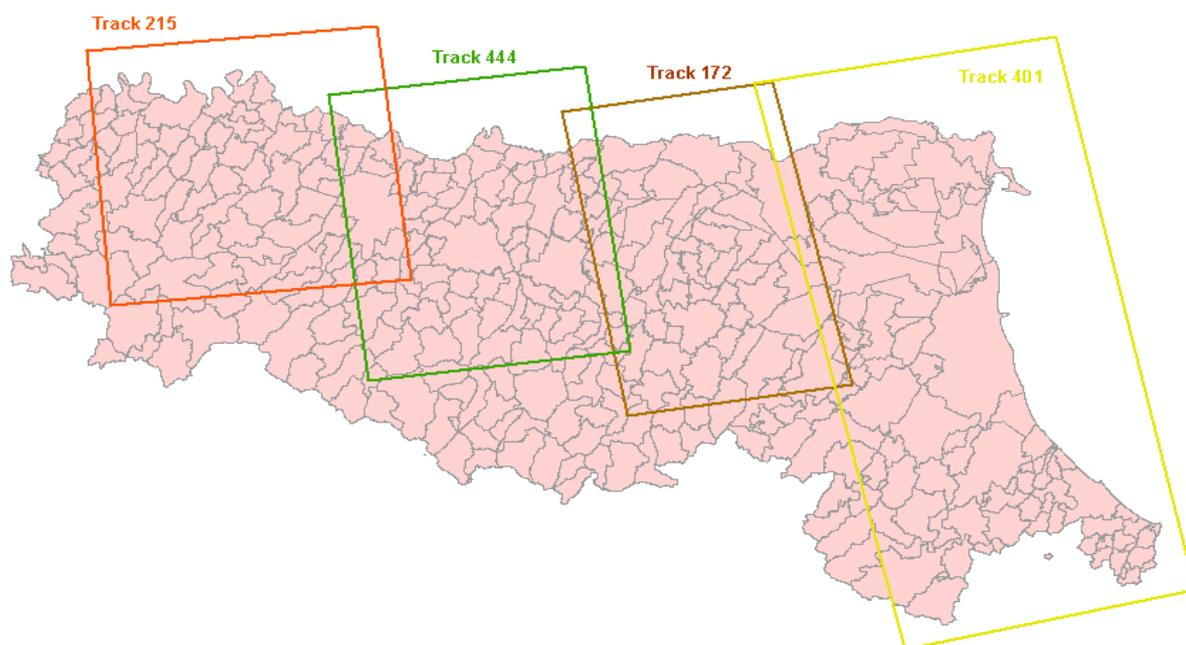
Per esigenze tecniche legate alla gestione del carico computazionale le Track selezionate sono state elaborate in più ritagli (di seguito indicati come “siti”) denominati con uno dei comuni presenti nell’area di interesse (vedi Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8 e Fig. 9).



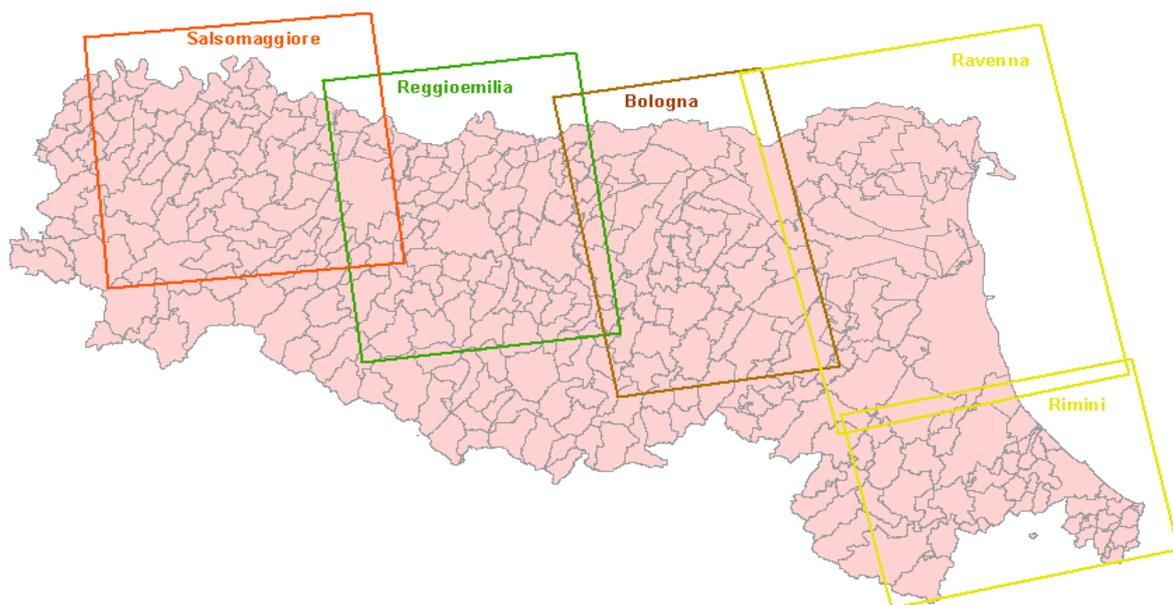
**Fig. 4** - Track ERS – Geometria Discendente.



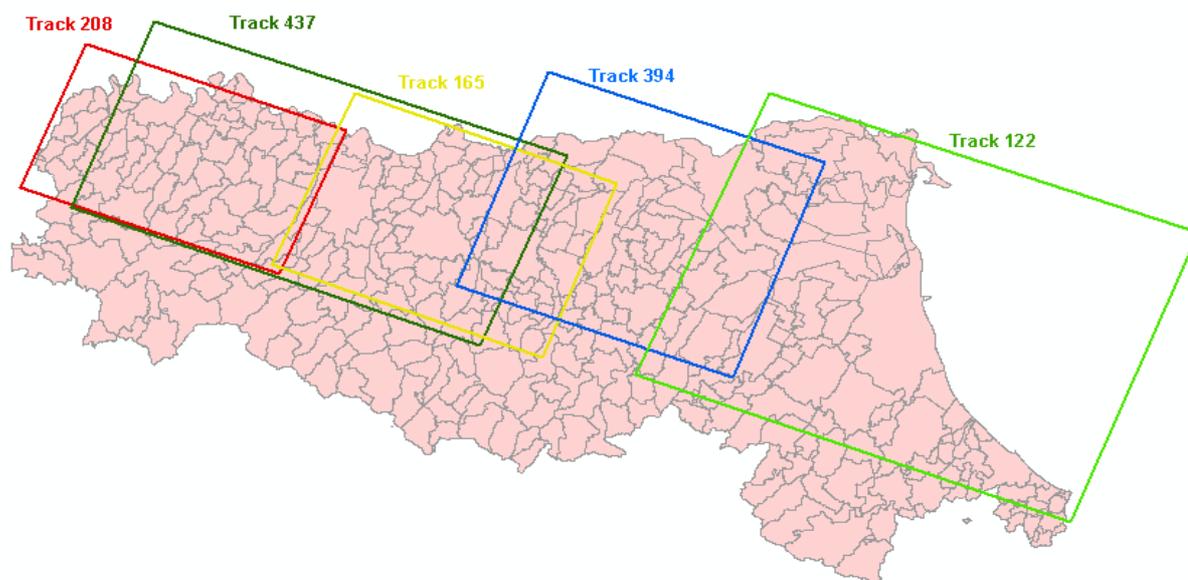
**Fig. 5** - Siti ERS – Geometria Discendente.



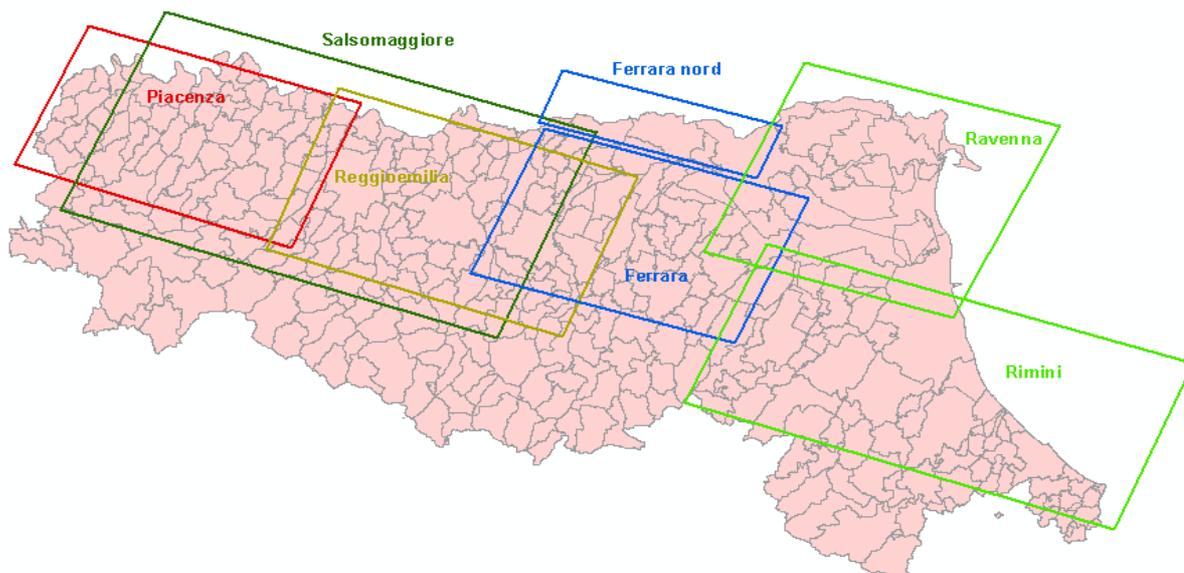
**Fig. 6** - Track ENVISAT – Geometria Ascendente.



**Fig. 7** - Siti ENVISAT – Geometria Ascendente.



**Fig. 8** - Track ENVISAT – Geometria Discendente.



**Fig. 9** - Siti ENVISAT – Geometria Discendente.

Nella Tab. 1 si riportano per ogni Track ERS i siti processati.

<b>Dataset Discendenti – ERS</b>	
<i>Track</i>	<i>Sito</i>
208	BOBBIO
437	SALSOMAGGIORE
165	REGGIO EMILIA MODENA
122	RIMINI
	RAVENNA
	FAENZA
394	FERRARA

**Tab. 1** - Dato ERS: Track elaborate e siti processati.

Nelle Tab. 2 e Tab. 3 si riportano per ogni Track ENVISAT i siti processati:

<b>Dataset Discendenti – ENVISAT</b>	
<i>Track</i>	<i>Sito</i>
208	PIACENZA

437	SALSOMAGGIORE
165	REGGIO EMILIA
122	RIMINI RAVENNA
394	FERRARA FERRARA NORD

**Tab. 2** - Dato ENVISAT discendente: Track elaborate e siti processati

<b>Dataset Ascendente – ENVISAT</b>	
<i>Track</i>	<i>Sito</i>
172	BOLOGNA
215	SALSOMAGGIORE
444	REGGIO EMILIA
401	RIMINI RAVENNA

**Tab. 3** - Dato ENVISAT discendente: Track elaborate e siti processati.

Va notato, inoltre, che in sede di verifica ed elaborazione dei risultati dell'analisi interferometrica, è emersa, in corrispondenza dell'area centrale della regione, una minore affidabilità del dato ENVISAT, dovuta in particolare all'esiguità di immagini disponibili per quel paraggio. Al fine, quindi, di irrobustire l'analisi relativa al periodo più recente si è proceduto all'acquisizione e processamento di immagini provenienti dall'archivio dell'Agenzia Spaziale Canadese relative al satellite RADARSAT 1. Tali dati, in particolare, essendo inizialmente non previsti e scaturendo la loro necessità, come si diceva, da esigenze emerse in sede di verifiche, verranno descritti successivamente (cfr. 4.2).

### **3.3.2 Selezione dell'immagine *master***

L'immagine *master* risulta essere di fondamentale importanza nell'analisi PS. La scelta di tale immagine è dettata principalmente dall'esigenza di minimizzare i cosiddetti fenomeni di decorrelazione temporale e geometrica. Si sceglie quindi come *master* l'immagine che minimizza la dispersione dei *baseline temporali* e *geometrici* delle altre immagini del *dataset*, definite *slaves*. È opportuno inoltre evitare di scegliere un'acquisizione relativa ad un giorno caratterizzato da intensi fenomeni di

precipitazione, poiché il disturbo atmosferico ad essa associato potrebbe compromettere la qualità degli interferogrammi differenziali generati.

Il processo di “focalizzazione” di tutte le immagini e il successivo “ricampionamento” delle *slaves* sulla griglia di riferimento della *master*, consentono di ottenere un *dataset* in cui a pixel omologhi di differenti immagini corrispondono omologhe celle di risoluzione al suolo, in modo tale che sia possibile procedere con confronti tra acquisizioni differenti.

Nella presente analisi per ogni Track elaborata è stata scelta un’immagine *master* che risulterà poi riferimento nei vari siti processati (cfr. Tab. 4)

<b>Dataset ERS – Discendenti</b>		
<i>Track</i>	<i>Master</i>	<i>Range Temporale</i>
208	14/01/1997	Giugno 1992 – Dicembre 2000
437	26/03/1998	Aprile 1992 – Gennaio 2001
165	11/01/1997	Maggio 1992 – Dicembre 2000
394	21/07/1997	Aprile 1992- Gennaio 2001
122	06/08/1997	Maggio 1992- Gennaio 2001
<b>Dataset ENVISAT – Discendente</b>		
<i>Track</i>	<i>Master</i>	<i>Range Temporale</i>
208	17/05/2005	Luglio 2002 – Gennaio 2006
437	09/12/2004	Dicembre 2002 – Febbraio 2006
165	29/01/2005	Gennaio 2003 – Gennaio 2006
394	06/12/2004	Febbraio 2003 – Gennaio 2006
122	02/03/2005	Aprile 2003 – Febbraio 2006
<b>Dataset ENVISAT – Ascendenti</b>		
<i>Track</i>	<i>Master</i>	<i>Range Temporale</i>
444	11/08/2005	Agosto 2004 – Marzo 2006
401	05/04/2004	Giugno 2003 – Marzo 2006
215	28/12/2004	Ottobre 2002 – Febbraio 2006
172	18/06/2005	Ottobre 2002 – Febbraio 2006

**Tab. 4** - Immagine *master* e arco temporale delle track utilizzate nel *processing*.

### 3.3.3 L’area d’interesse

Come specificato negli *Approfondimenti Tecnici* in Appendice, ogni pixel che compone un’immagine SAR contiene l’informazione di **ampiezza** - funzione della quantità di segnale retro-diffuso dal bersaglio a terra e ricevuto dal sensore - e l’informazione di

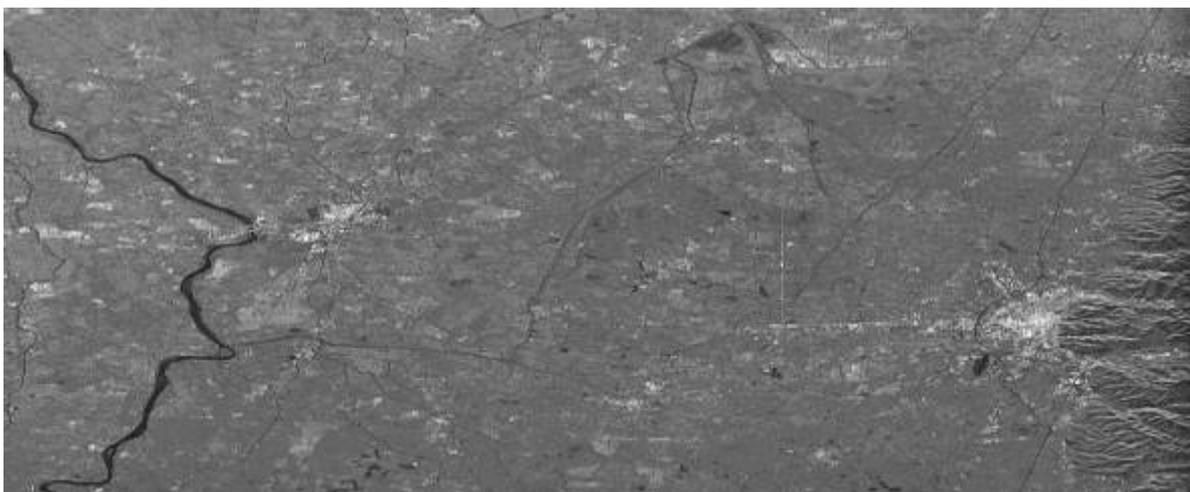
**fase** - funzione della distanza tra sensore e bersaglio a terra (lunghezza del cammino ottico compiuto dall'onda elettromagnetica).

Ad ogni pixel corrisponde una cella di risoluzione a terra che nel caso dei satelliti ERS ed ENVISAT misura circa 20 metri nella direzione Est-Ovest e circa 4 metri in quella Nord-Sud.

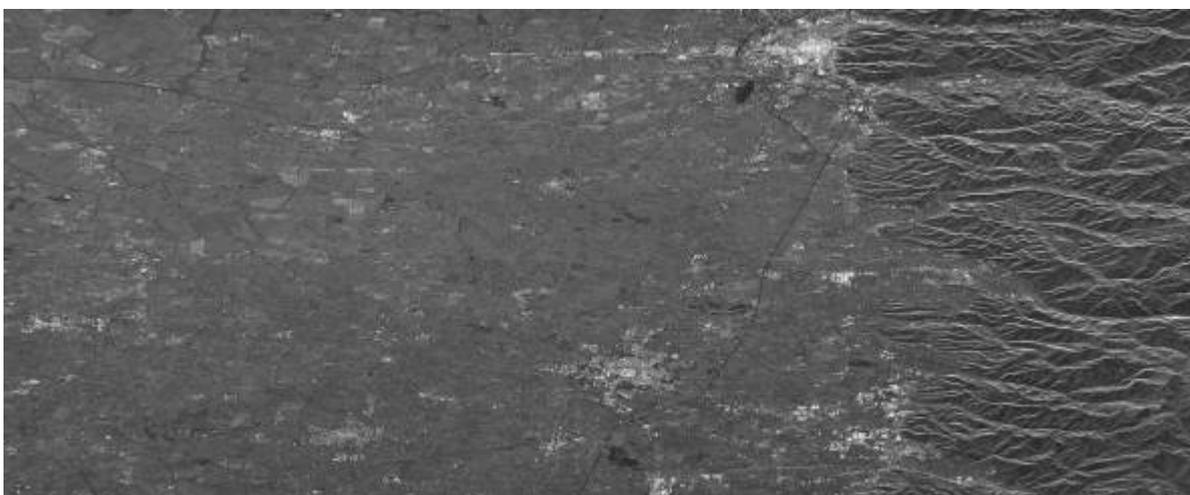
Nelle figure seguenti si riportano, a titolo di esempio, le immagini satellitari di ampiezza (medie incoerenti) di siti elaborati: si noti che le immagini non sono state georeferenziate, ovvero l'asse orizzontale corrisponde alla direzione detta di azimuth (parallela all'orbita del sensore) mentre quello verticale corrisponde alla coordinata detta di range (approssimativamente direzione Est-Ovest).

Nell'immagine radar le superfici relativamente lisce rispetto alla lunghezza d'onda del sensore (per i satelliti ERS ed ENVISAT circa 5,6 cm) come strade, laghi, fiumi, appaiono scure perché si comportano come specchi non orientati verso l'antenna ricevente, e che quindi minimizzano la porzione del segnale illuminante retro-diffusa verso il satellite.

Le strutture metalliche, i manufatti e le rocce esposte che hanno un profilo irregolare possono invece restituire al sensore una porzione significativa dell'energia incidente e quindi dare luogo a pixel molto luminosi.



**Fig. 10** - Mappa di Riflettività multi immagine del sito di **Ferrara** per il dataset ERS **Discendente**. Il nord è a sinistra della scena.



**Fig. 11** - Mappa di Riflettività multi immagine del sito di **Modena** per il dataset ERS **Discendente**. Il nord è a sinistra della scena.



**Fig. 12** - Mappa di Riflettività multi immagine del sito di **Ravenna** per il dataset ERS **Discendente**. Il nord è a sinistra della scena.

### 3.3.4 Analisi interferometrica

La fase di una singola immagine SAR contiene informazioni relative a:

- riflettività del bersaglio
- disturbo atmosferico
- rumore di fondo del sistema
- distanza tra sensore e bersaglio (movimento del bersaglio e topografia locale)

Proprio quest'ultimo è il termine che ci si prefigge di isolare e stimare.

Sfruttando il fatto che è possibile disporre di immagini SAR acquisite sulla stessa area in istanti di tempo diversi, è possibile confrontare acquisizioni successive al fine di studiare l'evoluzione del termine di fase.

La generazione degli interferogrammi differenziali costituisce il primo passo dell'elaborazione e consiste nel confronto tra la fase dell'immagine *master* e la fase di tutte le immagini *slaves*, ottenendo così N-1 differenziali da N immagini del *dataset*.

L'informazione che si ottiene dagli interferogrammi differenziali racchiude ora diverse componenti: il movimento del bersaglio, la topografia locale e il contributo dell'atmosfera. L'obiettivo dell'analisi PSInSAR è individuare quei punti, detti Permanent Scatterers, che mantengono la propria "firma elettromagnetica" costante nel tempo e quindi indipendente dal momento dell'acquisizione (*baseline* temporale) e dalla posizione del sensore (*baseline* geometrico). Sfruttando questi "capisaldi" è possibile stimare e separare i vari contributi della fase interferometrica sfruttandone i diversi comportamenti nella dimensione temporale (*inter* interferogramma) e spaziale (*intra* interferogramma). Per maggiori dettagli si rimanda agli *Approfondimenti Tecnici* in Appendice.

### 3.3.5 La tecnica dei diffusori permanenti

Il cuore dell'algoritmo della tecnica PSInSAR consiste nella stima del contributo atmosferico presente su ogni acquisizione, per procedere alla sua compensazione e quindi alla determinazione del moto dei Permanent Scatterers.

Il parametro che descrive la qualità delle misure di spostamento effettuate è la "coerenza" (cfr. par. 3.4.2), indice normalizzato tra 0 e 1 legato alla deviazione standard del rumore di fase del PS. La coerenza è funzione del numero di immagini elaborate e della distribuzione dei *baseline* temporali e spaziali.

Un punto è considerato attendibile se il valore di coerenza associato è tale da garantire una probabilità di falso allarme inferiore a  $10^{-5}$  per le analisi di tipo *Standard* e  $10^{-4}$  per

le analisi di tipo *Advanced*. Per falso allarme si intende la possibilità che una sequenza di rumore venga interpretata come movimento.

Per ogni PS è possibile stimare la velocità media di spostamento nell'intervallo di tempo analizzato e la corrispondente serie storica. La serie storica di deformazione rappresenta, acquisizione per acquisizione, l'evoluzione della distanza sensore-bersaglio (nella direzione di LOS – *line of sight*) del punto in esame.

Al termine dell'elaborazione, l'operazione di geocodifica consente di associare ad ogni PS le corrispondenti coordinate geografiche (latitudine/longitudine), così da consentirne l'utilizzo in ambiente GIS.

### **3.4 RISULTATI DELL'ANALISI**

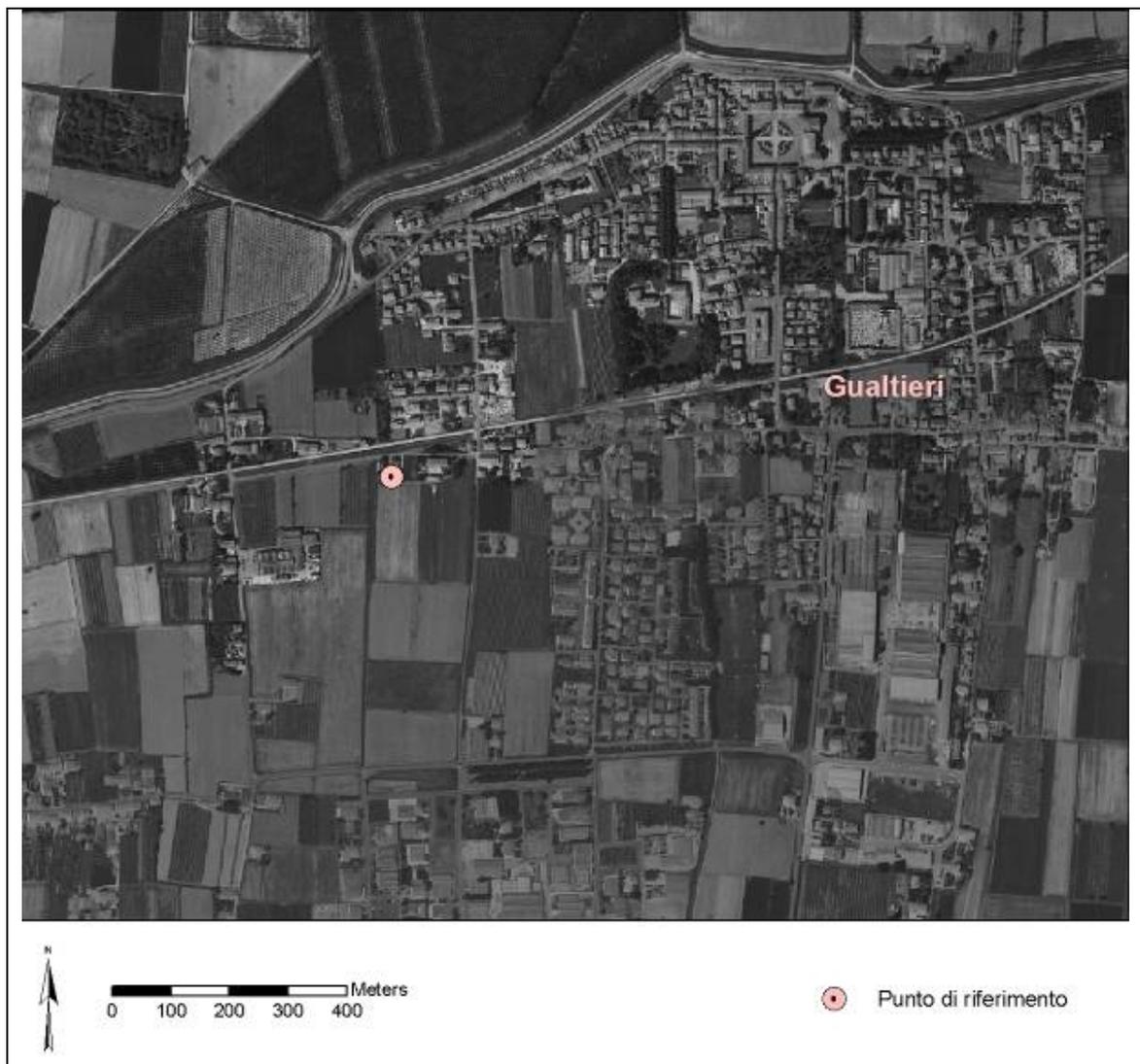
Sull'area di interesse sono stati individuati 295.887 PS per ciascuno dei quali è stata calcolata la velocità media annua di deformazione e, per quelli ad alto rapporto segnale/rumore, è presente anche la serie storica di deformazione (solo per i *dataset* ERS ed ENVISAT), utile per analizzare il tipo di movimento che il punto ha subito nel periodo di acquisizione del *dataset*. La densità dei PS risulta variabile in funzione della copertura vegetativa e del grado di urbanizzazione dell'area in esame.

#### **3.4.1 Punto di Riferimento**

Nell'analisi PS la scelta del punto di riferimento, ovvero di quel bersaglio supposto privo di moto rispetto a cui sono effettuate tutte le misure di spostamento degli altri Permanent Scatterers, avviene durante la fase di *processing*. In tale fase viene scelto un punto di riferimento per ogni sito elaborato.

Nel presente lavoro è stato selezionato in fase di *post processing* un solo punto di riferimento, relativo a un singolo sito, rispetto al quale sono stati riferiti tutti gli altri siti.

A titolo di esempio nella Fig. 13 viene mostrato il punto di riferimento scelto per l'elaborazione ERS e relativo al sito di Reggio Emilia (track 165). Il punto è localizzato nel comune di Gualtieri provincia di Reggio Emilia.



**Fig. 13** - Posizione del punto di riferimento supposto stabile per l'elaborazione ERS discendente.

### **3.4.2 I parametri di qualità: Coerenza e Deviazione Standard**

La tecnica PSInSAR, nel caso di analisi di tipo *standard*, prevede l'utilizzo di un modello lineare per descrivere gli spostamenti dei bersagli individuati nell'analisi (PS); questo significa che è possibile individuare solo quei punti che mostrano tassi di spostamento sufficientemente stabili nel tempo. Sotto questa ipotesi viene calcolato un indice di quanto il modello utilizzato si adatti alla natura di ciascun PS. Tale valore prende il nome di **coerenza** e permette di stabilire quanto i punti di misura siano affidabili rispetto al modello considerato.

La coerenza assume valori compresi tra 0 ed 1, dove 0 indica punti che non hanno nessuna attinenza con il modello lineare e quindi inaffidabili nel caso di analisi standard, mentre valori pari a 1 indicano un ottimo accordo con il modello utilizzato. Esistono

però anche casi in cui bassi valori di coerenza non sono necessariamente dovuti ad una elevata rumorosità del dato, bensì al fatto che il tipo di moto analizzato non viene ben approssimato dal modello lineare. Un caso in cui si verifica questo fenomeno si ha quando si è in presenza di moti con forti componenti stagionali. Infatti, anche in presenza di dati poco rumorosi, le componenti sinusoidali vengono interpretate dal modello come rumore facendo ridurre fortemente il valore della coerenza.

Il valore di coerenza minima accettabile è stabilito, tramite una simulazione con metodo Montecarlo, in modo che la probabilità di errore sia inferiore a  $10^{-5}$ . In altre parole, si impone che, statisticamente, il valore di velocità di un solo PS su centomila venga considerato attendibile corrispondendo in realtà a un dato casuale e quindi inaffidabile. Tale valore, utilizzato come soglia di selezione dei Permanent Scatterers, risulta essere inversamente proporzionale al numero di immagini utilizzate nell'elaborazione. Pertanto l'utilizzo di *dataset* con numerose immagini permette di ottenere un maggior numero di PS in quanto risulta più robusta l'eliminazione degli *outliers* statistici anche per bassi valori di coerenza.

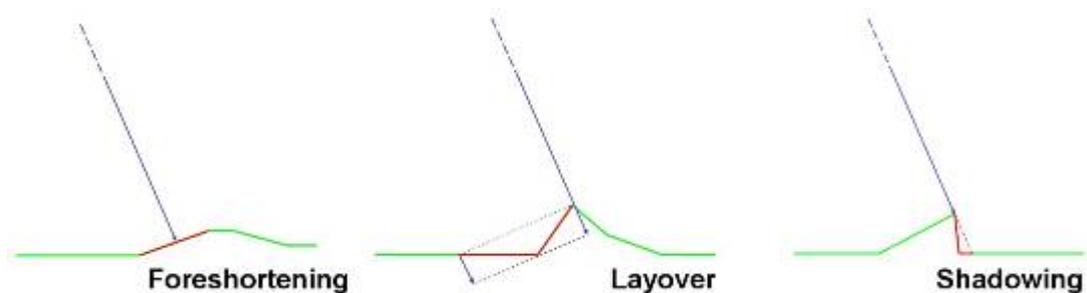
Essendo la velocità di ogni PS relativa ad un punto preso come riferimento, è fondamentale considerare anche come si propagano le incertezze di misura man mano che ci si allontana da esso. Per tenere in considerazione questo effetto viene fornito per ciascun PS un valore denominato **deviazione standard** che indica di quanto vibra la stima della differenza di velocità del punto in analisi rispetto al riferimento. Tale deviazione standard è dunque relativa a una coppia di punti (il PS considerato e il punto di riferimento).

### 3.4.3 Assenza di PS: principali motivazioni

Nel presente paragrafo vengono trattati in modo sintetico le principali ragioni per le quali alcune aree o singole strutture non sono coperte da alcun PS.

- Aree vegetate: l'analisi PSInSAR ha la capacità di monitorare elementi che mantengano le medesime caratteristiche elettromagnetiche nel tempo. Tale requisito è solitamente valido per strutture edili, rocce esposte o pietraie ma non per aree vegetate o innevate che risultano soggette a forti cambiamenti anche in brevi lassi di tempo.
- Deformazioni prospettiche: alcune aree tipicamente collocate sui versanti dei rilievi risultano non visibili dai sistemi radar SAR per la particolare modalità di acquisizione delle immagini. Per limitare questo tipo di problemi è necessario

scegliere attentamente la geometria di acquisizione in funzione delle aree di interesse che si intendono monitorare e dei dati a disposizione. In Fig. 14 sono riportati graficamente tre casi in cui la topografia e la geometria di acquisizione non consentono di individuare PS; in rosso sono evidenziate le zone non monitorabili. Il fenomeno di *foreshortening* si ha in corrispondenza di pendii che risultano circa perpendicolari alla LOS del satellite, quello di *layover* quando si è in presenza di pendii con pendenze elevate ( $>30^\circ$ ); in questo caso non solo il versante ma anche parte della pianura vengono compromessi, ed infine il fenomeno di *shadowing* per cui interi versanti e parti di pianura non vengono illuminate dal radar a causa della presenza di dirupi o versanti particolarmente scoscesi.



**Fig. 14** - Esempi di fenomeni di *foreshortening*, *layover* e *shadowing*.

- PS temporanei: in questa categoria rientrano tutti i bersagli che per diversi motivi non risultano PS lungo tutto l'arco temporale dell'analisi. Tra i casi più comuni si possono citare le strutture costruite, demolite o ristrutturate durante il periodo dell'analisi che quindi si comportano come PS solo in un sottoinsieme delle immagini acquisite oppure aree soggette a fenomeni stagionali come le nevicate che deteriorano il segnale durante il periodo invernale. In tutti questi casi si rende necessaria un'analisi approfondita che recuperi i periodi temporali di affidabilità per ciascun PS.
- Moti veloci: bersagli con velocità tali da subire spostamenti superiori a un quarto di lunghezza d'onda ( $\sim 1.4$  cm in banda C) tra due acquisizioni successive non vengono individuati come PS oppure risultano fortemente compromessi da problemi di *phase unwrapping*. È inoltre importante ricordare che qualsiasi sia il

moto del bersaglio questo non deve essere mai tale da cambiare le caratteristiche radar dell'oggetto monitorato.

- Moti fortemente non lineari: nel caso di analisi *standard*, in presenza di spostamenti che non seguono il modello lineare, si hanno forti perdite di coerenza che possono portare alla perdita del PS.

## **4. VERIFICA ED ELABORAZIONE DEI RISULTATI DELL'ANALISI INTERFEROMETRICA**

### **4.1 PREMESSA**

Nel presente capitolo si riportano le fasi di analisi e valutazione critica dei risultati prodotti dall'elaborazione radar, considerata in sé e soprattutto in rapporto ai risultati ottenuti con la tecnica classica della livellazione geometrica. Va sottolineato che si è trattato di un lavoro particolarmente ampio e oneroso sia perchè l'attività realizzata costituisce un caso di studio quasi unico per l'approccio innovativo scelto - l'adozione della tecnica PSInSAR su un'area così vasta - sia per la disponibilità, anch'essa non frequente, di un importante archivio di dati relativo alle misure di livellazione.

Le metodologie di analisi dei dati interferometrici non sono ancora consolidate e riprova di ciò è anche la scarsa letteratura scientifica inerente tale argomento, che è stata comunque reperita, organizzata e consultata. Su tale questione sono due gli aspetti principali che saranno approfonditi successivamente:

1. una valutazione di qualità intrinseca del dato ottenuto dall'interferometria, con riferimento anche alla tipologia dei bersagli a terra e alla loro distribuzione spaziale;
2. il confronto tra le velocità di abbassamento che le due diverse tecniche producono sugli stessi punti.

Infine si descriverà la fase di creazione delle carte di abbassamento realizzate mediante curve isocinetiche.

### **4.2 IL MATERIALE DISPONIBILE**

Nei paragrafi 4.2.1, 4.2.2 e 4.2.3 si riporta una sintesi delle caratteristiche dei tre *dataset* utilizzati. E' necessario tuttavia ricordare preliminarmente alcune caratteristiche generali del dato e del processamento a cui è stato sottoposto.

La velocità di movimento massima rilevabile da una analisi interferometrica è, nella pratica, dell'ordine di 60 mm/anno per i sensori ERS ed ENVISAT e 150 mm/anno per RADARSAT (cfr. il paragrafo "Limiti" in Appendice); il sistema non è in grado di rilevare velocità superiori, peraltro non probabili nel territorio in esame.

Lo spostamento che viene calcolato dall'analisi interferometrica è lungo la LOS (linea di vista) che congiunge il satellite ed il bersaglio a terra; se si ipotizza che tale spostamento sia attribuibile solamente ad un abbassamento o innalzamento del bersaglio, trascurando quindi la componente orizzontale, occorre proiettare questo valore lungo la verticale. Questa operazione è stata compiuta da T.R.E. solo per il *dataset* RADARSAT; per gli altri due *dataset*, ERS ed ENVISAT, tale operazione è stata effettuata durante il presente lavoro di verifica. Si è comunque effettuato un apposito test per dare significatività alla scelta di ipotizzare per il movimento la sola componente verticale.

Come si è visto (cfr. 3.3.1), dopo la selezione delle tracks di interesse per l'area di studio, non è stato realizzato un unico insieme di dati ma, in considerazione dell'onere computazionale particolarmente elevato, il territorio è stato suddiviso in più sottoaree (siti), ciascuna delle quali ha subito un processamento autonomo, con un proprio punto di riferimento. Tale approccio può avere delle evidenti ripercussioni sulla congruenza dei risultati ottenuti, nel caso, come quello in esame, di un'analisi complessiva a scala regionale.

Mentre è stato possibile acquisire un numero consistente di immagini ERS - relative al periodo 1992-2000 - (in media una settantina), si è rivelato invece decisamente inferiore al previsto il numero di immagini ENVISAT disponibili - periodo 2002-2006 - e ciò ha determinato, per questo secondo tipo di dati, risultati di qualità inferiore rispetto all'attesa. Questo fatto, già evidenziato dai parametri statistici dell'elaborazione, è stato confermato dai confronti effettuati con i dati di livellazione (1999-2005) - come si dirà più avanti. Quindi, al fine di acquisire una migliore base informativa per il periodo più recente (2002-2006), T.R.E. ha messo a disposizione un ulteriore *dataset*, non previsto originariamente (dati RADARSAT), relativo principalmente all'area bolognese, sulla quale erano emerse le maggiori incongruenze con la livellazione, imputabili, secondo la stessa T.R.E. al trattamento effettuato sull'esiguo *dataset* ENVISAT per tale area.

#### **4.2.1 I dati ERS**

Satelliti ESA ERS1 e ERS2

Tipo di processamento: Standard PS Analysis - Low Resolution;

Dato SAR: discendente;

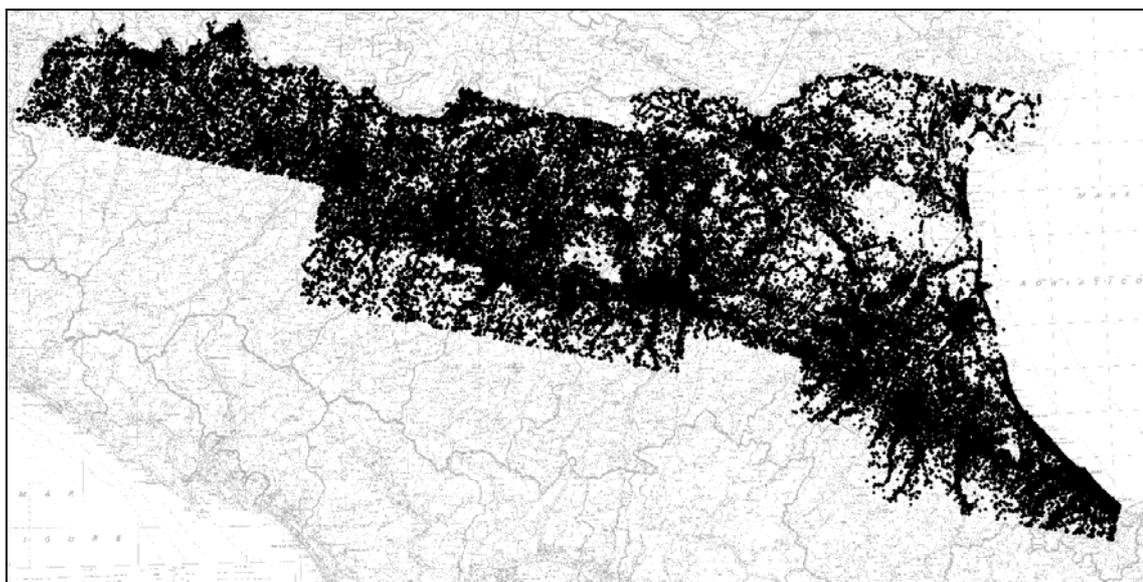
Periodo medio: maggio 1992 - dicembre 2000;

Coordinate del punto di riferimento (REF), UTM-ED50 (32):

Nord 4973309,93; Est 628128,95.

Numero totale PS: 157822;

Numero serie storiche: 89282.



**Fig. 15** - Schema complessivo della copertura dei PS ERS

#### **4.2.2 I dati ENVISAT**

Satellite ESA ENVISAT

Tipo di processamento: Standard PS Analysis – Low Resolution;

Dato SAR: ascendente e discendente;

Periodo: luglio 2002 – marzo 2006;

Coordinate del punto di riferimento (REF) UTM-ED50 (32):

- dato ascendente: Nord 4965949,93; Est 634852,49;
- dato discendente Nord 4973293,16; Est 622585,64.

Consistenza dei dati (numero di PS):

**secondo l'aggregazione per tracks:**

*geometria ascendente:*

<b>track</b>	<b>PS</b>
172	39669

215	3236
401(873)	19600
401(891)	13182
444	12328

*geometria discendente:*

122	34817
165	3483
208	5172
394	3382
437	3196

**Totale 138064 PS**

**secondo l'aggregazione per siti:**

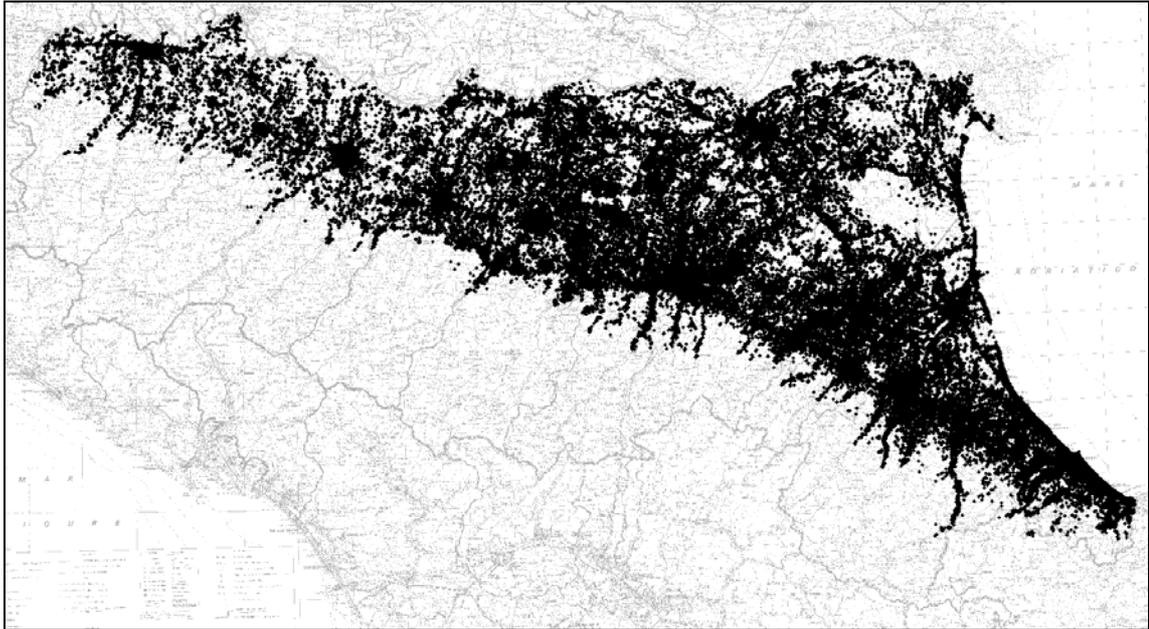
*geometria ascendente:*

<b>Siti</b>	<b>PS</b>
Bologna	39669
Ravenna	19600
Reggi Emilia	12328
Rimini	13182
Salsomaggiore	3236

*geometria discendente:*

Ferrara	2941
Ferrara Nord	441
Piacenza	5172
Ravenna	11769
Reggio Emilia	3483
Rimini	23047
Salsomaggiore	3196

**Totale 138064 PS**



**Fig. 16** - Schema complessivo della copertura dei PS ENVISAT (discendente + ascendente).

### **2.3 I dati RADARSAT**

Satellite RADARSAT 1 (Agenzia Spaziale Canadese);

Tipo di processamento: Standard PS Analysis – Low Resolution;

Dato SAR: ascendente

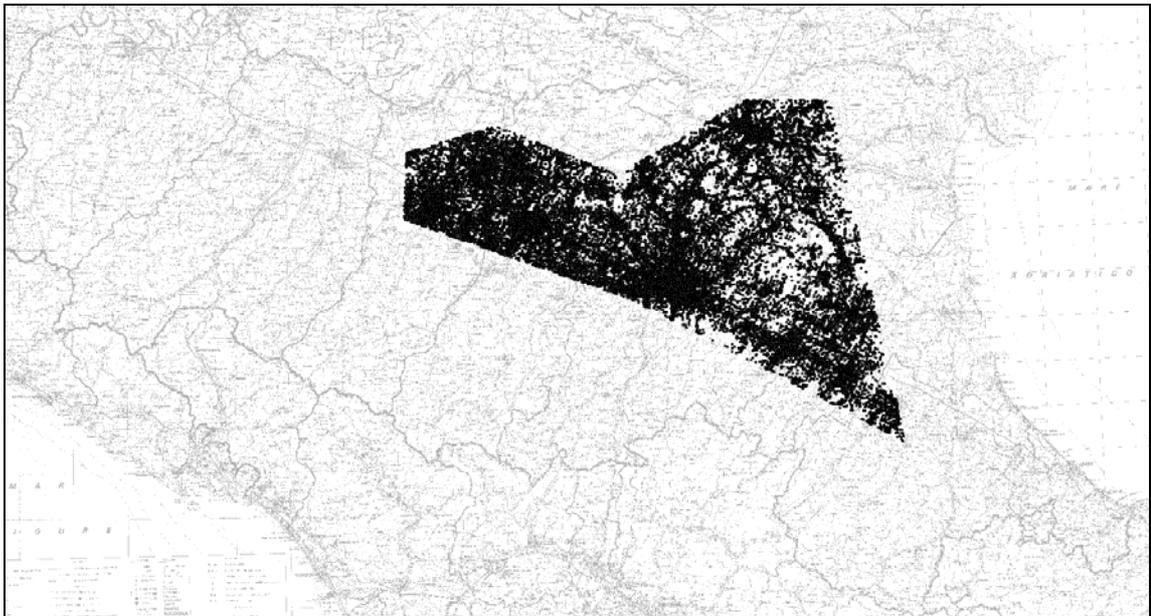
Periodo: aprile 2003 - novembre 2005;

Coordinate del punto di riferimento (REF), UTM-ED50 (32):

Nord 4948947,76; Est 675927,90.

Numero totale PS: 72.216.

Il dato è stato fornito riproiettato sulla verticale, con correzione moltiplicativa 1.2.



**Fig. 17** - Schema complessivo della copertura dei PS RADARSAT.

#### **4.2.3 I punti di riferimento nell'analisi interferometrica**

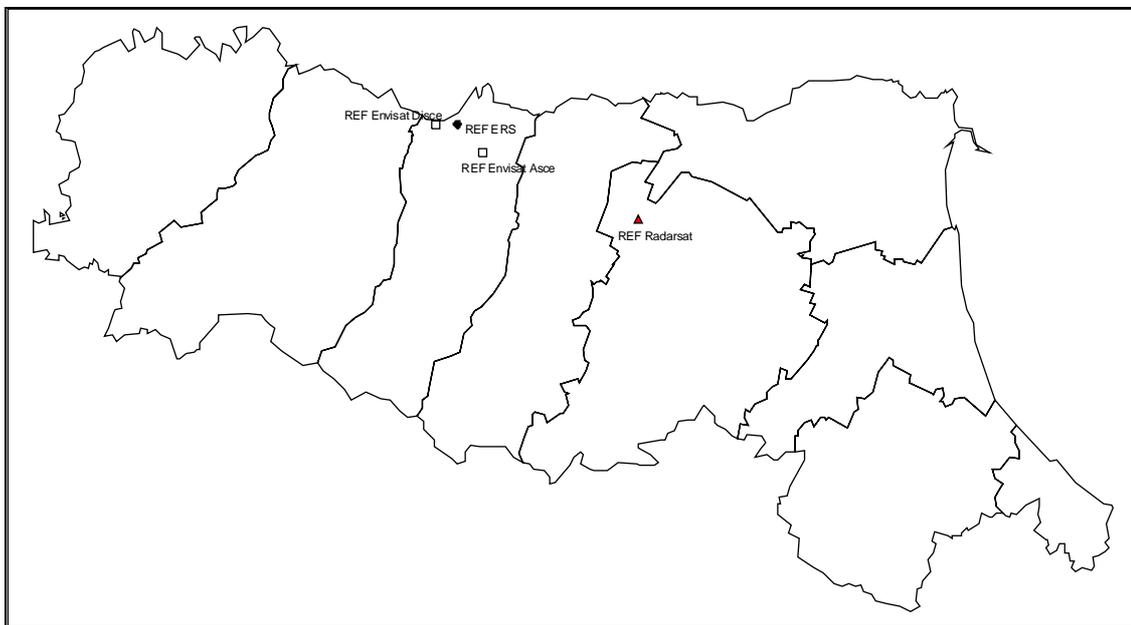
Un tema di non semplice trattazione in un'applicazione di questo tipo è quello del riferimento da assumersi per le quote e per le velocità di abbassamento, tema che in ogni caso è estremamente delicato perché presuppone delle assunzioni a priori che dovrebbero essere corroborate da dati esterni non sempre disponibili.

Per la campagna di livellazione geometrica del 2005 si adottò un unico caposaldo di riferimento, con considerazioni sulla stabilità presunta di tale punto derivanti anche da dati esterni di geodesia spaziale. Come già si sottolineò, la soluzione adottata di conservare il caposaldo origine in Sasso Marconi con la stessa quota della campagna 1999 è parsa al momento la più corretta e conveniente, anche se in linea di principio eventuali nuove informazioni e ricerche potrebbero condurre a un diverso approccio.

Il problema è sostanzialmente diverso per il dato radar, che viene elaborato in prima istanza, fissando, come riferimento, un punto scelto sulla base di sole considerazioni statistiche sulla coerenza del segnale nelle serie temporali di immagini disponibili sulla zona. Ciò che si misura è il moto relativo dei PS rispetto a tale punto. Come si è detto, l'elaborazione è stata condotta per sottoaree (siti) che aggregano immagini appartenenti a track attigue, e per ciascuna è stato adottato un PS di riferimento (REF); successivamente le sottoaree sono state riportate ad un unico *dataset* con un unico punto di riferimento, sommando o sottraendo al risultato di ciascun sito un valore costante di velocità in modo da mantenere la consistenza nelle zone di sovrapposizione.

Questo è stato ovviamente effettuato in modo separato sulle quattro tipologie di dati elaborati: ERS discendente, ENVISAT discendente, ENVISAT ascendente, RADARSAT ascendente.

Nella figura seguente si riporta la posizione dei corrispondenti quattro punti REF.



**Fig. 18** - Punti di riferimento (REF) unici adottati nella elaborazione delle diverse tipologie di dati SAR.

Per quanto riguarda il punto di riferimento unico adottato per i dati ERS discendenti, si è voluto approfondire il problema nelle seguenti direzioni:

- si è chiesto a T.R.E. di produrre una rielaborazione assumendo come riferimento un punto prossimo al caposaldo origine della livellazione, anche se tale caposaldo presentava una minore stabilità nella serie storica. Il risultato è sostanzialmente consistito, come ovvio, in uno *shift* dei valori di movimento dell'intera rete, che ha portato però a variazioni nelle velocità contenute entro l'ordine di errore complessivo valutato per questi dati;
- si è eseguito un sopralluogo sul punto per verificare la tipologia del bersaglio e le caratteristiche della struttura con cui è stato identificato;
- sono state fatte verifiche, anche in collaborazione con il Servizio Regionale Geologico, Sismico e dei Suoli, sulla stabilità dell'area sulla base di considerazioni geologico-strutturali.

Infine, si è deciso di adottare il risultato della prima elaborazione, con REF nell'area reggiana. D'altra parte non sono disponibili per lo stesso periodo dati topografici che siano con certezza omogenei e confrontabili su tutta l'area di indagine; va osservato infatti che per l'arco temporale coperto dai dati ERS si dispone del risultato della prima campagna di livellazione regionale (1999) come dato finale ma, come dato iniziale, esistono nelle varie aree della regione dati storici molto disomogenei tra loro come periodo di misurazione, come riferimento assoluto o come metodologia di rilievo. Nella produzione della prima carta di subsidenza regionale, a seguito della campagna 1999, si erano a questo proposito messe in luce le possibili problematiche e insufficienze che quel confronto, alla luce dei pochi dati disponibili, poteva presentare.

Per quanto riguarda invece ENVISAT e RADARSAT (periodo più recente), avendo a disposizione i dati di livellazione omogenei tra loro (perché derivati dalle due campagne regionali 1999 e 2005) e per buona parte contemporanei ai dati radar, è stato possibile verificare, su più punti opportunamente distribuiti, l'accordo dei risultati radar con le misure topografiche. In media l'accordo è stato buono, portando a non correggere i risultati ENVISAT e ad apportare una leggera correzione, inferiore al millimetro/anno, a quelli ottenuti da RADARSAT (si ricorda che su questi ultimi, T.R.E. aveva già effettuato un primo collegamento alla livellazione sulla base della velocità di abbassamento di un caposaldo di livellazione sito nell'intorno del punto REF).

#### **4.3 ANALISI DEI RISULTATI, PROBLEMATICHE E CONFRONTI CON GLI ESITI DELLE CAMPAGNE DI LIVELLAZIONE GEOMETRICA**

L'elaborazione del dato di interferometria radar presenta per sua natura alcune problematiche intrinseche, mentre altre vanno attribuite alla specifica applicazione e, segnatamente, all'ampiezza dell'area in esame. Nell'analisi dei risultati è quindi emerso un notevole numero di questioni, in parte riportate nella presente relazione, che trovano conferma anche nella letteratura scientifica e che hanno richiesto opportuni test e verifiche, utilizzando anche software appositamente scritto in ambiente database e/o in ambiente GIS. Nel paragrafo successivo si riportano alcune delle problematiche emerse e, in forma sintetica, anche le soluzioni adottate - una trattazione più analitica delle stesse esulerebbe dalle finalità specifiche del presente lavoro. Si sottolinea, inoltre, che il carattere innovativo dell'analisi radar, in particolare applicata ad aree di così vasta estensione, evidenzia l'urgenza di sviluppare metodologie e protocolli condivisi per la

validazione dei risultati - al pari di ciò che è stato già fatto per altri metodi di rilievo più tradizionali - e lo studio qui svolto si ritiene possa essere anche un primo contributo in tal senso.

#### 4.3.1 Problematiche legate al dato interferometrico

Per talune zone, peraltro molto limitate in rapporto all'intera area di studio, è emersa una certa carenza di PS per quanto riguarda i dati ERS (1992-2000). Tale carenza, oltre ai motivi già indicati in precedenza (cfr. 3.4.3), è spiegabile considerando che l'analisi PSInSAR su ERS è stata effettuata secondo un metodo definito di tipo *standard – low resolution* e non *advanced*. Questa scelta, tipicamente indicata per analisi di aree molto vaste, implica la non attribuzione di una velocità di movimento a quei bersagli che evidenziano un trend di tipo stagionale o non lineare nel tempo (vedi Fig. 19 e Fig. 20) per i quali, quindi, il parametro di coerenza presenta valori bassi. Un'analisi di maggior dettaglio è sempre possibile in un secondo momento, qualora si ravvisasse la necessità di un approfondimento d'indagine mirato a scala locale.

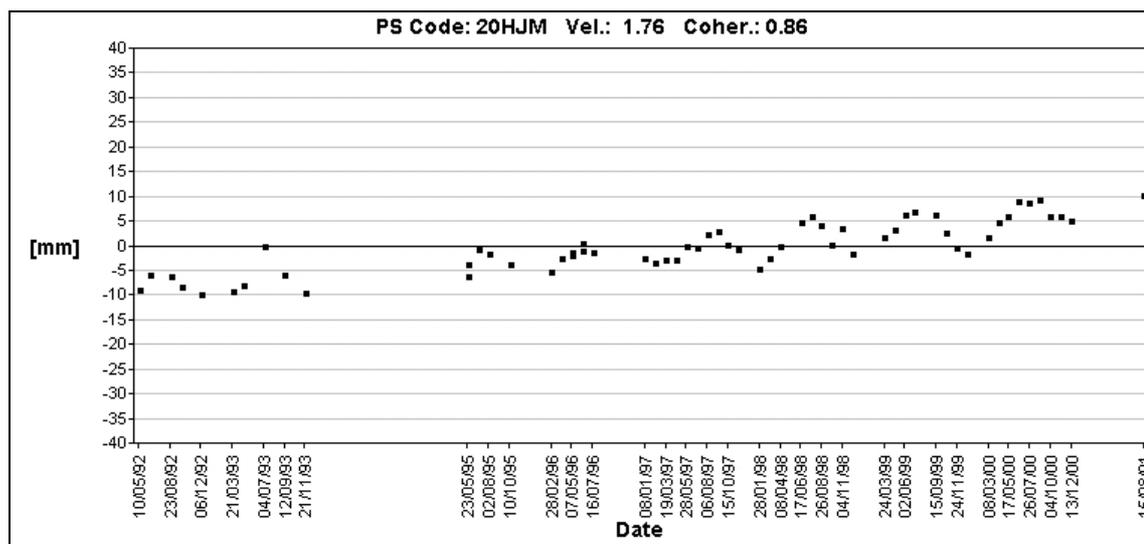
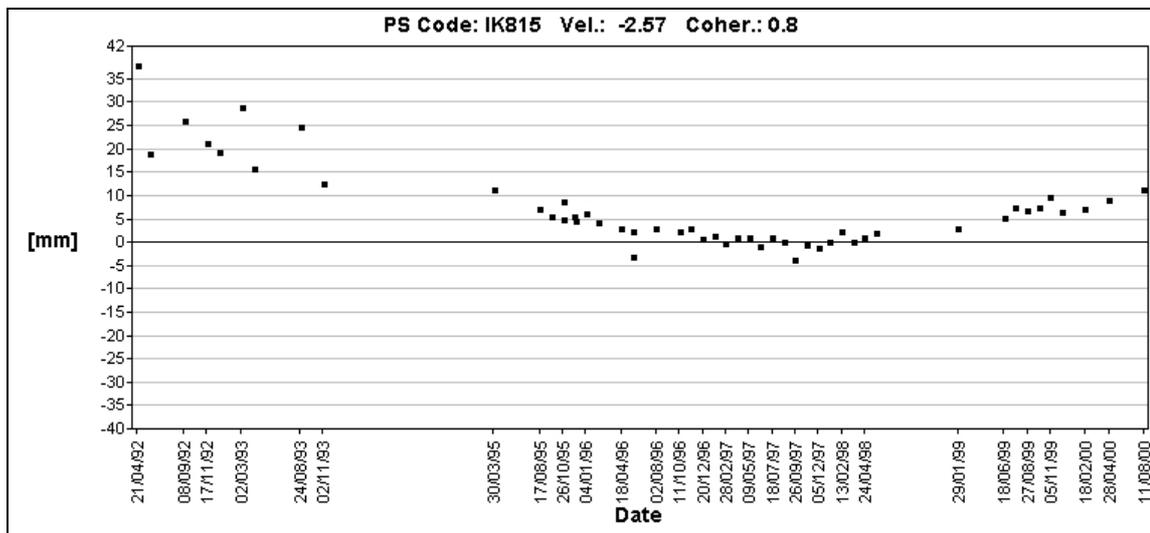


Fig. 19 - Esempio di serie temporale di PS che evidenzia un comportamento stagionale.



**Fig. 20** - Esempio di serie temporale di PS che evidenzia un comportamento non lineare.

Un altro problema emerso è stata la notevole diversificazione interna dell'insieme dei dati di lavoro, schematizzabile nei seguenti punti:

- uso di tre sensori diversi (ERS, ENVISAT e RADARSAT) con differenti caratteristiche radiometriche e geometriche;
- differente consistenza nel numero di immagini utilizzate;
- periodi di tempo diversi e in parte non sovrapposti;
- geometria orbitale mista (ERS discendenti, ENVISAT ascendenti e discendenti, RADARSAT ascendenti);
- elaborazione originaria condotta per siti con differenti REF.

Non è certo semplice, ed è forse troppo semplificativo, trattare insieme un patrimonio così diversificato. D'altra parte, l'esigenza di produrre un risultato unico, valevole a scala regionale su due soli periodi di tempo principali, ha reso necessario optare per scelte di tipo pratico alterando nel minor modo possibile i dati originari. I dati radar si presentavano organizzati in due diverse forme:

1. suddivisi per sito;
2. aggregati in file complessivi realizzati dopo avere riferito ad un unico REF i risultati dei singoli siti - caratterizzati ciascuno da un diverso punto di riferimento (REF).

In considerazione dello scopo finale dell'attività, consistente in una descrizione del fenomeno a scala regionale, si è scelto di usare i dati in forma aggregata; la scelta è stata compiuta sia per ERS che per ENVISAT. E' stato comunque verificato che vi fosse un

buon raccordo nelle zone di transizione fra un sito e l'altro. Una scelta in qualche modo analoga è stata effettuata nel considerare assieme i risultati ENVISAT ad orbita discendente e quelli ad orbita ascendente (previa verifica dell'ipotesi di ridotta componente del moto orizzontale) e di utilizzare, nella parte centrale dell'area, il dato RADARSAT in sostituzione di ENVISAT, in quanto dotato di miglior qualità intrinseca. Non è scopo di questo lavoro effettuare un'analisi specifica su comportamenti locali anomali dovuti a singoli PS e sulle cause che li generano, essendo l'interesse concentrato su una analisi a scala regionale. Si è ritenuto tuttavia opportuno indagare anche questo aspetto, sia per avere un metro di valutazione sulla omogeneità dei risultati di un'analisi interferometrica di questo tipo, sia perché è stato necessario intervenire in alcuni specifici casi in cui valori palesemente anomali dal contesto potevano inficiare il campo di subsidenza calcolato nell'area.

Per effettuare considerazioni specificatamente locali va innanzitutto valutato il problema della georeferenziazione dell'informazione disponibile. Si ricorda che ad ogni pixel delle immagini radar corrisponde una cella di risoluzione a terra che nel caso dei satelliti ERS ed ENVISAT misura circa 20 metri nella direzione Est-Ovest e circa 4 metri in quella Nord-Sud. La georeferenziazione finale dei PS è stata eseguita nel processo di elaborazione SAR con un passaggio di *datum* ed una successiva rifinitura, "portando" i *dataset* su una base geografica di riferimento, che nel caso in questione era costituita dalle ortofoto digitali prodotte dal volo AGEA-AIMA, con pixel a terra dell'ordine del metro, inquadrare in UTM-ED50, fuso 32. L'inaccuratezza specifica nella posizione planimetrica del dato radar ( $\pm 6-10$  m e  $\pm 2-5$  m rispettivamente in Est e Nord) e gli inevitabili problemi di precisione nella georeferenziazione del dato raster di riferimento possono condizionare i confronti puntuali tra i risultati SAR ed altri diversamente georiferiti. Va notato però, a rigore, che la localizzazione planimetrica dei capisaldi di livellazione è anch'essa generalmente di non elevata accuratezza, essendo spesso desunta da cartografia tecnica e/o rilievi speditivi. Tutto ciò comporta una qualche difficoltà ad esaminare i singoli casi di difformità e trarre conclusioni certe sulle cause fisiche di queste divergenze.

Un altro aspetto che si è indagato è quello, connaturato in qualche modo alle proprietà di risposta dei diversi bersagli, relativo alla presenza di PS che presentano velocità largamente differenti dai bersagli nel loro intorno. E' un fenomeno che si può correlare a

situazioni locali (es. interventi su singoli manufatti) o alle proprietà riflettenti delle differenti superfici.

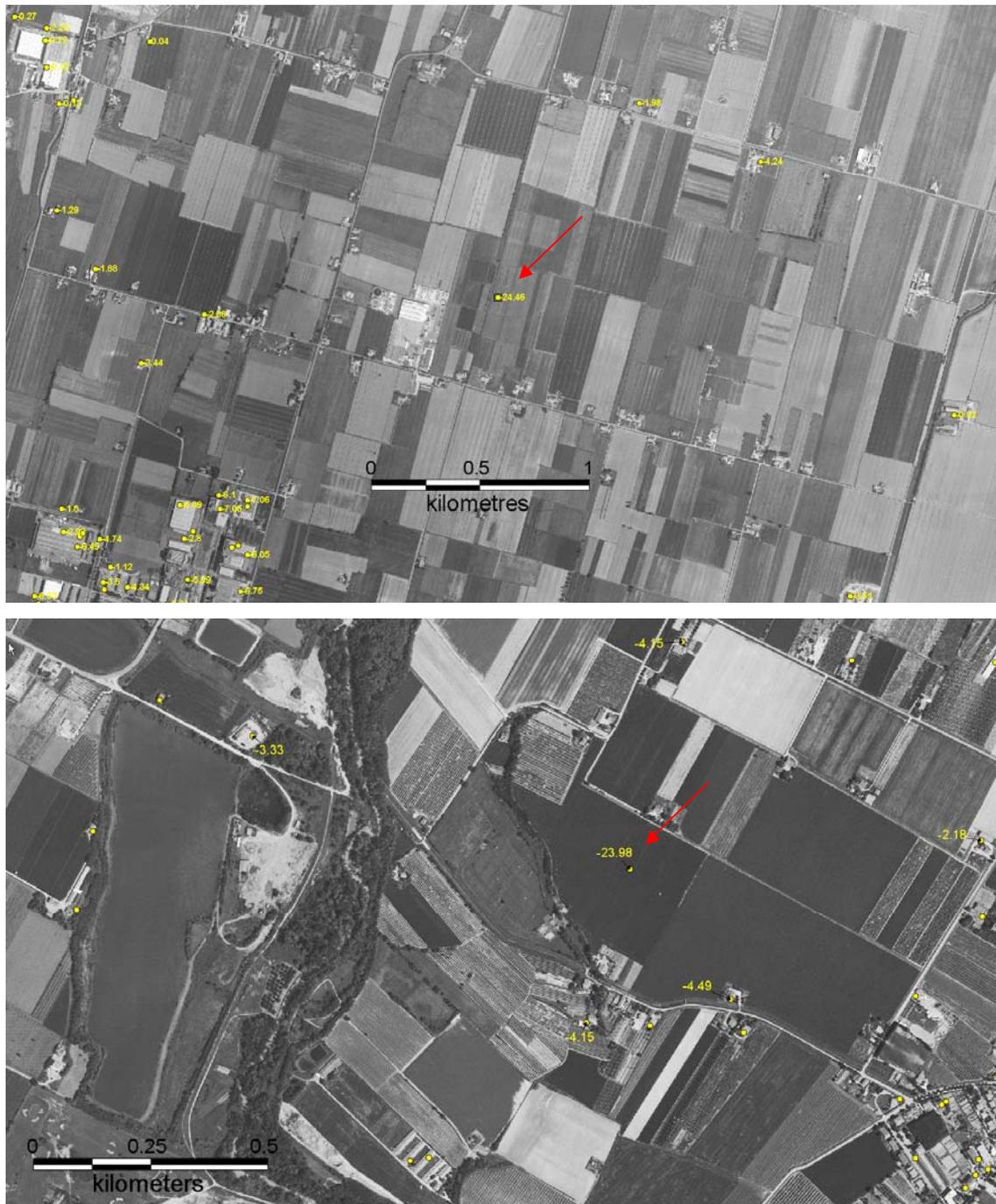
Sono stati usati a questo fine degli indicatori tipicamente adottati in ambito GIS, e cioè l'indice di autocorrelazione locale (Moran I) e lo *z-score*, effettuando per ogni PS una ricerca in un intorno di 400 m, valutato come opportuno a questi fini dopo alcuni test. L'esperimento, molto oneroso dal punto di vista computazionale, è stato condotto relativamente al dato ERS su alcune aree diverse e per tutti i tre *dataset* su un'area comune nel bolognese. Il numero di PS ERS che presentavano valori di autocorrelazione negativi molto elevati (indicatori di forti differenze con l'intorno) è risultato limitato. Considerando l'area di studio comune e fissando una stessa soglia arbitraria sull'indice di autocorrelazione per un intorno di 400 m, si sono trovate percentuali simili per ERS ed ENVISAT mentre per RADARSAT si è avuto un valore superiore di PS con queste caratteristiche.

Uno *screening* esteso è stato quindi condotto sui *dataset* al fine di evidenziare la presenza di bersagli che presentassero velocità palesemente non accettabili e che quindi rischiavano di compromettere il risultato finale.

A questo fine si sono analizzati congiuntamente gli indicatori sopra considerati ed altri:

- difformità con le velocità di PS nell'intorno;
- distanza del PS dai punti prossimi che esibiscono velocità molto diverse;
- valore di coerenza associato al punto;
- localizzazione fisica, valutata mediante sovrapposizione con le ortofoto digitali AGEA-AIMA con pixel a terra pari a 1 m, utilizzate da T.R.E. per la georeferenziazione dei *dataset* nel sistema UTM-ED50;
- serie storica;
- altre considerazioni specifiche per l'area geografica considerata.

A titolo di esempio, si riporta l'immagine di due PS che esibiscono una evidente anomalia rispetto a quelli circostanti; come si può notare, i punti non sembrano corrispondenti a strutture significative - anche ingrandendo al massimo l'immagine. Per tenere conto che queste ortofoto non sono coeve ai dati radar più recenti (RADARSAT e ENVISAT), si sono esaminate anche altre immagini più recenti (es. Google Earth™). Questo tipo di analisi ha portato ad eliminare un certo numero, seppure molto limitato (qualche decina), di PS appartenenti ai tre *dataset* (vedi Fig. 21)



**Fig. 21** - Esempi di anomalie rilevate (i PS eliminati sono indicati dalla freccia).

Certamente, uno dei problemi più delicati ed importanti nell'intero lavoro è l'attribuzione di un grado di significatività ai movimenti calcolati. In questo paragrafo si analizzeranno gli errori intrinseci del metodo, così come forniti dalle procedure di elaborazione interferometrica; non si forniranno quindi valutazioni basate su dati esterni, che saranno invece considerati nel paragrafo successivo.

E' difficile attribuire un errore assoluto al dato interferometrico, soprattutto nel caso di una elaborazione geograficamente molto estesa. T.R.E. fornisce a questo proposito una valutazione, piuttosto cautelativa, di  $\pm 0.1-2$  mm/anno per un PS molto prossimo al punto di riferimento (entro 2 km), nell'ipotesi di disporre di un *dataset* costituito da almeno 50 immagini. Dichiara invece che non è possibile, a causa dell'inevitabile e non facilmente modellizzabile rumore di decorrelazione (dovuto a fattori atmosferici e fisici), stimare il valore di accuratezza in altri casi. Il presente lavoro è ovviamente molto lontano dall'esempio ipotizzato e dunque occorre affrontare il problema in altro modo, per quanto e come sia possibile definirlo con gli strumenti attualmente a disposizione.

In mancanza di altre informazioni, potendo operare solo sui dati finali, si sono per prima cosa analizzati i due valori che si possono collegare alla qualità da associare alla velocità determinata per ogni PS: la coerenza e la deviazione standard.

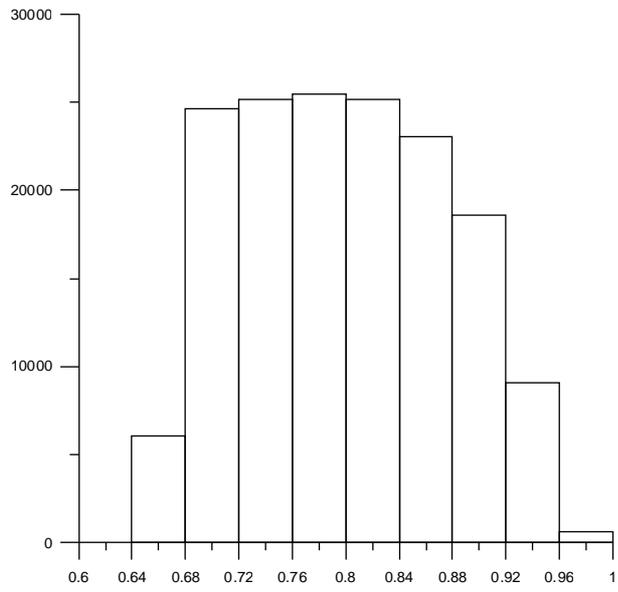
Si ricorda che la coerenza associata a un PS è un indice normalizzato tra 0 e 1 legato alla deviazione standard del rumore di fase; è funzione del numero di immagini elaborate e della distribuzione dei *baseline* temporali e spaziali (momento di acquisizione e posizione del sensore). E' un fattore legato sia alla rumorosità del dato che allo scostamento da un comportamento lineare.

La deviazione standard è invece correlata fortemente al comportamento rispetto al punto di riferimento adottato nel *processing*, diverso per ogni sito elaborato. La traslazione di tutti i siti in un unico *dataset* ha in qualche modo fatto perdere una parte di significatività a questo dato.

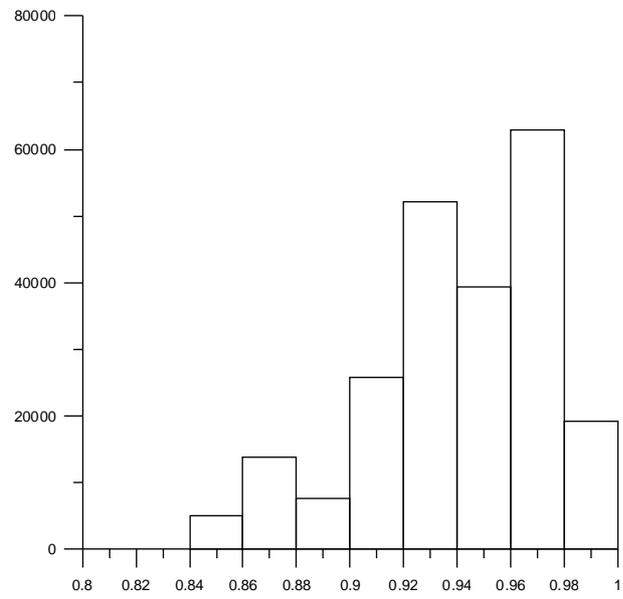
Per avere una descrizione di sintesi di questi indicatori si sono fatte alcune elaborazioni statistiche e graficazioni. Per quanto riguarda il periodo 2002-2006 ci si è riferiti sia ai file separati prodotti dai due sensori ENVISAT e RADARSAT sia a quello complessivo utilizzato per realizzare l'interpolazione delle carte finali - quest'ultimo, in particolare, riporta le velocità relative a 142236 PS.

Dall'analisi qualitativa dei grafici su base geografica si ha un ulteriore riscontro sul fatto che l'elaborazione sia stata condotta per siti.

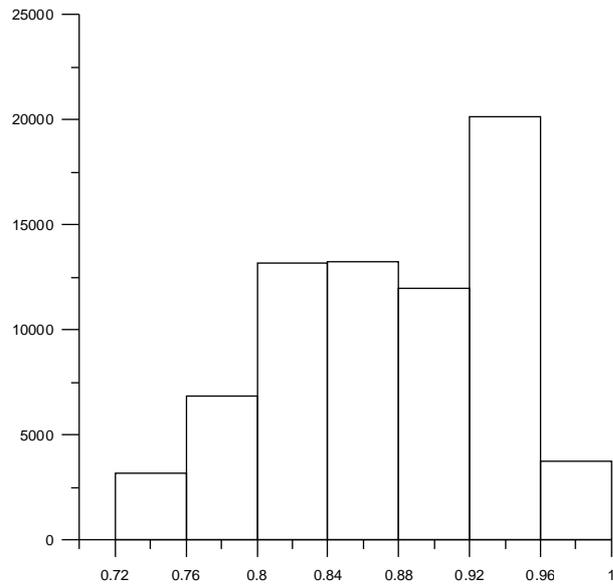
Nelle figure seguenti sono rappresentati gli istogrammi relativi ai valori di coerenza.



**Fig. 22** - Istogramma dei valori di coerenza associati ai PS estratti da ERS.

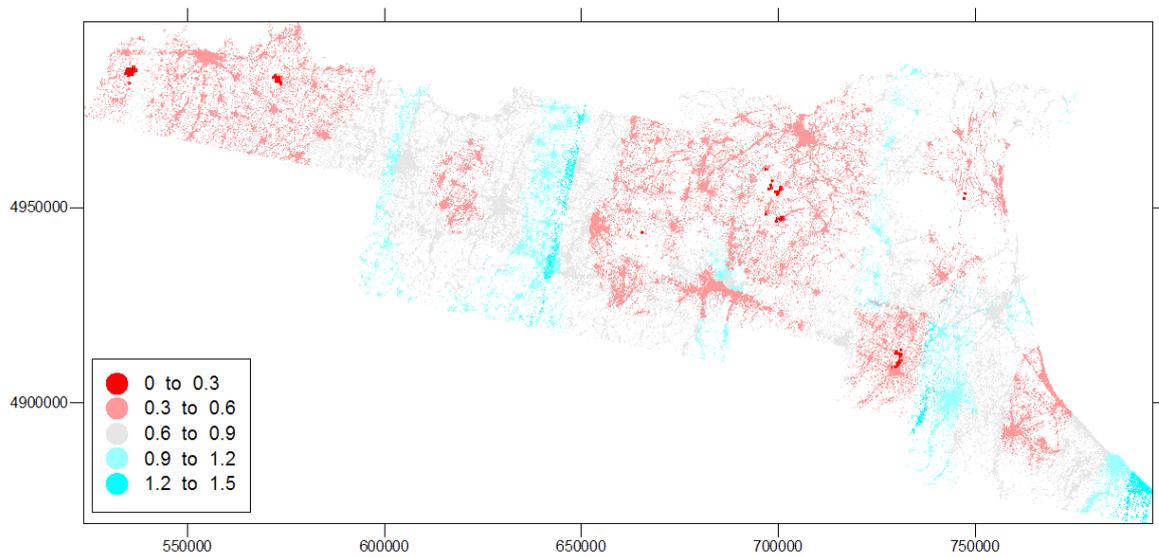


**Fig. 23** - Istogramma dei valori di coerenza associati ai PS estratti da ENVISAT.

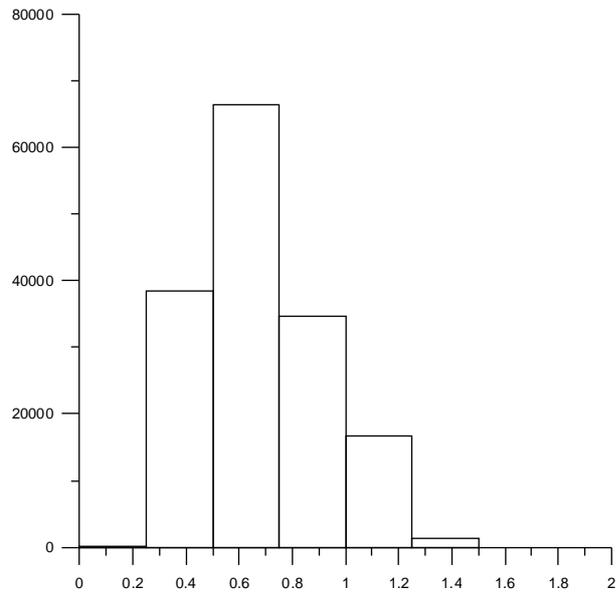


**Fig. 24** - Istogramma dei valori di coerenza associati ai PS estratti da RADARSAT.

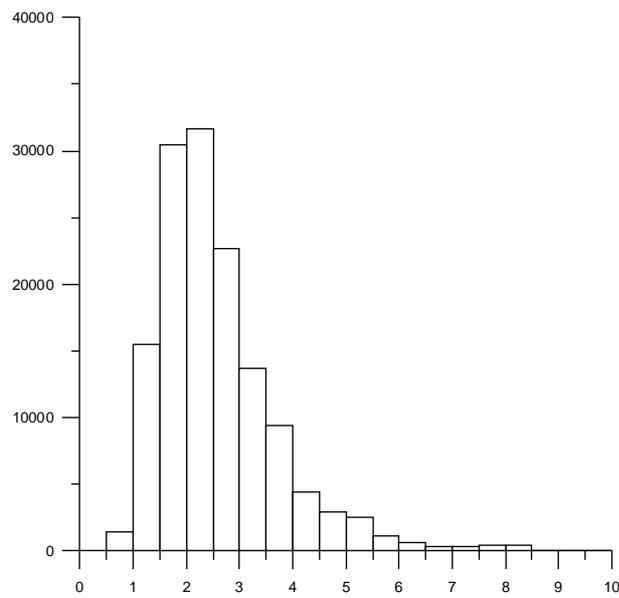
Per quanto riguarda la deviazione standard associata alle velocità di movimento, di seguito si presentano alcuni elaborati grafici significativi.



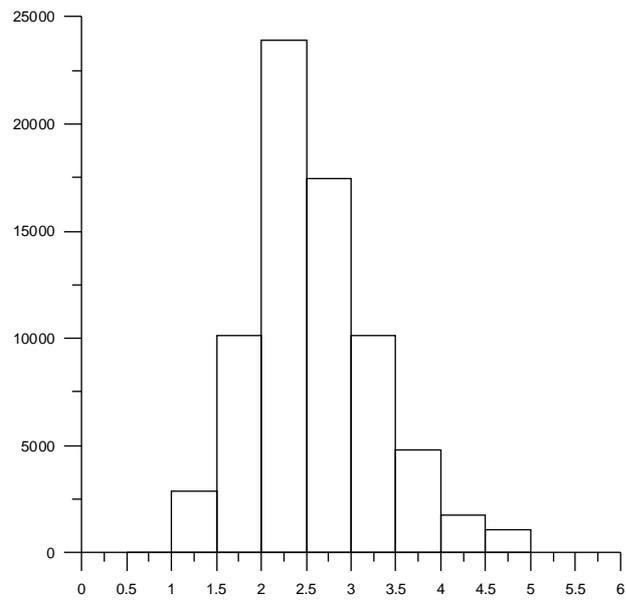
**Fig. 25** – Mappatura dei valori di deviazione standard associati alle velocità calcolate da ERS (mm/anno).



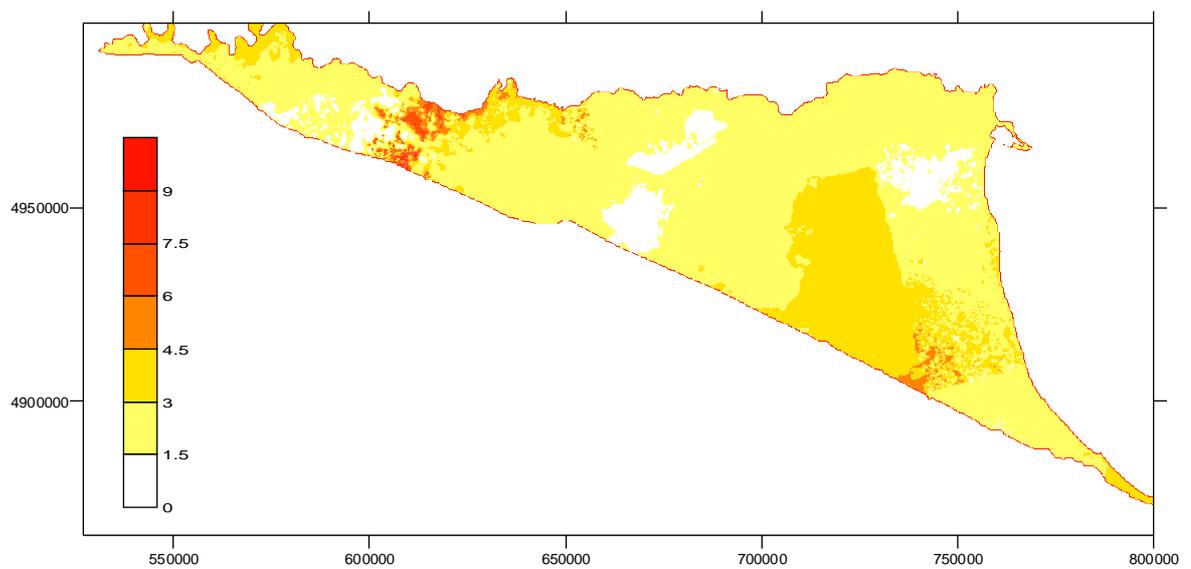
**Fig. 26** - Istogramma dei valori di deviazione standard associati alle velocità calcolate da ERS, v.m.=0.68 (mm/anno).



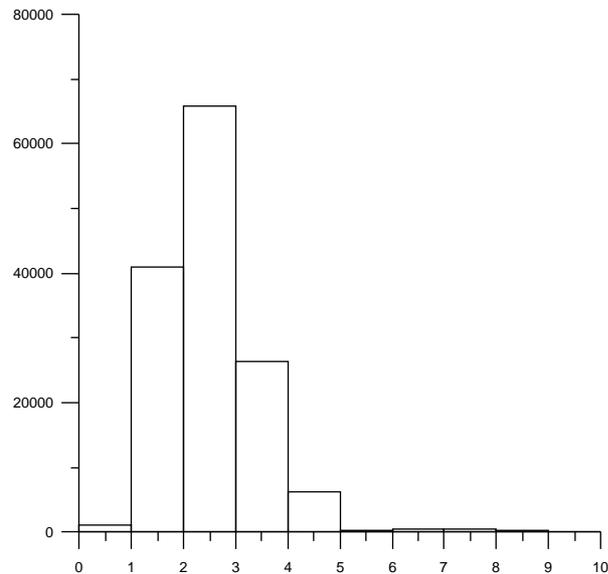
**Fig. 27** - Istogramma dei valori di deviazione standard associati alle velocità calcolate da ENVISAT, v.m.=2.65 (mm/anno).



**Fig. 28** - Istogramma dei valori di deviazione standard associati alle velocità calcolate da RADARSAT, v.m.=2.60 (mm/anno).



**Fig. 29** – Mappatura dei valori di deviazione standard associati alle velocità calcolate dal dataset integrato ENVISAT-RADARSAT (mm/anno).



**Fig. 30** - Istogramma dei valori di deviazione standard associati alle velocità calcolate dal *dataset* integrato ENVISAT-RADARSAT, v.m.=2.52 (mm/anno).

Gli stessi dati di sintesi possono essere calcolati anche sui singoli siti processati autonomamente, come mostrato nelle tre tabelle e relativi tre grafici seguenti, che riguardano i dati ERS ed ENVISAT (per RADARSAT è stato fornito un unico *dataset*). I nomi dei siti sono stati assegnati da T.R.E. e sono solamente orientativi; la loro delimitazione geometrica è mostrata nelle figure al paragrafo 3.3.1.

Si evidenzia un comportamento abbastanza simile nei valori medi di coerenza e deviazione standard, con alcune differenze invece negli estremi dell'intervallo; il dato ERS appare di migliore qualità, in questo evidentemente favorito dalla disponibilità di un numero elevato di immagini.

#### **ERS discendente**

<b>BOBBIO (1436 PS)</b>	<b>VEL</b>	<b>COERENZA</b>	<b>V_STDEV</b>
Minimum	-6.3	0.68	0.23
Maximum	8.9	0.97	0.59
Mean	2.13	0.801	0.373
Standard deviation	0.922	0.0735	0.0567
<b>FAENZA (6463 PS)</b>	<b>VEL</b>	<b>COERENZA</b>	<b>V_STDEV</b>
Minimum	-29.06	0.68	0.27
Maximum	1.85	0.97	0.74
Mean	-4.7764	0.796	0.473
Standard deviation	3.0734	0.0741	0.0919
<b>FERRARA OVEST (30309 PS)</b>	<b>VEL</b>	<b>COERENZA</b>	<b>V_STDEV</b>

Minimum	-33.9	0.68	0.22
Maximum	3.2	0.98	0.81
Mean	-7.064	0.808	0.525
Standard deviation	7.248	0.0782	0.0933
<b>MODENA (36289 PS)</b>	<b>VEL</b>	<b>COERENZA</b>	<b>V_STDEV</b>
Minimum	-39.7	0.65	0.28
Maximum	6.1	0.98	1.22
Mean	-7.233	0.787	0.7287
Standard deviation	8.916	0.084	0.2064
<b>RAVENNA COSTA (16531 PS)</b>	<b>VEL</b>	<b>COERENZA</b>	<b>V_STDEV</b>
Minimum	-21.61	0.68	0.28
Maximum	8.85	0.98	1.18
Mean	-5.8071	0.799	0.7215
Standard deviation	2.5472	0.0736	0.1689
<b>REGGIO EMILIA (30999 PS)</b>	<b>VEL</b>	<b>COERENZA</b>	<b>V_STDEV</b>
Minimum	-32.33	0.68	0.4
Maximum	9.42	0.99	1.32
Mean	-2.1418	0.809	0.8405
Standard deviation	2.6927	0.0778	0.2063
<b>RIMINI COSTA (26177 PS)</b>	<b>VEL</b>	<b>COERENZA</b>	<b>V_STDEV</b>
Minimum	-30.83	0.68	0.38
Maximum	6.45	0.98	1.33
Mean	-4.7907	0.797	0.8396
Standard deviation	2.7974	0.0733	0.2386
<b>SALSOMAGGIORE (17885 PS)</b>	<b>VEL</b>	<b>COERENZA</b>	<b>V_STDEV</b>
Minimum	-16.87	0.68	0.27
Maximum	9.1	0.99	0.81
Mean	0.53725	0.807	0.504
Standard deviation	1.1981	0.0769	0.104

### ENVISAT ascendente

<b>BOLOGNA (39669 PS)</b>	<b>VEL</b>	<b>COERENZA</b>	<b>V_STDEV</b>
Minimum	-44.34	0.87	0.8
Maximum	25.06	1	4.43
Mean	-8.2804	0.934	2.297
Standard deviation	8.3776	0.0339	0.7716
<b>RAVENNA (19600 PS)</b>	<b>VEL</b>	<b>COERENZA</b>	<b>V_STDEV</b>

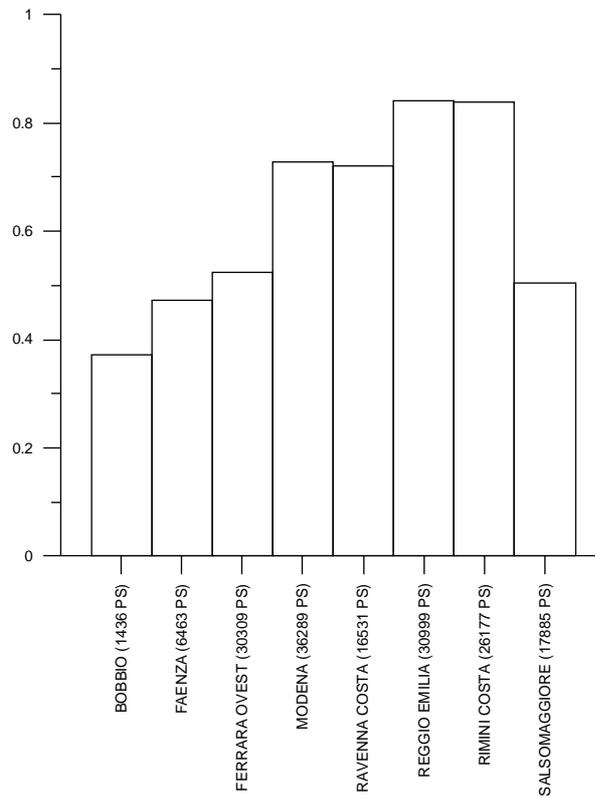
Minimum	-38.15	0.9	0.69
Maximum	2.65	1	5.58
Mean	-5.412	0.943	3.246
Standard deviation	2.7813	0.026	1.104
<b>REGGIO EMILIA (12328 PS)</b>	<b>VEL</b>	<b>COERENZA</b>	<b>V_STDEV</b>
Minimum	-39.27	0.97	1.61
Maximum	4.89	1	9.51
Mean	-3.5892	0.98	4.319
Standard deviation	3.3021	0.00869	1.825
<b>RIMINI (13182 PS)</b>	<b>VEL</b>	<b>COERENZA</b>	<b>V_STDEV</b>
Minimum	-29.34	0.91	0.64
Maximum	2.99	1	4.43
Mean	-5.0608	0.956	2.088
Standard deviation	3.3962	0.0259	0.8522
<b>SALSOMAGGIORE (3236 PS)</b>	<b>VEL</b>	<b>COERENZA</b>	<b>V_STDEV</b>
Minimum	-9.68	0.97	0.82
Maximum	6.7	1	4.09
Mean	-0.1108	0.976	2.216
Standard deviation	1.804	0.00731	0.8437

### ENVISAT discendente

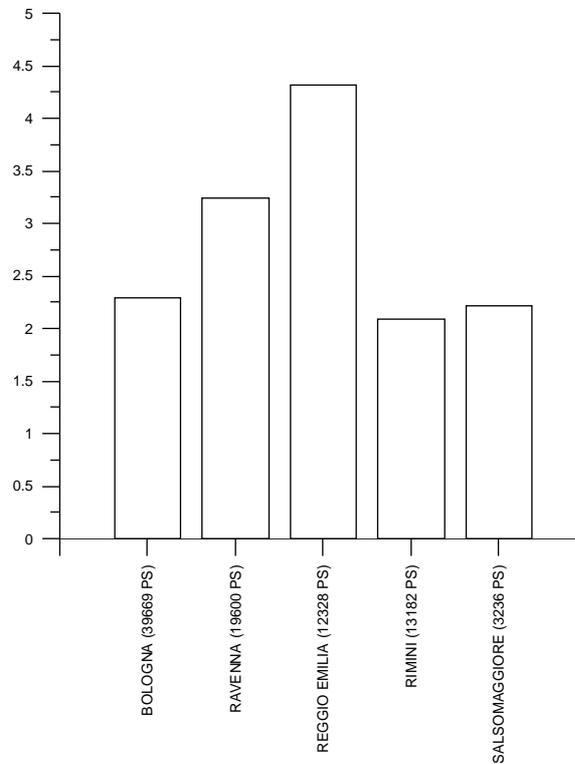
<b>FERRARA (2941 PS)</b>	<b>VEL</b>	<b>COERENZA</b>	<b>V_STDEV</b>
Minimum	-54.71	0.97	1.12
Maximum	5.94	1	3.46
Mean	-11.241	0.977	2.296
Standard deviation	10.674	0.00734	0.375
<b>FERRARA NORD (441 PS)</b>	<b>VEL</b>	<b>COERENZA</b>	<b>V_STDEV</b>
Minimum	-13.46	0.97	1.16
Maximum	2.7	1	3.51
Mean	-3.075	0.977	2.555
Standard deviation	1.7471	0.00769	0.553
<b>PIACENZA (5172 PS)</b>	<b>VEL</b>	<b>COERENZA</b>	<b>V_STDEV</b>
Minimum	-10.19	0.92	0.78
Maximum	6.33	0.99	2.67
Mean	0.92196	0.945	1.805
Standard deviation	1.2362	0.0183	0.3293
<b>RAVENNA (11769 PS)</b>	<b>VEL</b>	<b>COERENZA</b>	<b>V_STDEV</b>

Minimum	-25.83	0.85	0.69
Maximum	1.53	0.99	3.64
Mean	-5.2121	0.918	1.964
Standard deviation	2.6913	0.0385	0.5261
<b>REGGIO EMILIA (3483 PS)</b>	<b>VEL</b>	<b>COERENZA</b>	<b>V_STDEV</b>
Minimum	-19.27	0.98	0.71
Maximum	5.87	1	3.14
Mean	-3.0364	0.983	1.76
Standard deviation	2.896	0.00499	0.4295
<b>RIMINI (23047 PS)</b>	<b>VEL</b>	<b>COERENZA</b>	<b>V_STDEV</b>
Minimum	-42.99	0.85	1.04
Maximum	2.66	0.99	4.41
Mean	-5.4229	0.907	2.544
Standard deviation	3.123	0.0365	0.6443
<b>SALSOMAGGIORE (3196 PS)</b>	<b>VEL</b>	<b>COERENZA</b>	<b>V_STDEV</b>
Minimum	-26.36	0.96	1.25
Maximum	5.44	1	4.59
Mean	-1.7415	0.969	2.625
Standard deviation	3.2104	0.009	0.8256

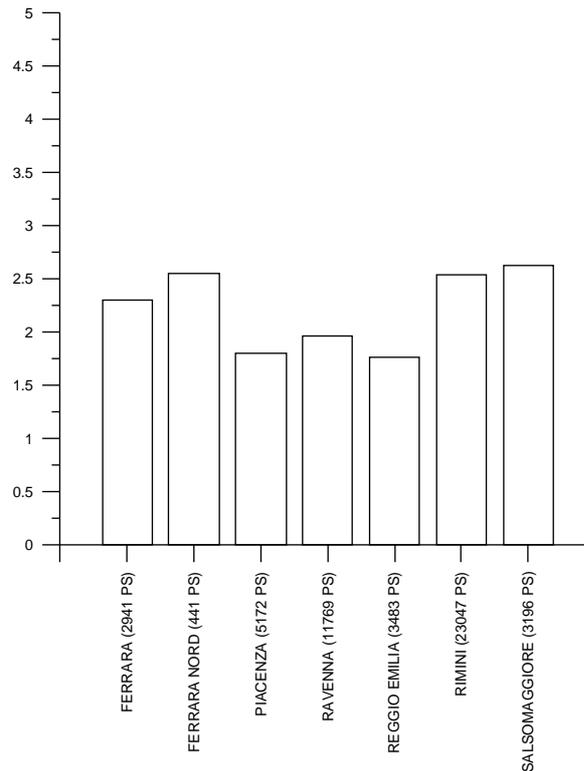
**Tabella 5** - Statistica elementare sui valori di velocità, coerenza e deviazione standard relativi ai singoli siti delle elaborazioni ERS e ENVISAT.



**Fig. 31 - ERS discendente.** Graficazione per i singoli siti del valore medio della deviazione standard (mm/anno) associata alle velocità.



**Fig. 32 - ENVISAT ascendente.** Graficazione per i singoli siti del valore medio della deviazione standard (mm/anno) associata alle velocità.



**Fig. 33 - ENVISAT discendente.** Graficazione per i singoli siti del valore medio della deviazione standard (mm/anno) associata alle velocità.

#### 4.3.2 Confronti con i dati di livellazione geometrica e realizzazione del database

Data la complessità e l'ampiezza dello studio e considerando il carattere molto innovativo della tecnica adottata, è stato necessario effettuare una verifica dei risultati alla luce di dati esterni, che in questo caso consistevano evidentemente nei dati di livellazione geometrica. D'altra parte la rete di livellazione misurata nel corso del 2005 ha avuto tra i propri scopi primari proprio quello di supportare l'analisi interferometrica fornendo in qualche modo l'ossatura portante della sua validazione.

Per quanto concerne il primo periodo in esame, i dati da confrontare con i risultati radar potevano essere quelli ottenuti dalla campagna regionale 1999 e da campagne di livellazione precedenti, condotte da altri enti ed in date diverse, già esaminate in sede di relazione finale di quella campagna. Venne infatti redatta a suo tempo una carta della velocità di abbassamento del suolo nell'intera area di pianura, riferita tuttavia non ad un periodo unico, ma a vari periodi, terminanti tutti al 1999, in funzione dei dati del passato

disponibili sulle varie aree. Si trattava dunque di una carta poco omogenea, sia per la disponibilità di dati storici molto differenziati sia per l'assunto fatto - in mancanza di altre informazioni - di considerare come lineare il fenomeno di subsidenza, anche se relativo a periodi molto lunghi. Quindi, per quanto concerne questo dato di riferimento, il confronto con i risultati PSInSAR va considerato con estrema cautela, andandosi a sovrapporre le incertezze del dato radar con quelle, ancor meno quantificabili, derivate dall'uso di dati storici di livellazione non omogenei tra loro.

Per quanto attiene invece al periodo più recente, il dato topografico di confronto è più omogeneo, trattandosi delle due campagne regionali per lo studio della subsidenza, condotte nel 1999 e 2005 con metodologia e approcci del tutto coerenti; la carenza, in questo caso, è però costituita da tre fattori:

- l'estensione limitata della rete di livellazione del 2005, dovuta anche ad un contenimento dei costi, che ha consentito di determinare le velocità di movimento per un numero ridotto di capisaldi, lasciando scoperte ampie aree, soprattutto nella parte occidentale della regione;
- la ridotta disponibilità su questo periodo di immagini ENVISAT, come già anticipato al paragrafo 4.2, che ha portato ad elaborazioni con margine di accuratezza minore, fino alla necessità di utilizzare il dato proveniente da RADARSAT in corrispondenza dell'area centrale della regione;
- la non esatta coincidenza fra il periodo relativo alle misure di livellazione (1999-2005) e il periodo relativo ai dati ENVISAT-RADARSAT, sintetizzato tramite gli estremi più ampi 2002-2006, anche se non tutti i valori di velocità sono riferiti a tale periodo; in particolare, l'insieme dei dati RADARSAT, come si è detto, fa riferimento al periodo 2003-2005.

Per quanto riguarda la metodologia di valutazione, si è in prima battuta effettuato un confronto puntuale tra le velocità dei capisaldi dedotte dalla livellazione e quelle derivanti dall'analisi interferometrica. Le modalità di confronto studiate sono state sostanzialmente quattro:

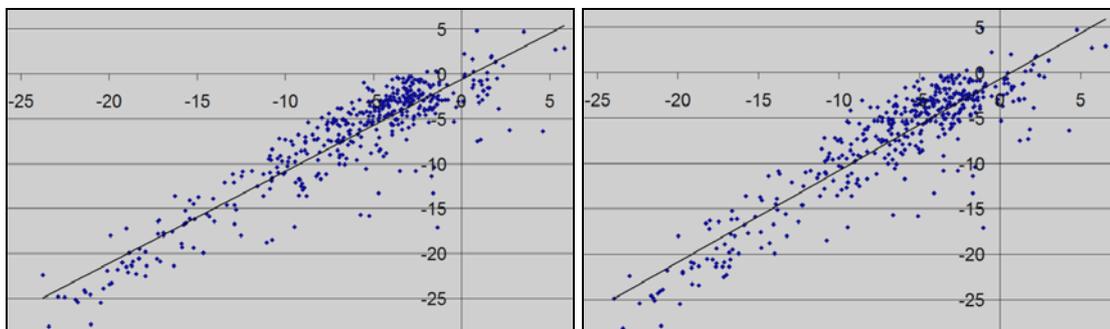
- *nearest neighbour*: confronto tra la velocità del caposaldo e quella del PS più prossimo;
- media nell'intorno: calcolo della velocità dalla media aritmetica delle velocità dei PS posti in un intorno del caposaldo;

- media pesata sulla distanza: in questo caso le velocità dei PS nell'intorno del caposaldo sono state mediate con un peso calcolato in funzione della distanza dei PS rispetto ad esso;
- media pesata su intorno in funzione del gradiente: la dimensione dell'intorno è stata determinata in modo diverso per ogni caposaldo, considerando la varianza locale delle velocità PS o, in altre parole, il gradiente del fenomeno.

Sono stati allo scopo appositamente implementati diversi programmi, sia in ambiente database che in ambiente GIS.

Per quanto riguarda la scelta dell'intorno, si è ritenuto opportuno adottare un raggio di 300 m; utilizzando tale valore, risulta che per 125 capisaldi della rete 2005 non vi sono PS ERS nell'intorno e per 111 capisaldi non vi sono PS ENVISAT.

A titolo di esempio, la figura che segue mostra graficamente il confronto tra le velocità dedotte da livellazione (in y) e da PS RADARSAT (in x) per oltre 400 capisaldi adottando due tecniche diverse: a sinistra la velocità SAR è calcolata dalla media aritmetica dei PS nell'intorno di 300 m, a destra si è considerato invece solamente il PS più prossimo. La retta di regressione evidenzia in entrambi i casi il buon accordo complessivo tra i *dataset*, mentre analisi di maggior dettaglio richiedono studi locali.



**Fig. 34** - Scatterplot tra le velocità dedotte da PSInSAR (RADARSAT) e da livellazione geometrica 1999-2005. A sinistra le velocità SAR sono dedotte dalla media aritmetica dei PS in un intorno di 300 m rispetto a un caposaldo di livellazione; a destra si è considerato il PS più prossimo al caposaldo.

Va considerato ai fini del confronto che gli errori associati alle quote rilevate con livellazione, e di conseguenza anche alle velocità di subsidenza, sono crescenti all'allontanarsi dal punto di riferimento (Sasso Marconi), raggiungendo anche valori consistenti nei punti estremi sulla costa e nel versante occidentale. Nella campagna 2005 si raggiunse sul caposaldo più lontano dal punto fisso una deviazione standard intorno agli 11 mm, mentre si aggravava sui 7.5 mm per la campagna 1999.

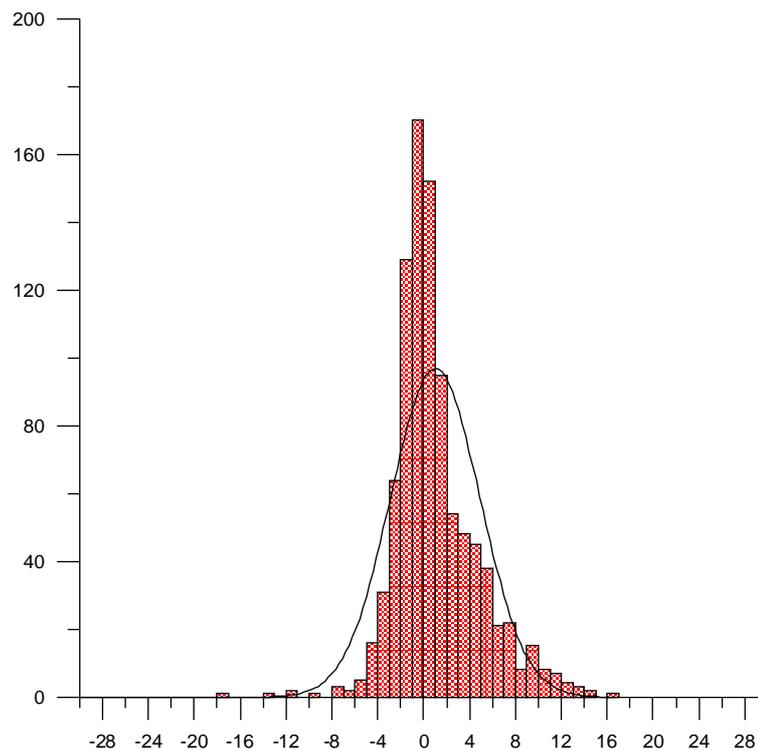
La propagazione della varianza conduce quindi ad associare un errore alle variazioni di quota ed alle velocità calcolate nel periodo 1999-2005. Nella relazione relativa alla campagna 1999, per fornire un dato cautelativo, si calcolò questo errore usando un intervallo di confidenza al 95% del livello di probabilità, ottenendo valori massimi intorno ai 4 mm/anno.

Va sottolineato che, mentre l'errore desunto dai dati di livellazione è crescente all'allontanarsi dal punto di riferimento, lo stesso non può dirsi del dato radar, per il quale sono già stati presentati gli errori forniti dall'elaborazione PSInSAR (cfr. 4.3.1); in quel caso si è già osservato che è difficile sia rilevare un sistematismo sia avere dei dati di precisione realmente significativi a causa dell'elaborazione multi-sito condotta, nonché, per il secondo periodo di studio, a causa dell'assemblaggio tra prodotti ENVISAT e RADARSAT.

Per una valutazione più generale si è operato il confronto tra i dati di subsidenza disponibili sui capisaldi di livellazione e quelli deducibili da un modello dei movimenti ottenuto per interpolazione delle velocità calcolate per i PS. Si è ritenuto opportuno procedere ad un'interpolazione di questi dati mediante kriging, realizzando un grigliato con passo di 100 m; l'operazione è stata eseguita sia per il primo periodo che per il secondo.

Si è estratto poi dal grigliato il valore interpolato di movimento in corrispondenza delle coordinate piane dei capisaldi di confronto; le velocità sono state comparate con quelle calcolate dalla livellazione geometrica per periodi antecedenti il 1999.

Per quanto riguarda il **primo periodo, 1992-2000**, il valore medio dello scostamento tra velocità di movimento (mm/anno) determinata con analisi PSInSAR sui dati ERS e con livellazione geometrica è pari ad 1 mm/anno, con una deviazione standard di quasi 4 mm/anno. La figura seguente mostra l'istogramma relativo a questi dati (valore interpolato dal grigliato ERS – valore di livellazione).



**Fig. 35** - Istogramma degli scostamenti tra le velocità di movimento (mm/anno) determinate con analisi PSInSAR ERS e con livellazione geometrica per il periodo 1992-2000, con sovrapposizione della curva normale.

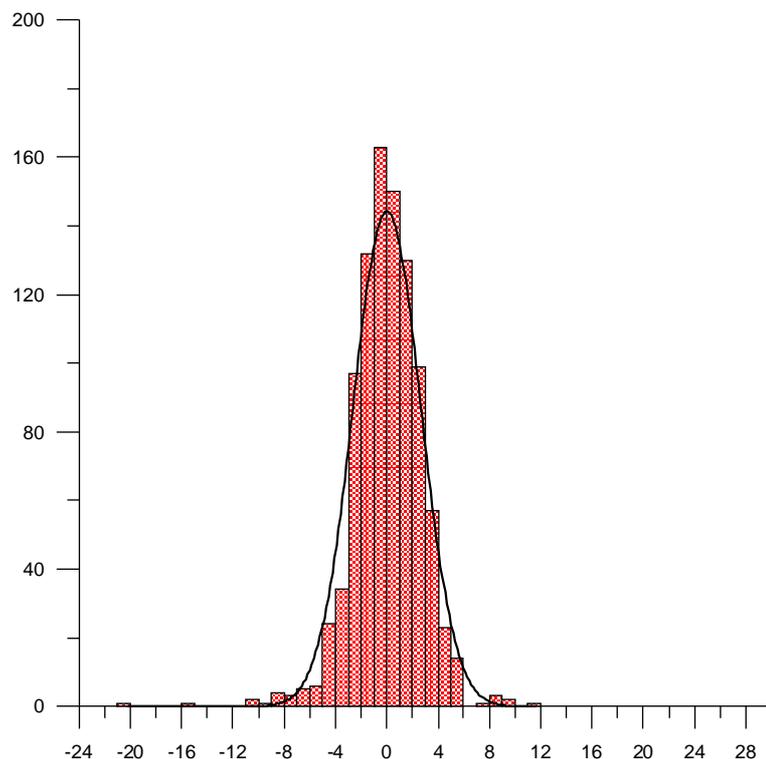
Si può notare che la distribuzione si discosta dalla curva normale; il 70% dei dati rientra nell'intervallo tra -3 e +3 mm/anno, ma una larga percentuale è esterna ad esso e mostra in maggioranza (segno positivo nella differenza) valori di subsidenza maggiori per la livellazione geometrica rispetto al radar. D'altra parte, si è già osservato che il dato di confronto della livellazione ha un livello di attendibilità limitato, essendo derivato da dati storici non coerenti tra loro; in particolare, il periodo coperto dai vecchi dati di livellazione è per molte parti non coincidente con quello coperto dal radar e copre un arco temporale più ampio che, quindi, potrebbe essere interessato da movimenti verticali di maggiore entità.

**Per il secondo periodo, 2002-2006**, si è iniziato a verificare il dato RADARSAT relativo all'area centrale - soprattutto la zona bolognese - calcolando la media degli scostamenti tra le velocità dedotte dal modello e quelle note dalla livellazione. Tale valore si è rivelato dell'ordine del millimetro, e una correzione di questo ordine è stata applicata al modello radar.

Successivamente si è verificato che i PS ENVISAT posti nelle aree di contorno della zona coperta da RADARSAT avessero una buona congruenza con quelli di quest'ultimo.

Complessivamente il valore medio di scostamento sull'intero insieme dei capisaldi tra la velocità puntuale estratta dal modello ENVISAT-RADARSAT e quanto calcolato con le livellazioni è molto ridotto, intorno al millimetro; esistono però valori massimi di scostamento estremi, positivi e negativi, superiori a 1 cm/anno.

La figura seguente mostra l'istogramma relativo a questi dati; si può notare una distribuzione statistica prossima a quella normale.



**Fig. 36** - Istogramma degli scostamenti tra le velocità di movimento (mm/anno) determinate con analisi PSInSAR ENVISAT-RADARSAT e con livellazione geometrica per il periodo 2002-2005, con sovrapposizione della curva normale.

La deviazione standard di questi scostamenti risulta intorno a 2.6 mm/anno ed in qualche modo questo valore può essere assunto come indicatore di precisione dell'elaborazione interferometrica con il 68% di livello di probabilità. Volendo utilizzare un intervallo di confidenza più cautelativo, questi valori evidentemente crescono: con il 95% di probabilità risultano intorno a 5 mm/anno.

Riassumendo, risulta molto complessa l'assegnazione di un margine di incertezza complessivo sui risultati finali, dedotto sia dall'errore intrinseco PSInSAR che dal confronto con la livellazione. Il primo, infatti, non è, come già detto, realmente indicativo dell'errore effettivo a causa delle condizioni in cui si è operato (tipo di analisi standard condotta ed ampiezza dell'area) e delle elaborazioni effettuate in sede di produzione del dato (processamento di siti singoli e successiva loro unione): i dati ERS del primo periodo presentano certamente i valori più bassi di errore (deviazione standard), intorno al mm/anno, mentre, nel secondo periodo, ENVISAT e RADARSAT sono intorno ai 2-3 mm/anno e in alcuni punti raggiungono errori anche elevati. Il confronto con i dati di livellazione potrebbe essere il criterio prevalente al fine di attribuire un grado di significatività ai risultati, ma anche in questo caso occorre fare delle puntualizzazioni. Il dato di livellazione, per la legge di propagazione della varianza, ha comunque un proprio errore, distribuito geograficamente fino a raggiungere valori anche abbastanza consistenti, ed inoltre può risentire delle problematiche tipiche di queste campagne (stagionalità dei dati, ecc.). Si è visto che per il primo periodo il confronto darebbe un risultato medio molto buono (~1 mm/anno) ma con una deviazione standard degli scostamenti elevata (~ 4 mm/anno), attribuibile con ogni probabilità alla non omogeneità dei dati storici di livellazione. Per il secondo periodo il confronto darebbe risultati migliori, con una deviazione standard di 2.6 mm/anno (al livello di probabilità del 68%, con margini più cautelativi evidentemente è maggiore), ma in questo periodo la sovrapposizione temporale SAR-livellazione non è perfetta, a causa della lacuna in acquisizione tra 2000 e 2002, ed inoltre il numero di immagini su cui è stata eseguita l'elaborazione non è ottimale.

In generale si tratta di valori superiori a quanto ottenuto da altre esperienze di letteratura per il monitoraggio della subsidenza con tecnica PSInSAR, ma va osservato che nessuno di essi ha dovuto far fronte alle problematiche legate all'ampiezza del territorio e alla eterogeneità del dato proprie del presente lavoro.

### **4.3.3 Realizzazione dei prodotti finali**

Le superfici ottenute secondo quanto descritto al paragrafo precedente sono state oggetto di successive elaborazioni che hanno condotto alla produzione cartografica finale:

- ritaglio del grigliato originale (oltre 3.6 milioni di celle) per mantenere solo la parte asservita dai dati e relativa alla zona in studio (in particolare, tale zona è stata delimitata a sud dalla curva di livello 100 m s.l.m.);
- tematizzazione con curve isocinetiche previa applicazione di *smoothing* per migliorare la leggibilità;
- *rendering* a colori con fasce di colore per *range* di velocità di 5 mm/anno.

## **5. ANALISI DEI MOVIMENTI VERTICALI DEL SUOLO**

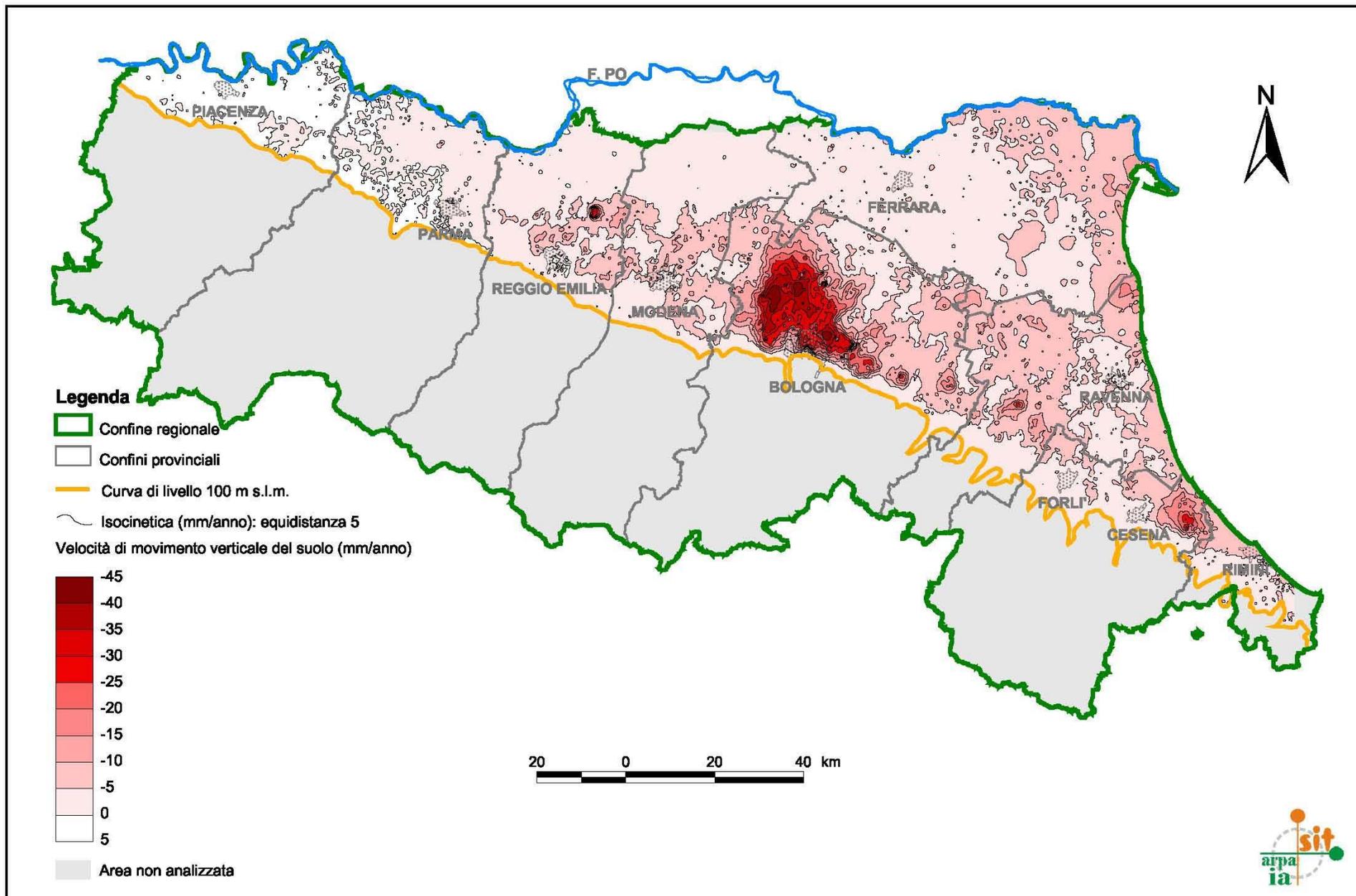
### **5.1 PERIODO 1992-2000**

L'analisi dei movimenti verticali del suolo nel periodo 1992-2000 fa riferimento ai dati riportati sulla seguente cartografia:

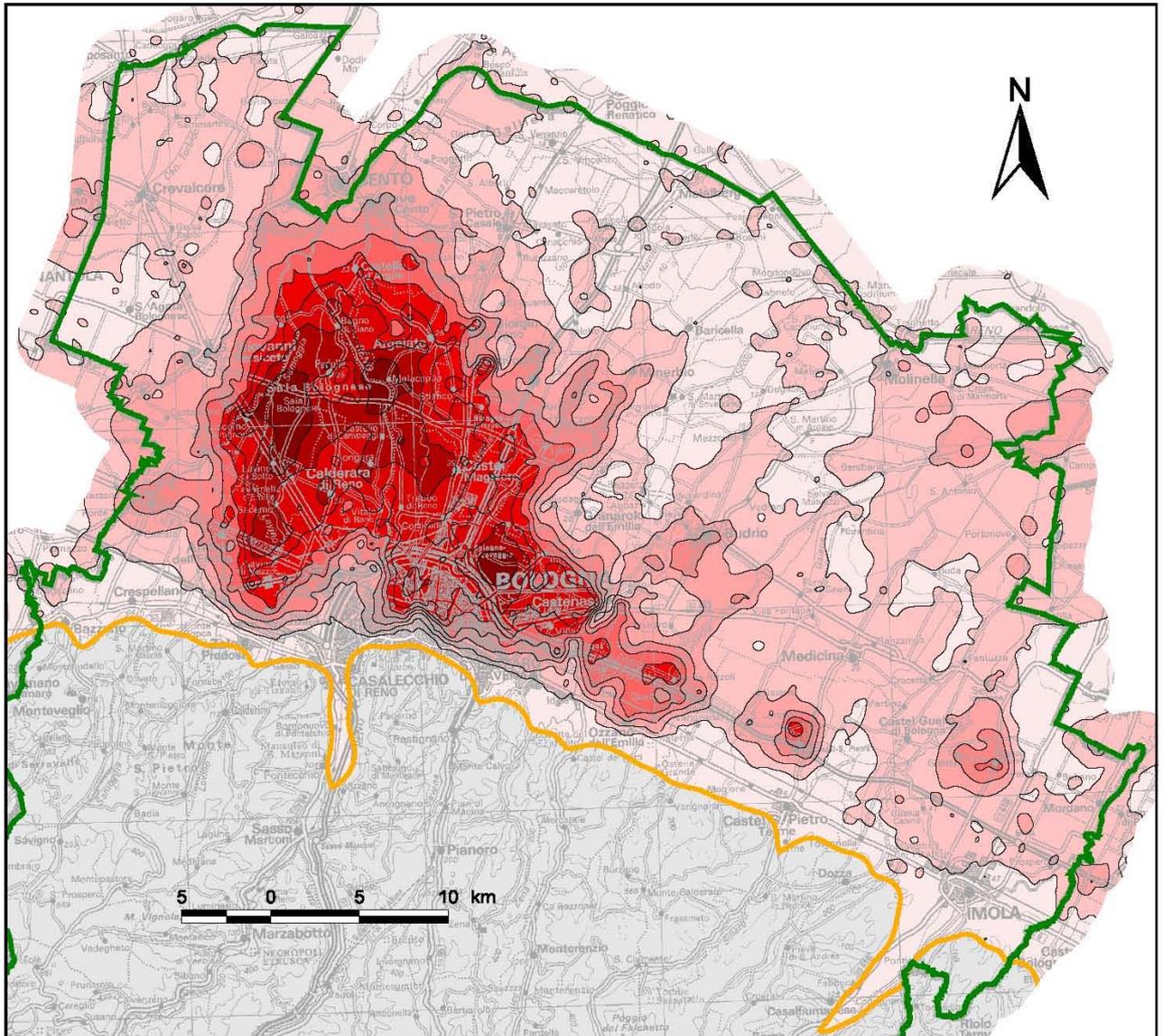
1. Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 1992-2000;
2. Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 1992-2000 - Provincia di Bologna;
3. Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 1992-2000 - Zona Costiera.

Tali carte sono state realizzate in due diversi formati:

1. in formato A4 sono inserite nel presente paragrafo;
2. in formato A0 sono riportate in allegato (Allegati 1, 2 e 3).

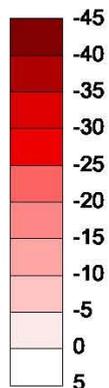


CARTA DELLE VELOCITA' DI MOVIMENTO VERTICALE DEL SUOLO NEL PERIODO 1992 - 2000 - Provincia di Bologna



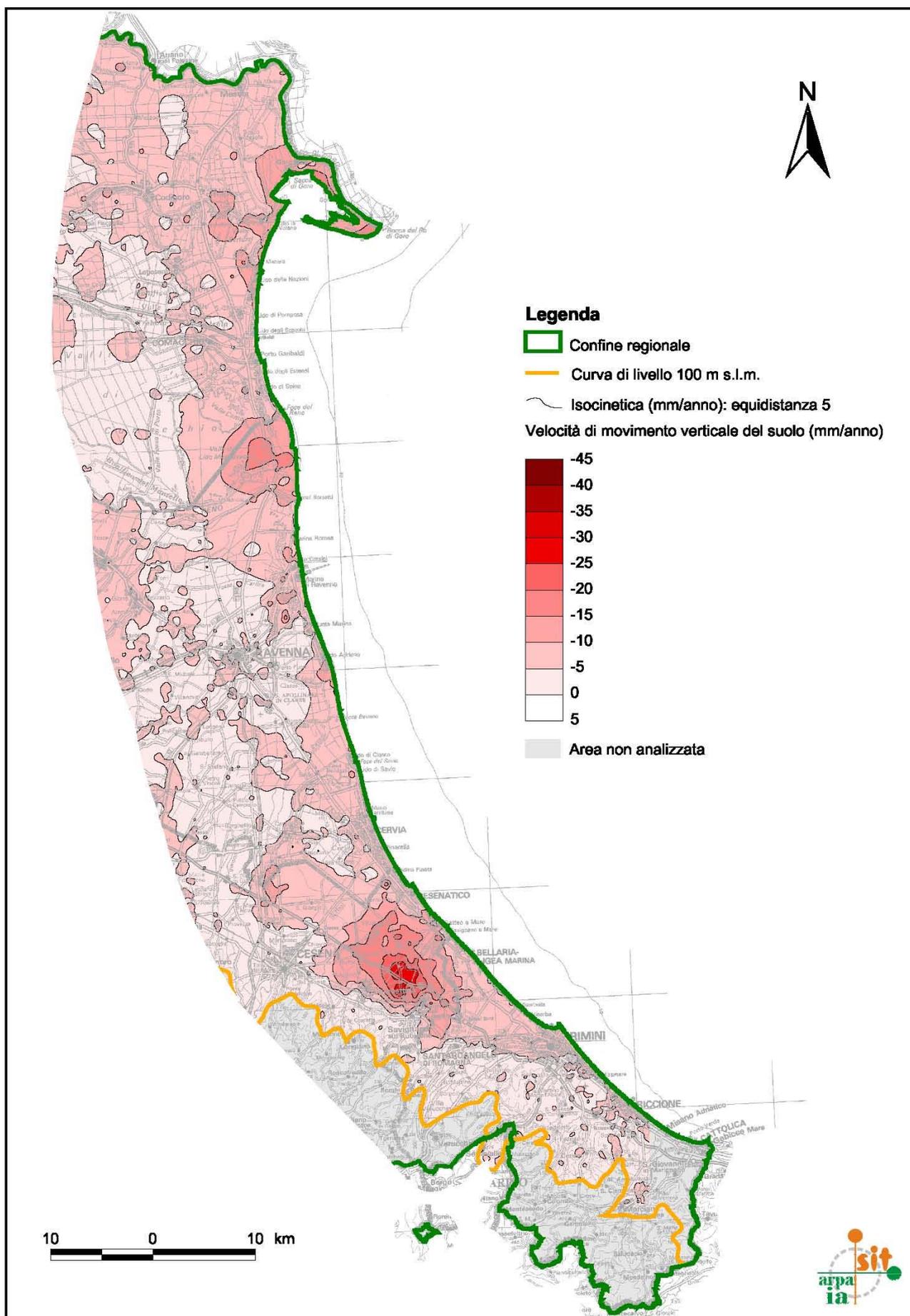
**Legenda**

-  Confine provinciale
  -  Curva di livello 100 m s.l.m.
  -  Isocinetica (mm/anno): equidistanza 5
- Velocità di movimento verticale del suolo (mm/anno)



 Area non analizzata

CARTA DELLE VELOCITA' DI MOVIMENTO VERTICALE DEL SUOLO NEL PERIODO 1992 - 2000 - Zona costiera



Nel periodo 1992-2000, in generale, le aree maggiormente subsidenti interessano soprattutto le province centro-orientali della regione. Nella provincia di Bologna il fenomeno si presenta particolarmente accentuato sia per i valori massimi, oltre 40 mm/anno, sia per l'estensione della superficie interessata. Non meno critica la situazione per quanto riguarda l'area litoranea ove, sebbene il fenomeno presenti valori molto più contenuti, mediamente inferiori a 10 mm/anno, gli effetti sul territorio, come è noto, possono essere particolarmente rilevanti soprattutto, ma non solo, per quanto riguarda il problema dell'erosione costiera, determinato in gran parte dalla perdita di quota del litorale.

Osservando il territorio di pianura a livello provinciale notiamo che nelle province di Piacenza e di Parma i movimenti sono pressoché nulli: anche quando il segno risulta positivo ci si trova, in sostanza, nell'ambito del campo di incertezza delle misure.

Nelle province di Reggio Emilia e di Modena il fenomeno interessa, in particolare, zone dell'alta e media pianura con valori mediamente compresi tra 5 e 10 mm/anno, con una punta di circa 30 mm/anno ad ovest dell'abitato di Correggio. Nei due capoluoghi, in particolare, il fenomeno appare molto ridotto rispetto al passato con valori prossimi allo zero.

Nella provincia di Bologna, come si diceva, si evidenzia, innanzitutto, un'area di depressione molto vasta di oltre 600 km<sup>2</sup>. I confini di tale area, a sud, coincidono, all'incirca, con la via Emilia da ponte Samoggia fino a Ozzano dell'Emilia, a ovest, lambiscono i centri di S. Giovanni in Persiceto e S. Matteo della Decima, a nord arrivano sino a Pieve di Cento e ad est coincidono con i centri di S. Giorgio di Piano, di Minerbio e di Budrio. All'interno di tale area, in particolare, si distinguono 3 zone di massimo sprofondamento in corrispondenza, *grosso modo*, di Sala Bolognese, Bonconvento e Cadriano con oltre 40 mm/anno. Ancora nella provincia di Bologna, al di fuori di tale area, si notano altri due coni di abbassamento significativi in corrispondenza della località Poggio (4 km a nord di Castel S. Pietro) con un massimo di circa 30 mm/anno e Sasso Morelli (5 km ad est di Castel Guelfo) con un massimo di circa 20 mm/anno.

Nella provincia di Ferrara si evidenziano per la gran parte del territorio movimenti sotto i 5 mm/anno. Un incremento di tale valore fino a circa 10 mm/anno si nota avvicinandosi alla zona deltizia; in particolare, lungo il litorale sono presenti velocità di poco superiori.

Nella provincia di Ravenna abbassamenti di una certa consistenza si evidenziano nella zona di Dosso degli Angeli – Foce Reno, oltre 15 mm/anno, Porto Corsini e Foce Fiumi Uniti, oltre 10 mm/anno. Il litorale da Lido di Classe a Cervia presenta abbassamenti intorno a 10 mm/anno. A sud di Cotignola si notano due aree di depressione con massimi rispettivamente di 15 e 25 mm/anno.

Nella provincia di Forlì-Cesena è presente un'ampia area di sprofondamento con massimi di circa 30 mm/anno, localizzata a nord di Savignano sul Rubicone. Approssimandosi al litorale di Cesenatico gli abbassamenti si vanno riducendo intorno a 8 mm/anno.

Nella provincia di Rimini il litorale presenta valori medi intorno a 5 mm/anno con qualche lieve incremento a Rimini.

Nella Tabella 6, per ciascuna provincia, sono riportate le superfici in km<sup>2</sup> relative alle diverse classi di movimento verticale del suolo.

Classi di movimento (mm/anno)	SUPERFICI (km <sup>2</sup> )									
	PC %	PR %	RE %	MO %	BO %	FE %	RA %	FC %	RN %	
da -43 a -40					22 1					
da -40 a -35					66 4					
da -35 a -30			1		103 6					
da -30 a -25			1		82 4		1	5 1		
da -25 a -20			1		76 4		1	9 2		
da -20 a -15			2		107 6	6	17 1	31 5		
da -15 a -10			29 3	32 2	200 11	85 3	117 8	52 9	8 3	
da -10 a -5	2 1	6 1	184 18	342 27	659 36	799 31	788 51	148 25	94 34	
da -5 a 0	104 13	631 68	781 77	901 71	536 29	1728 66	608 40	339 58	172 63	
da 0 a 5	675 86	288 31	18 2	2						

**Tabella 6** - Superfici suddivise per classi di movimento e relative percentuali.

Si può osservare che la provincia di Bologna presenta i ratei in assoluto più elevati, con oltre un terzo del suo territorio di pianura affetto da abbassamenti superiori a 10 mm/anno.

## 5.2 PERIODO 2002-2006

L'analisi dei movimenti verticali del suolo nel periodo 2002-2006 fa riferimento ai dati riportati sulla seguente cartografia:

1. Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2002-2006;
2. Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2002-2006 - Provincia di Bologna;

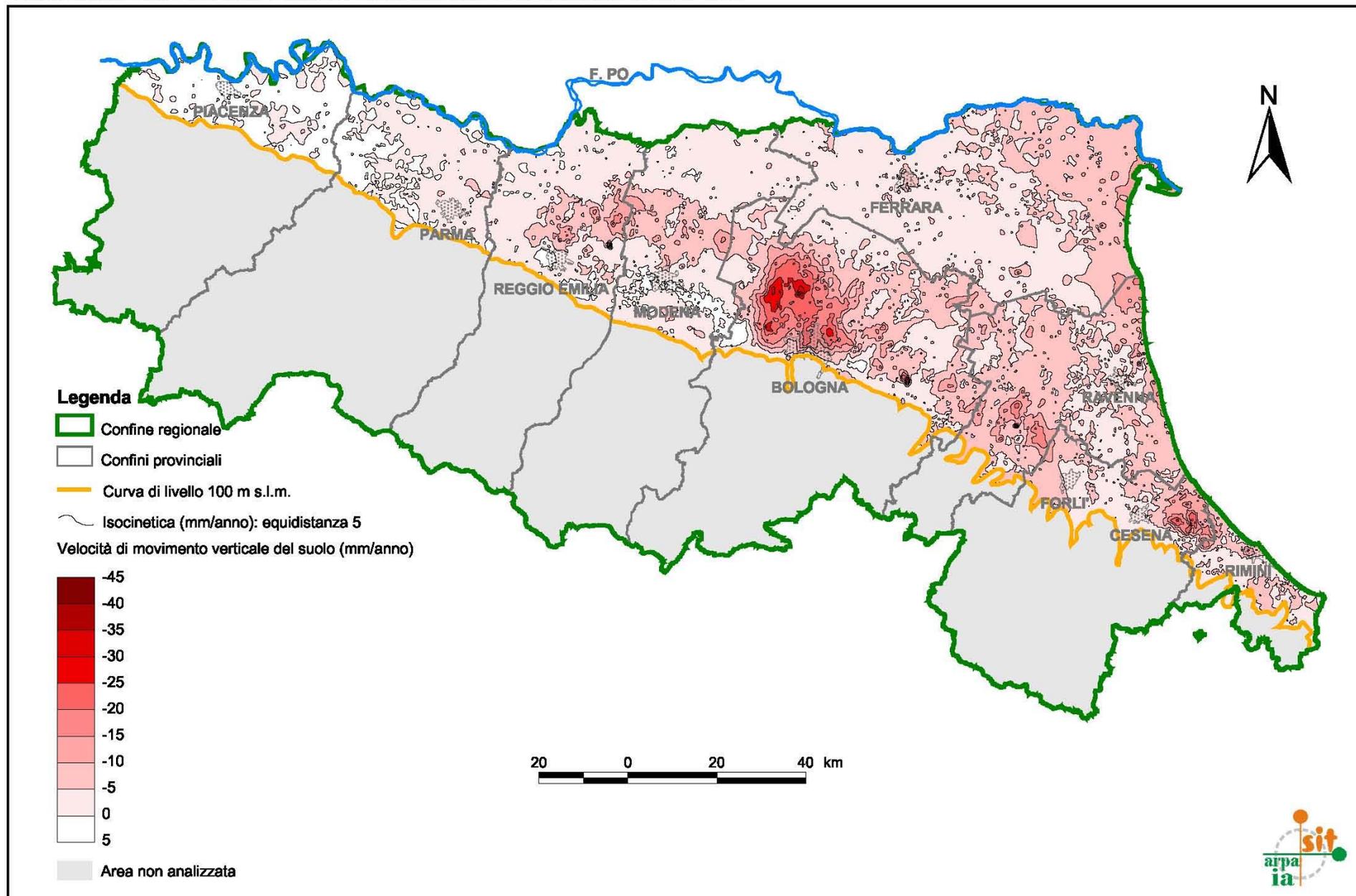
3. Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2002-2006 -  
Zona Costiera.

Tali carte sono state realizzate in due diversi formati:

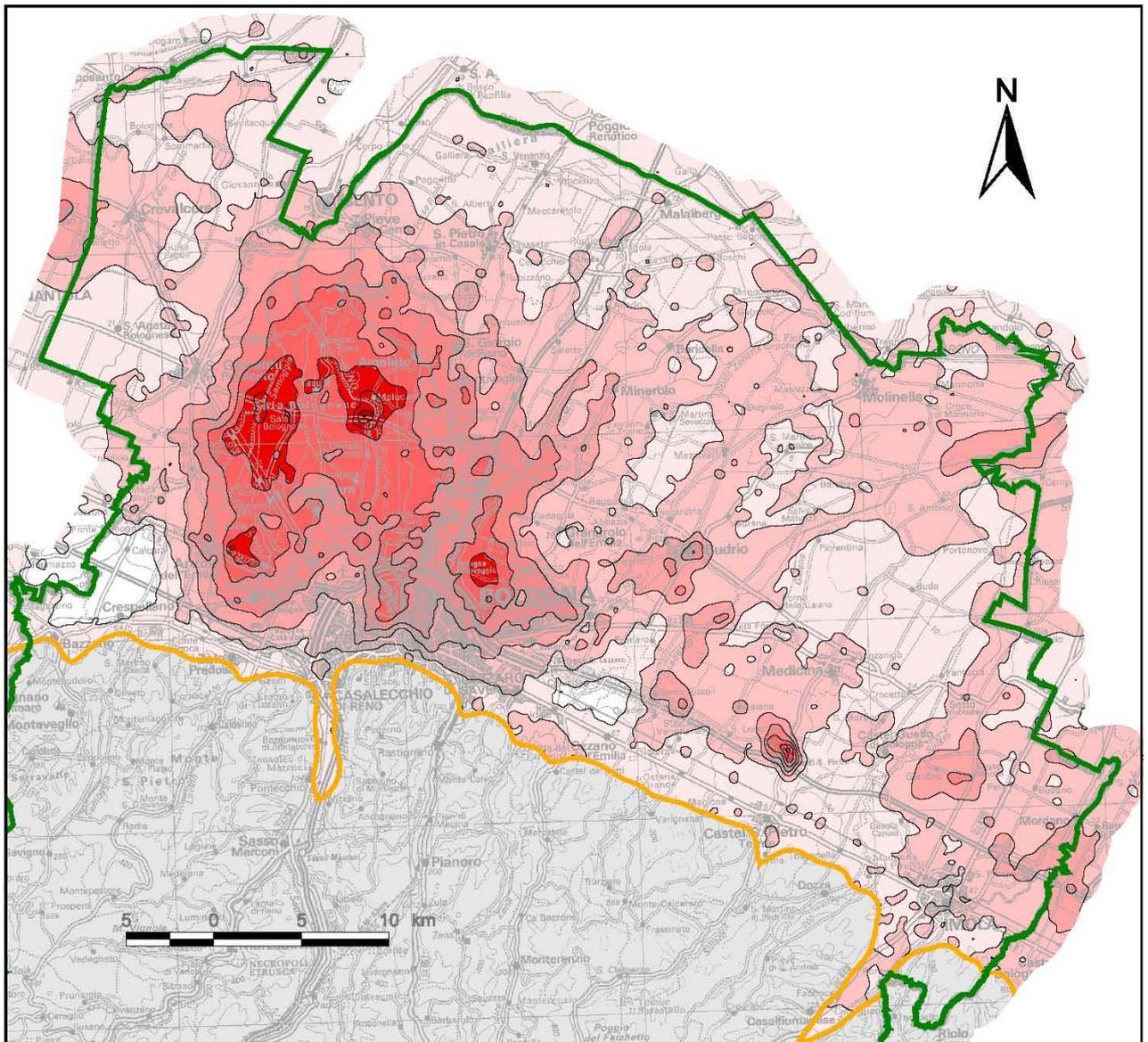
1. in formato A4 sono inserite nel presente paragrafo;
2. in formato A0 sono riportate in allegato (Allegati 4, 5 e 6).

Al fine di visualizzare le variazioni fra le velocità di movimento verticale del suolo dal periodo 1992-2000 al periodo 2002-2006 è stata realizzata una specifica carta in formato A4 inserita alla fine del presente paragrafo.

CARTA DELLE VELOCITA' DI MOVIMENTO VERTICALE DEL SUOLO NEL PERIODO 2002 - 2006



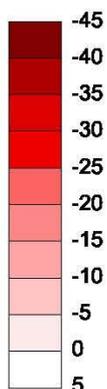
CARTA DELLE VELOCITA' DI MOVIMENTO VERTICALE DEL SUOLO NEL PERIODO 2002 - 2006 - Provincia di Bologna



**Legenda**

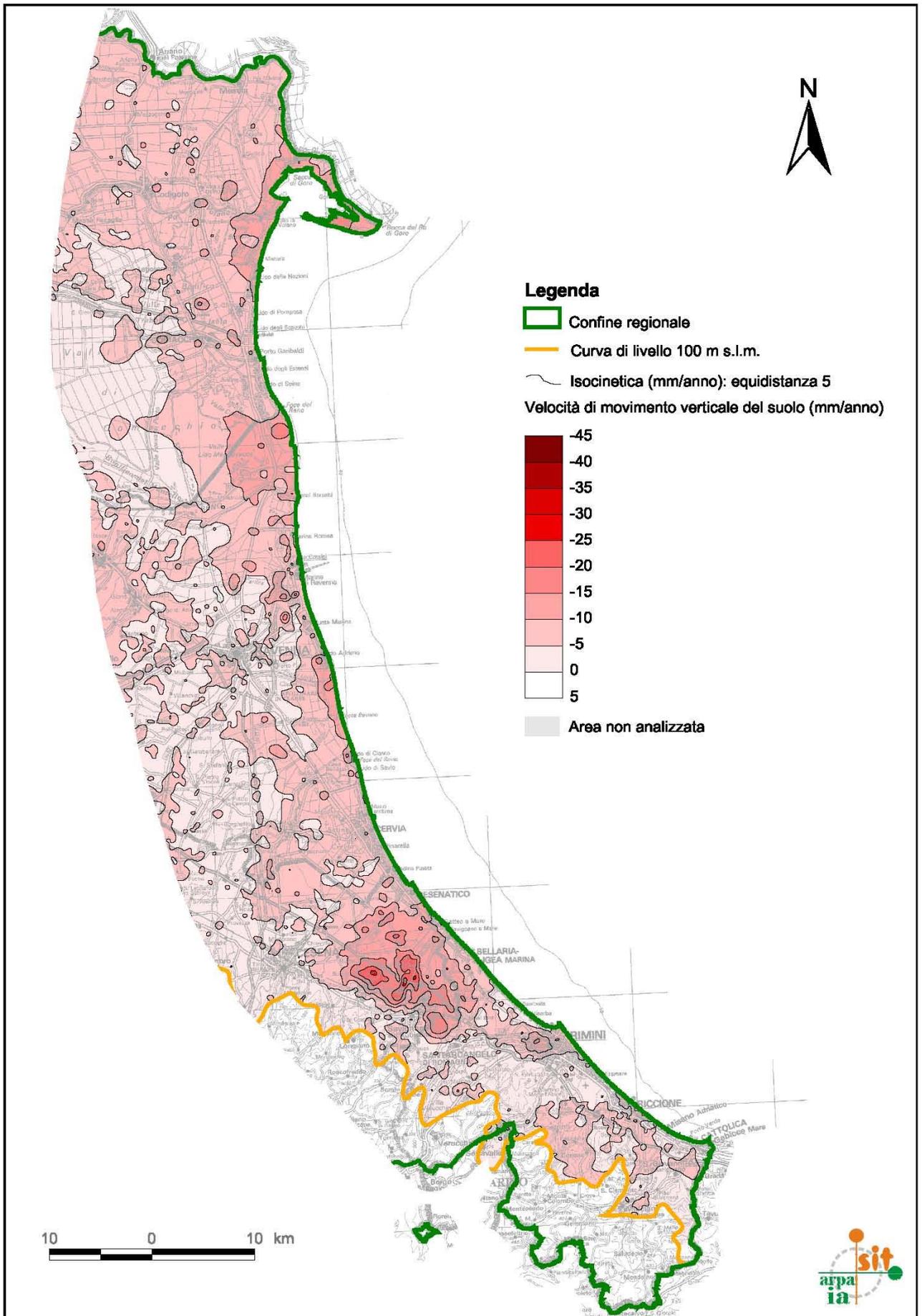
-  Confine provinciale
-  Curva di livello 100 m s.l.m.
-  Isocinetica (mm/anno): equidistanza 5

Velocità di movimento verticale del suolo (mm/anno)



 Area non analizzata

CARTA DELLE VELOCITA' DI MOVIMENTO VERTICALE DEL SUOLO NEL PERIODO 2002 - 2006 - Zona costiera



Nelle province di Piacenza e Parma si conferma la situazione di sostanziale stabilità già presente nel periodo precedente.

Nelle province Reggio Emilia e Modena si nota una riduzione degli abbassamenti nella fascia di alta pianura: i capoluoghi, in particolare, si possono considerare sostanzialmente stabili. Persiste un'ampia area di abbassamenti che interessa all'incirca la fascia della media pianura con valori compresi tra 5 e 10 mm/anno. All'interno di tale fascia si notano altresì alcune zone poco più subsidenti tra Correggio e S. Martino in Rio e nei pressi di Ravarino.

Nella provincia di Bologna si evidenziano abbassamenti generalmente in accentuata riduzione rispetto al periodo precedente. In particolare, tale riduzione risulta evidente in corrispondenza dell'ampia area di circa 600 km<sup>2</sup> già descritta nel paragrafo precedente, con valori ora mediamente compresi tra 15 e 20 mm/anno. All'interno di tale area sono tuttavia ancora presenti alcuni picchi localizzati nei pressi di Sala Bolognese, Anzola dell'Emilia e Cadriano con circa 30 mm/anno e Bonconvento con circa 40 mm/anno. Al di fuori di tale area, un notevole cono di sprofondamento si evidenzia anche a nord dello svincolo autostradale di Castel S. Pietro, in località Poggio, con un massimo di circa 30 mm/anno come nel periodo precedente. Viene confermata anche l'area di abbassamento presso Sasso Morelli (Castel Guelfo) seppure con valori (fino a 15 mm/anno) di poco inferiori ai valori del periodo 1992-2000. Si nota, inoltre, la scomparsa dell'area di sprofondamento localizzata, precedentemente, a nord di Ozzano dell'Emilia.

Nella provincia di Ferrara non si evidenziano variazioni particolarmente significative rispetto al periodo precedente: si confermano per la gran parte del territorio movimenti negativi sotto i 5 mm/anno che vanno aumentando con valori compresi tra 5 e 10 mm/anno avvicinandosi alla zona deltizia. Lungo il litorale si confermano i precedenti abbassamenti di poco superiori rispetto all'entroterra.

Nella provincia di Ravenna, pur non registrandosi variazioni particolarmente significative rispetto al periodo precedente, tuttavia si nota un ampliamento della superficie interessata da abbassamenti compresi tra 5 e 10 mm/anno, superficie che comprende ora anche gran parte della fascia di alta pianura. Permangono alcune zone critiche ubicate tra Faenza e Cotignola in cui si registrano abbassamenti di 15-20 mm/anno, con un massimo di circa 30 mm/anno in corrispondenza dello svincolo autostradale di Faenza. Il litorale ravennate presenta una leggera riduzione della superficie interessata da abbassamenti di 15 mm/anno nella zona storicamente critica di

Dosso degli Angeli – Foce Reno, pur rimanendo, questa, un'area di abbassamenti più marcati rispetto alle aree circostanti. Si sono leggermente accentuati ed estesi gli abbassamenti lungo il litorale da Foce F. Uniti a Foce Bevano, con un massimo di 15 mm/anno in corrispondenza del primo paraggio. La città di Ravenna presenta movimenti molto modesti generalmente inferiori a 5 mm/anno, mentre spostandosi verso nord-est si nota un'area di maggiori abbassamenti, fino a 15 mm/anno, in corrispondenza della zona industriale. Il litorale da Lido di Classe a Cervia si attesta, come nel precedente periodo, tra 5 e 10 mm/anno.

Nella provincia di Forlì-Cesena è ancora presente un'ampia area di sprofondamento, localizzata a nord di Savignano sul Rubicone, con valori generalmente superiori a 10 mm/anno e massimi di oltre 20 mm/anno. Tale area si protende verso nord arrivando a lambire il litorale di Cesenatico. La città di Forlì presenta abbassamenti più modesti compresi tra 0 e 10 mm/anno.

Nella provincia di Rimini si evidenzia un aumento degli abbassamenti rispetto al periodo precedente in corrispondenza della città di Rimini, con valori compresi tra 5 e 10 mm/anno lungo il litorale a sud del molo e valori di poco superiori nell'immediato entroterra. Il litorale da Miramare sino a Cattolica e la fascia litoranea a nord di Rimini presentano invece movimenti generalmente più contenuti.

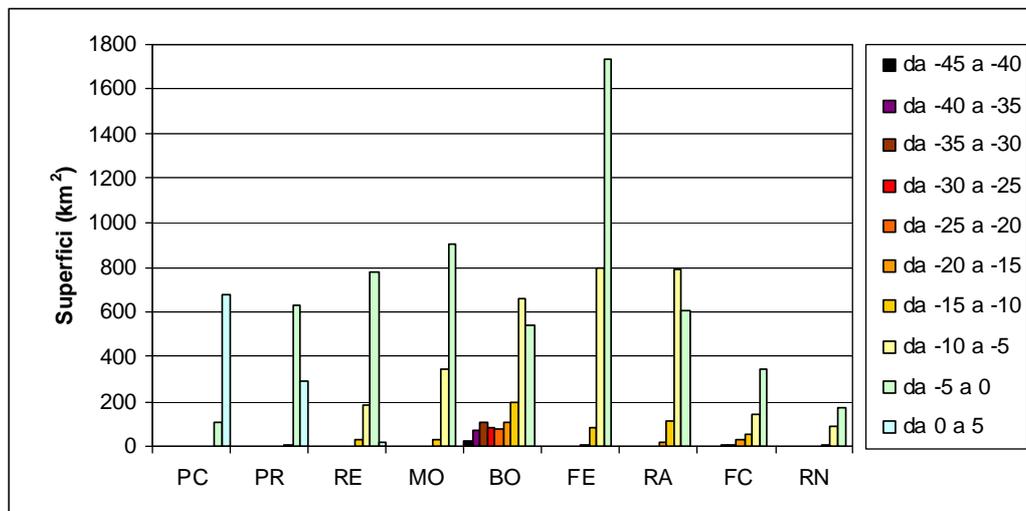
Se si vuole considerare, infine, il litorale nella sua interezza, per una estensione di 5 km nell'entroterra, risulta in entrambi i periodi la stessa velocità media di abbassamento, pari a circa 8 mm/anno.

Nella Tabella 7 sono riportate le superfici in km<sup>2</sup> relative alle diverse classi di velocità di movimento verticale del suolo.

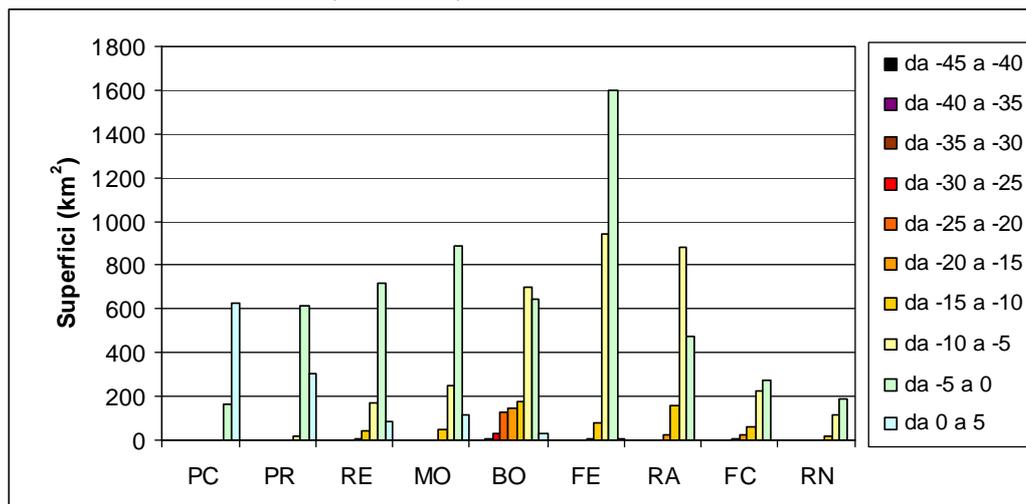
In Fig. 37 e Fig. 38 sono visualizzati tramite istogrammi i contenuti delle Tabelle 6 e 7 al fine di agevolare il confronto fra le diverse superfici suddivise per classi di velocità di movimento verticale del suolo. Risulta evidente soprattutto, nell'ultimo periodo, la riduzione degli abbassamenti che interessano la provincia di Bologna, riduzione evidenziata anche nella figura successiva, in cui si mostrano le variazioni intervenute tra il primo e il secondo periodo: in particolare, le variazioni contenute nell'ambito di  $\pm 5$  mm/anno non vengono evidenziate (bianco), un aumento degli abbassamenti viene evidenziato per fasce di colore rosso, mentre una diminuzione degli abbassamenti per fasce di colore verde.

Classi di movimento (mm/anno)	SUPERFICI (km <sup>2</sup> )																	
	PC	%	PR	%	RE	%	MO	%	BO	%	FE	%	RA	%	FC	%	RN	%
da -45 a -40																		
da -40 a -35																		
da -35 a -30								4										
da -30 a -25								33	2					1				
da -25 a -20					1			124	7			2	8	1				
da -20 a -15					7	1	2	144	8	6		26	2	23	4	3	1	
da -15 a -10					42	4	43	3	178	10	75	3	154	10	63	11	15	5
da -10 a -5	2		18	2	172	17	250	19	695	38	941	36	879	57	223	38	116	36
da -5 a 0	164	21	611	66	716	70	890	68	642	35	1602	61	470	31	267	46	186	58
da 0 a 5	623	79	298	32	85	8	116	9	30	2	6	1	0				1	

**Tabella 7** – Superfici suddivise per classi di movimento e relative percentuali.

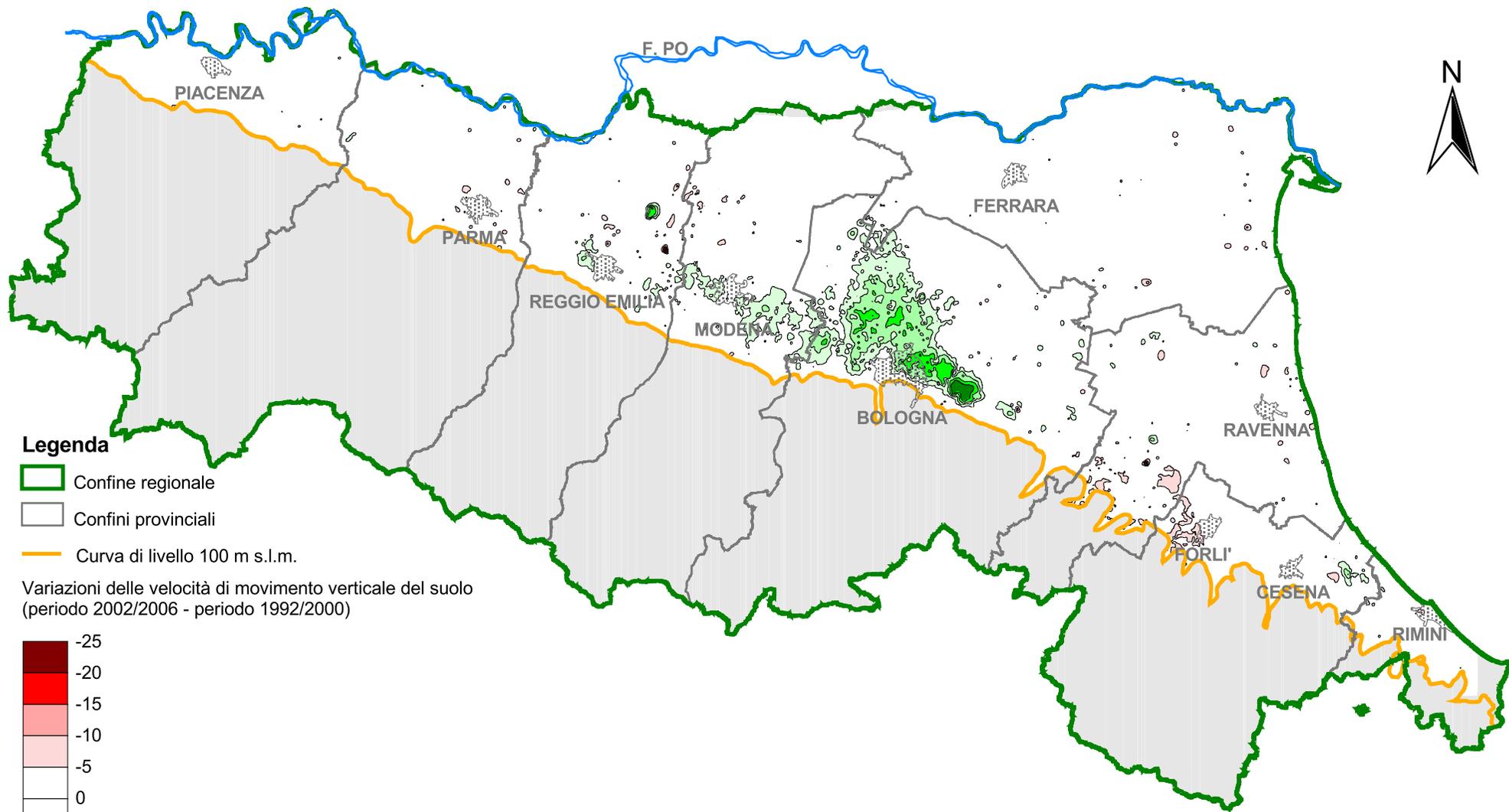


**Fig. 37** - Periodo 1992-2000: Istogrammi delle superfici suddivise per classi di movimento (mm/anno).



**Fig. 38** - Periodo 2002-2006: Istogrammi delle superfici suddivise per classi di movimento (mm/anno).

CARTA DELLE VARIAZIONI DELLE VELOCITA' DI MOVIMENTO VERTICALE DEL SUOLO DAL PERIODO 1992 - 2000 AL PERIODO 2002 - 2006

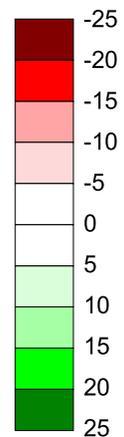


**Legenda**

- Confine regionale
- Confini provinciali

Curva di livello 100 m s.l.m.

Variazioni delle velocità di movimento verticale del suolo  
(periodo 2002/2006 - periodo 1992/2000)



Area non analizzata



## **6. CONCLUSIONI**

Con il presente lavoro è stato realizzato l'obiettivo primario del progetto "Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola", ovvero l'aggiornamento delle conoscenze, da un punto di vista geometrico, relativamente al fenomeno della subsidenza, su un'area d'indagine che comprende l'intera pianura regionale, circa 11.000 km<sup>2</sup>. L'elemento veramente innovativo e qualificante del lavoro risiede nell'utilizzo del metodo satellitare dell'interferometria differenziale, metodo noto da almeno una quindicina di anni che, però, solo dopo l'avvento della Tecnica PSInSAR<sup>TM</sup>, nel 2000, ha mostrato tutte le sue reali potenzialità, in particolare per la valutazione dei movimenti verticali del suolo utilizzando un grande numero di bersagli radar a terra.. Come è noto, la misura di tali movimenti, specie se piccoli, è stata sempre appannaggio di operazioni topografiche quali le livellazioni geometriche di alta precisione le quali, pur fornendo ottimi risultati per quanto concerne la qualità delle misure, non possono fornire un'informazione così capillare e diffusa sul territorio quale quella offerta dal metodo satellitare. Naturalmente un metodo non esclude l'altro, bensì entrambi vanno utilizzati in completa integrazione, così come si è proceduto nel presente lavoro.

Nel 2005 è stata realizzata la misura di una rete di livellazione - sottoinsieme della rete regionale - di circa 1000 km di sviluppo, al fine di operare un confronto con le misure del 1999 e determinare i movimenti del suolo in tale periodo relativamente a circa un migliaio di capisaldi. Questa campagna, oltre a fornire immediatamente una prima visione a grandi linee del fenomeno, è servita soprattutto per operare tutte quelle verifiche indispensabili ai fini di un concreto utilizzo del metodo satellitare.

Nel 2006-07 è stata realizzata l'analisi interferometrica e sono state compiute le operazioni necessarie per la validazione e la messa a punto dei dati radar ottenuti. Lo studio approfondito che ne è scaturito ha dimostrato, innanzitutto, come la tecnica dei diffusori permanenti radar possa essere proficuamente utilizzata per questo tipo di analisi territoriali. Sono tuttavia emersi anche alcuni problemi che questa tecnica pone - soprattutto per indagini a scala così ampia - come la necessità di elaborazioni congiunte di un gran numero di immagini appartenenti a molte tracks differenti oppure la necessità tecnica di operare separatamente per siti e successivamente mosaicare i risultati. Quest'ultima procedura darebbe probabilmente risultati migliori se per ogni sito si

potesse disporre sia di un punto di riferimento di cui fosse noto, da misure di altro tipo, il movimento in atto, sia di altri capisaldi da usare come punti di controllo. A tal fine è risultato di grande utilità il supporto delle misure di livellazione effettuate nel 2005. In alternativa a tali misure, potrebbe essere utile realizzare una rete di stazioni GPS permanenti, progettata per lo studio delle deformazioni - anche se è pur vero che le serie temporali generate con quest'ultima tecnica assumono una significatività solo dopo alcuni anni di osservazioni.

La livellazione geometrica, dunque, si rivela ancora come un riferimento imprescindibile per un corretto utilizzo del dato interferometrico.

I risultati ottenuti, per la prima volta, forniscono un quadro sinottico di dettaglio del fenomeno della subsidenza a scala regionale in un arco temporale molto ampio. Sono risultati che vanno letti non dimenticando il grado di incertezza associato alle velocità calcolate, ma che possono indubbiamente costituire uno strumento utile anche per successive analisi focalizzate su porzioni di territorio più limitate.

Dall'osservazione dei risultati ottenuti si evidenzia, nel periodo più recente (2002-2006), un'assenza del fenomeno nelle province di Piacenza e Parma, un miglioramento per le province di Reggio Emilia e Modena, soprattutto per quanto riguarda i capoluoghi ora in buona parte esenti da movimenti significativi, mentre le aree di media pianura di tali province continuano ad essere interessate da abbassamenti medi intorno ad 10 mm/anno. Valori decisamente superiori caratterizzano una vasta area della provincia di Bologna con abbassamenti medi intorno a 20 mm/anno, sebbene si registri, in generale, un notevole miglioramento rispetto agli anni '90. Altre criticità si notano nell'area tra Faenza e Cotignola e a nord di Savignano sul Rubicone con valori compresi tra 10 e 20 mm/anno. Il territorio ferrarese presenta, in generale movimenti molto piccoli con una progressiva accentuazione approssimandosi all'area deltizia con valori tra 5 e 10 mm/anno. Per il litorale non sembrano esserci invece variazioni significative: a fronte di qualche leggero miglioramento locale si evidenzia anche qualche peggioramento per cui, in sostanza, questo delicato paraggio continua a perdere mediamente poco meno di 1 cm di quota all'anno.



## 7. APPENDICE -APPROFONDIMENTI TECNICI

### Sistemi di telerilevamento radar satellitari

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

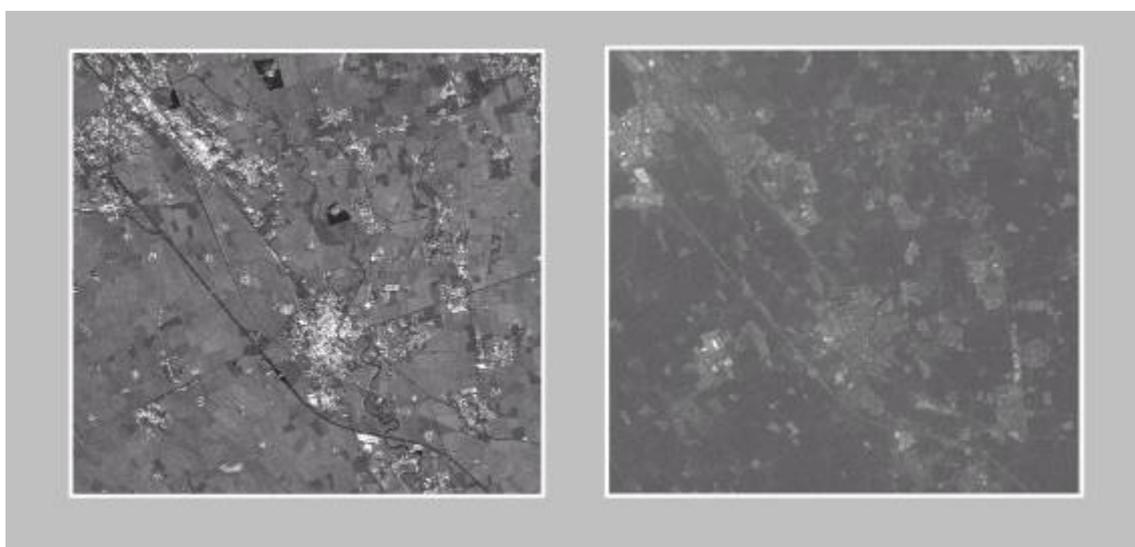
Il principio di funzionamento dei sistemi **RADAR** (acronimo di **radio detecting and ranging**) è il seguente: un apparecchio trasmittente illumina lo spazio circostante con un'onda elettromagnetica che incidendo sulla superficie terrestre (ed eventuali oggetti) subisce un fenomeno di riflessione disordinata (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 (*detecting*) 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, 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.

L'idea alla base del **SAR** (**S**ynthetic **A**perture **R**adar - Radar ad Apertura Sintetica) consente di risolvere il compromesso risoluzione–estensione dell'area osservata. Combinando coerentemente (cioè tenendo conto di ampiezza e fase del segnale SAR, concetti il cui significato fisico si introdurrà in seguito) i dati acquisiti dal sensore in posizioni successive, si sintetizza un'antenna fittizia di grandi dimensioni detta, appunto, ad apertura sintetica. È proprio questo procedimento a garantire un'elevata risoluzione anche nella direzione di azimuth.

Poiché il sistema illumina lo spazio circostante con radiazioni elettromagnetiche proprie è detto sistema *attivo*: non è richiesta infatti illuminazione solare e le frequenze utilizzate dal radar penetrano attraverso le nuvole, evitando così problemi di acquisizione dei sistemi ottici.

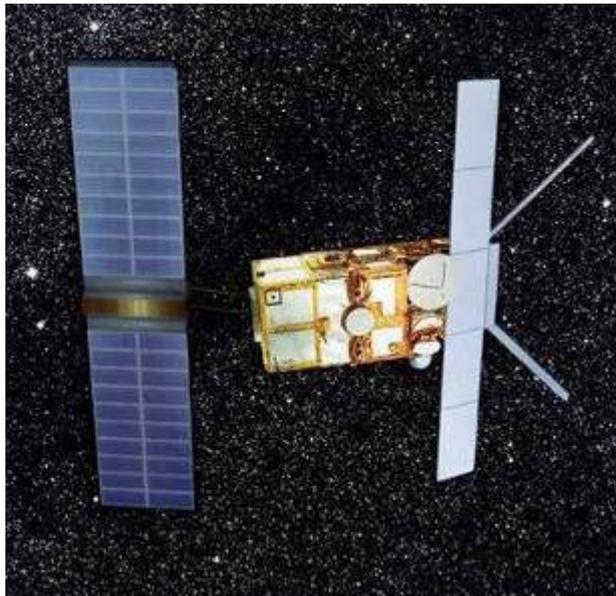
In Fig 1 è illustrato il confronto tra un'acquisizione di tipo ottico e una radar, ottenuta dai satelliti ERS dell'Agencia Spaziale Europea (ESA), della stessa area. Le informazioni geografiche di carattere generale sono le stesse, tuttavia nell'immagine radar si può notare come le strutture al suolo rispondano in modo differente alle onde elettromagnetiche emesse: le strade appaiono nere poiché riflettono specularmente il campo trasmesso, mentre strutture metalliche sono particolarmente luminose (al centro dell'immagine).



**Fig. 1-** Confronto tra acquisizione ottica (destra) e acquisizione radar (sinistra) di tipo SAR (ERS).

### **I satelliti ERS dell'Agencia Spaziale Europea (ESA)**

Nel maggio 1991 l'**Agencia Spaziale Europea (ESA)** lanciò il primo SAR europeo a bordo del satellite **ERS-1** seguito nel 1995 dal gemello **ERS-2** (figura 2) posto sulla sua stessa orbita ma con un ritardo di un giorno.



**Fig. 2** - Immagine del satellite ERS-2.

I satelliti ERS seguono orbite eliosincrone lievemente inclinate rispetto ai meridiani, illuminando, da una quota attorno a 780 Km, una striscia di terreno (*swath*) larga circa 100 km con un sistema radar SAR operante nel dominio delle microonde alla frequenza di 5.3 GHz, ovvero con una lunghezza d'onda  $\lambda$  pari a 5.66 cm, caratteristica fondamentale per poter apprezzare movimenti millimetrici.

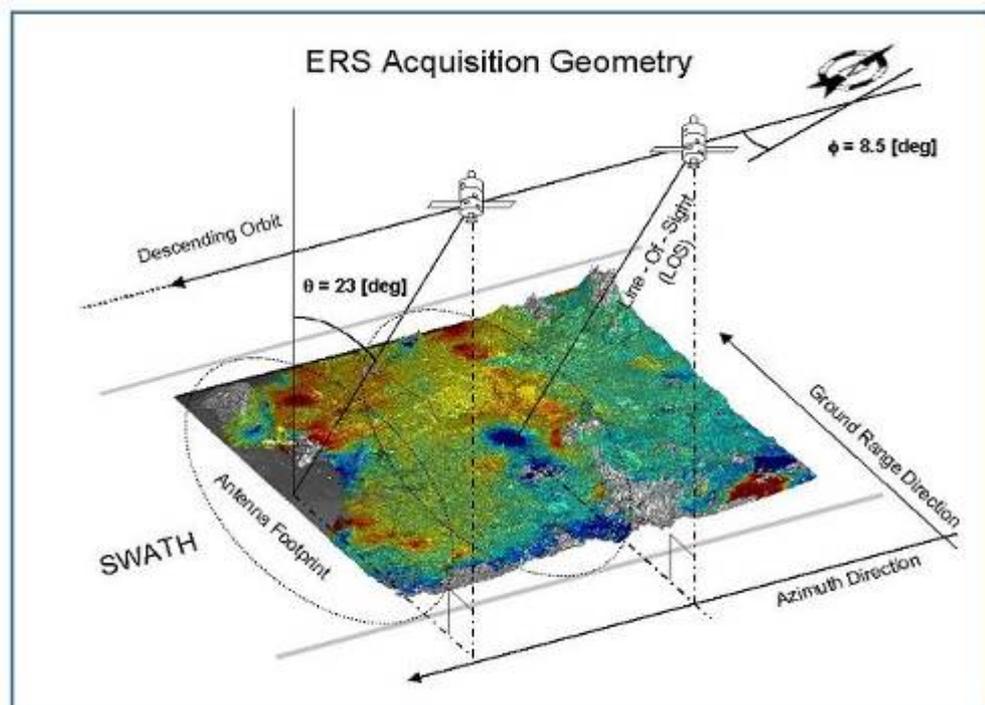
La stessa orbita nominale viene ripercorsa ogni 35 giorni (*revisiting time*), consentendo così di acquisire dati relativi alla stessa scena al suolo in tempi differenti.

Grazie alla scelta di ESA di acquisire continuamente i dati a partire dal 1992, per vaste aree del pianeta, sono oggi disponibili i dataset dell'ultimo decennio composti da un'immagine radar ogni 35 giorni. Questi costituiscono un'informazione storica di enorme rilevanza permettendo di studiare l'evoluzione della fase per ciascuna acquisizione e ricostruire la storia delle deformazioni.

La direzione parallela all'orbita è detta *azimuth* e coincide approssimativamente con la direzione Nord-Sud. La risoluzione (ovvero la capacità di riconoscere come distinti due bersagli) in azimuth vale circa 5 m.

La direzione della congiungente sensore-bersaglio (perpendicolare all'orbita ed inclinata di un angolo  $\theta$  - detto *off-nadir* - rispetto alla verticale pari mediamente a  $23^\circ$ ) è detta *slant range* (o più semplicemente *range*) oppure *Line Of Sight* (LOS). La risoluzione in *range* vale circa 8 m.

Le immagini radar si sviluppano pertanto lungo le direzioni di *range* e *azimuth*, dette usualmente coordinate SAR. In figura 3 è rappresentata schematicamente la geometria di acquisizione dei sistemi SAR-ERS.



**Fig. 3** - Geometria d'acquisizione SAR delle piattaforme ERS-1 ed ERS-2.

## **Le immagini radar**

Le immagini radar sono matrici di numeri complessi definiti dalle grandezze di ampiezza e fase.

L'**ampiezza** individua la quantità di campo elettromagnetico retrodiffusa verso il satellite, mentre la **fase** dipende da diversi fattori, tra cui la distanza sensore-bersaglio. Proprio la fase costituisce l'informazione chiave per le applicazioni interferometriche volte all'identificazione di aree soggette a fenomeni di movimento superficiale.

In fase di acquisizione ogni bersaglio a terra è colpito da più impulsi elettromagnetici emessi dal sensore lungo la sua orbita. ESA fornisce, su un opportuno supporto (CD), l'eco degli impulsi radar così come sono stati ricevuti dal satellite. Si parla, in questo caso, di dati grezzi (*raw data*).

Le immagini radar propriamente dette nascono solo a valle di un algoritmo di **focalizzazione**, che permette di associare alle varie celle di risoluzione (pixel) il relativo contributo di energia retrodiffusa: ad ogni elemento della matrice corrisponde una zona a terra di 20 per 4 metri circa (su terreno piano). Ogni supporto contiene una quantità di dati relativa ad un'area di 100 x 100 Km (10000 km<sup>2</sup>).

Durante i vari passaggi lungo la stessa orbita i satelliti si discostano leggermente dalla traiettoria nominale, di fatto vi 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 di angoli  $\theta$  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.

## **Deformazioni prospettiche**

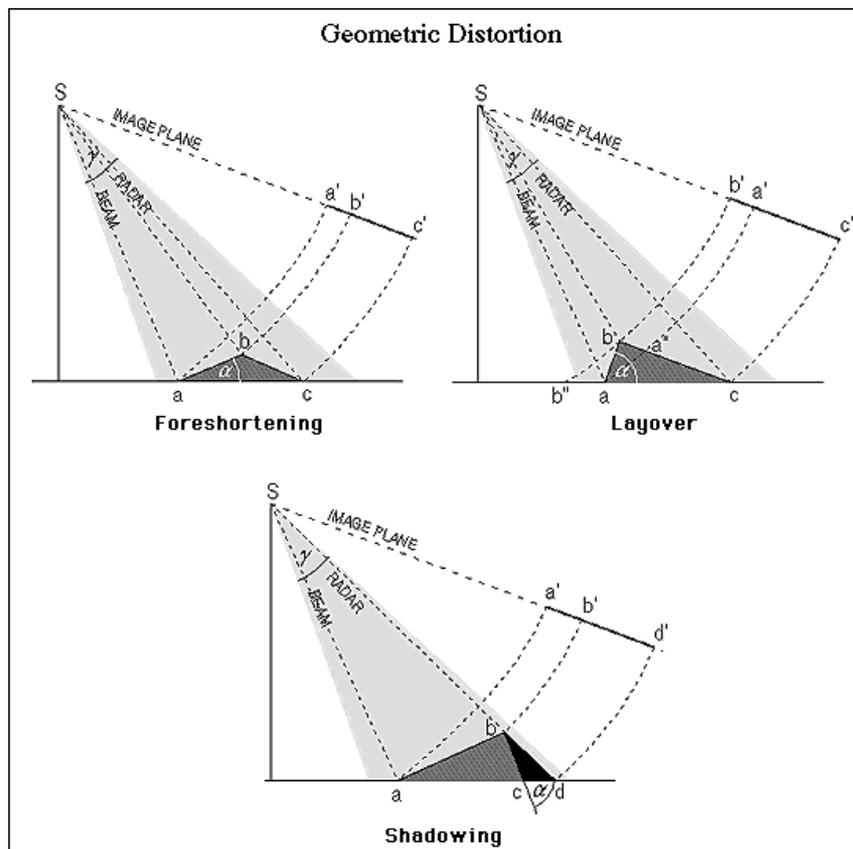
La modalità di acquisizione del satellite, non perpendicolare al suolo ma secondo un angolo di vista  $\theta$ , da origine nelle immagini focalizzate a delle deformazioni prospettiche causate dalla topografia del terreno. In base alla pendenza del terreno si dividono in:

*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.

*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.

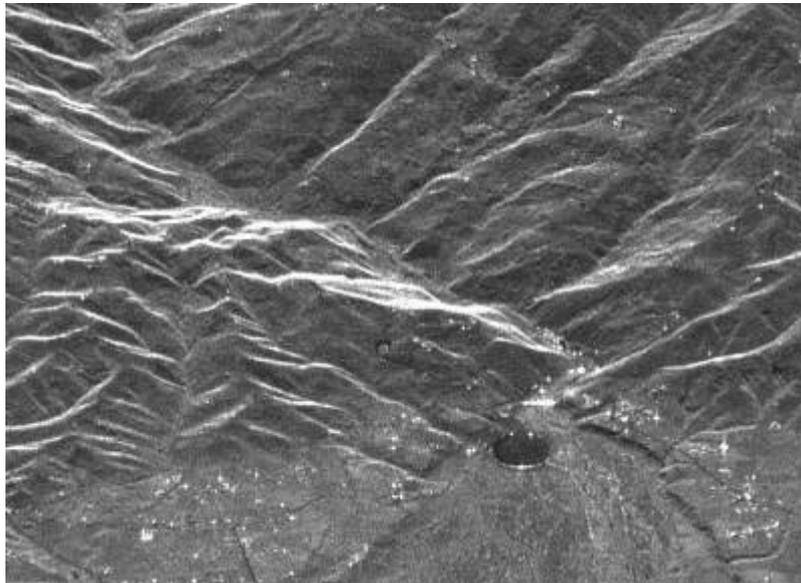
*shadowing*: si verifica quando alcune zone non possono essere illuminate dall'impulso radar perché schermate da altri oggetti; si producono quindi nell'immagine di ampiezza aree molto scure (in ombra).

In figura 4 sono riportate le geometrie dei diversi fenomeni.



**Fig. 4** - Deformazioni prospettiche: foreshortening, layover, shadowing

In figura 5 è rappresentata la mappa di riflettività multi-immagine (composta da più immagini focalizzate) di un'area montuosa, in cui si evidenzia molto bene la presenza di fenomeni di *foreshortening* (linee bianche) per i versanti orientati verso il satellite.



**Fig.5** - Fenomeni di deformazione prospettica in immagini focalizzate SAR. Al centro della figura, versanti in *foreshortening* (linee bianche).

### **Interferometria radar differenziale (DInSAR)**

La tecnica tradizionale per lo studio di dati SAR è l'**interferometria differenziale (DInSAR)**, che si basa sull'analisi dell'evoluzione 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.

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 luminose le strutture metalliche (tralicci, antenne, linee ferroviarie), mentre bacini d'acqua e strade sono solitamente poco luminosi: 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,  $\frac{4\pi}{\lambda} r$  viene indicato con il termine di *propagatore* in cui  $r$  è la distanza sensore-bersaglio, infine  $n$  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 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 intercorso 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** che sono causati dalla variazione delle proprietà elettromagnetiche (riflettività) dei bersagli radar nel tempo: in questo caso l'ipotesi che il contributo  $\psi$  si elida generando l'interferogramma non è più verificata. Questi fenomeni risultano più marcati al crescere dell'intervallo di tempo tra le due acquisizioni utilizzate, definito *baseline temporale*.

Le zone coperte da vegetazione, facilmente influenzabili dal vento e di diverso aspetto a seconda della stagione, sono 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).

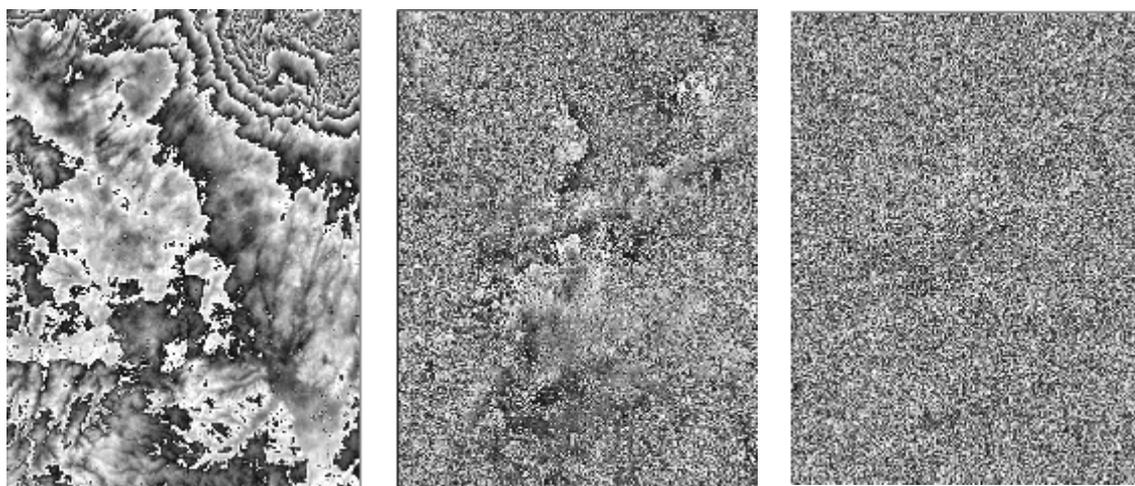
La qualità dell'interferogramma dipende anche dalla distanza tra le due orbite effettivamente percorse dal sensore durante l'acquisizione delle due immagini (detta *baseline normale* o geometrico). Si può dimostrare che maggiore è il valore assoluto del *baseline*, minore è la banda comune tra i due segnali e quindi minore è il rapporto segnale-rumore relativo all'interferogramma da esse generato. Questo disturbo è denominato: **decorrelazione geometrica**.

In figura 6 è mostrato un esempio riassuntivo.

L'interferogramma a) è stato ottenuto utilizzando due acquisizioni a distanza di 1 giorno e con differenza nell'orbita nominale, pari a 123 m. Visto il limitato intervallo di tempo 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 ben visibili corrispondono a variazioni di fase, e quindi alla variazione della distanza sensore-bersaglio, pari ad un ciclo. Di fatto costituite solamente dalla componente topografica della zona campione.

Si può osservare nell'interferogramma b) come, aumentando l'intervallo temporale, pari ora a 1984 giorni, ma mantenendo quasi inalterata la componente di *baseline normale* (149 m), subentrino sensibili disturbi dovuti a decorrelazione temporale e viene a mancare la coerenza presente nel caso a).

Nell'interferogramma c) i valori di *baseline temporale* e *normale* sono entrambi elevati: l'immagine appare del tutto rumorosa e si perde completamente coerenza.



a)  $B_n = 123$  [m],  $B_t = 1$  [gg]

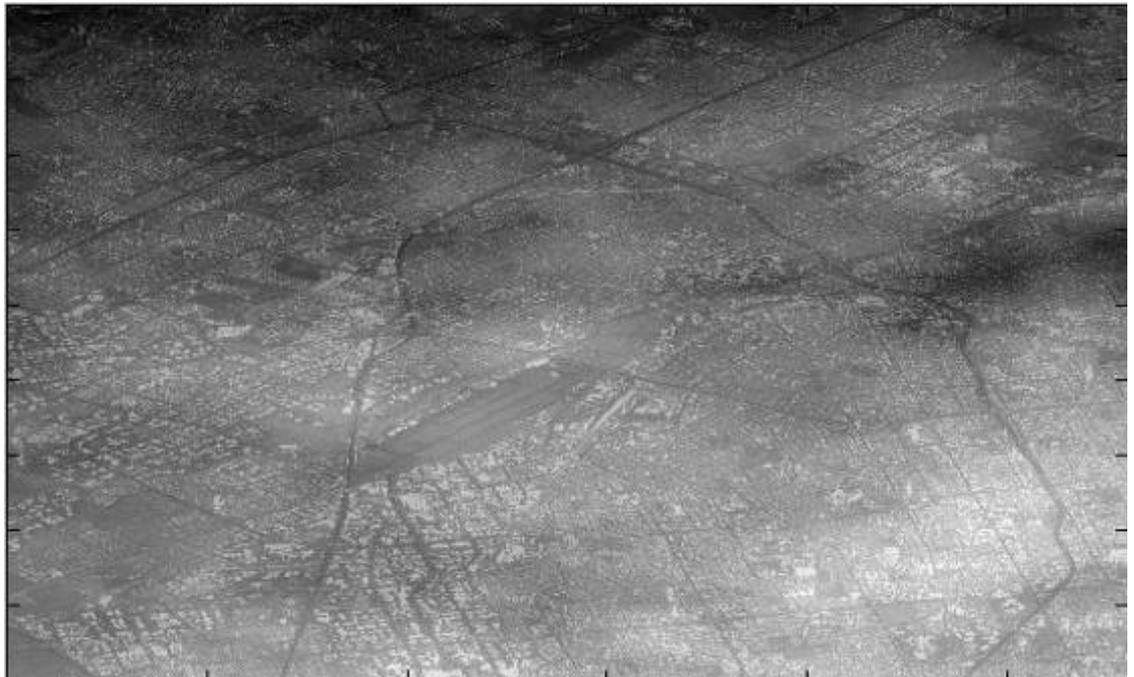
b)  $B_n = -149$  [m],  $B_t = 1984$  [gg]

c)  $B_n = -712$  [m],  $B_t = 1774$  [gg]

**Fig. 6** - Interferogrammi e disturbi dovuti a decorrelazione temporale e geometrica.

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 a eventuali fenomeni di movimento (figura 7).

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; tuttavia non è possibile, in generale, effettuare stime puntuali, ma solo analisi d'insieme per identificare fenomeni macroscopici in essere (estensione  $> 0.2 \text{ km}^2$ ).



**Fig. 7** - Componente atmosferica di fase sovrapposta all'immagine di ampiezza.

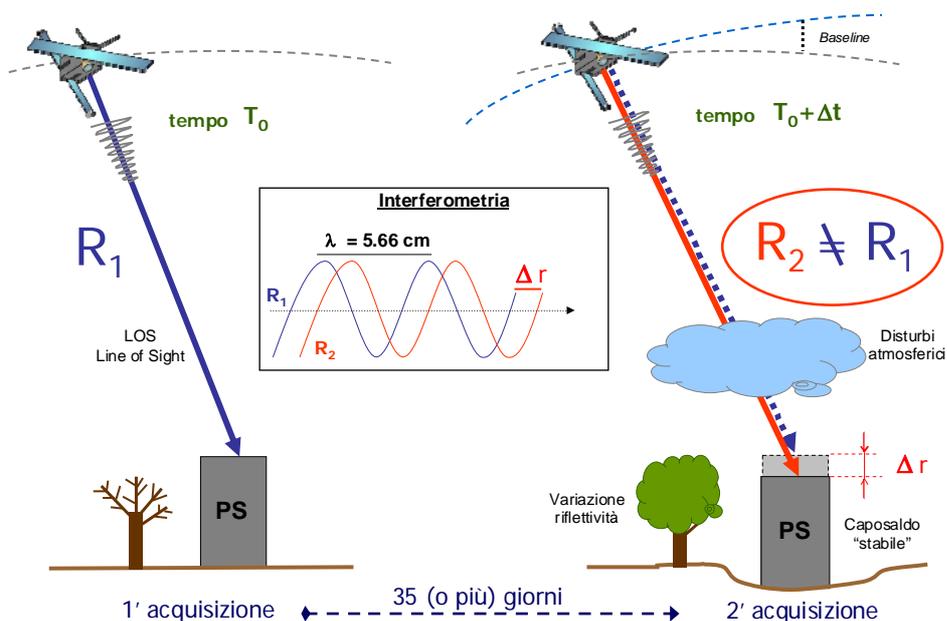
### **La Tecnica PS (Permanent Scatterers Technique –PSInSAR™- )**

La Tecnica PS (Permanent Scatterers Technique -PSInSAR™) è stata sviluppata e brevettata presso il Politecnico di Milano e concessa in licenza esclusiva a T.R.E. nel 2000.

L'approccio PS è basato sull'osservazione che un piccolo sottoinsieme di bersagli radar, costituito appunto dai diffusori permanenti (Permanent Scatterers, PS), 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, preservano quindi l'informazione di fase nel tempo. I diffusori permanenti (PS) 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, cosa che non accade ad esempio per la vegetazione che muta di continuo.

La figura 8 mostra una schematica rappresentazione della base teorica della tecnica interferometrica, di un Permanent Scatterers e dei disturbi presenti nelle acquisizioni SAR (variazione della componente di riflettività che da luogo a decorrelazione temporale, variazioni del *baseline normale* che da luogo a decorrelazione geometrica, disturbi atmosferici).



**Fig. 8** - Rappresentazione schematica della base teorica della tecnica interferometrica, di un Permanent Scatterers e dei disturbi presenti nelle acquisizioni SAR.

L'elaborazione prende origine da uno studio statistico delle immagini, che porta alla selezione dell'insieme dei PS (*Permanent Scatterers*) o diffusori permanenti, sostanzialmente immuni ai fenomeni di decorrelazione. Questa proprietà dei PS consente di superare gran parte delle limitazioni legate all'analisi DInSAR convenzionale.

Per i PS infatti, 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. Ciò è reso possibile da un insieme di algoritmi di elaborazione numerica dei segnali frutto di oltre dieci anni di studi sviluppati dal gruppo SAR del Politecnico di Milano. Dopo aver rimosso il disturbo atmosferico dai dati si è in

grado di stimare accuratamente i movimenti dei PS utilizzando il SAR come un vero e proprio strumento di misura delle deformazioni del terreno.

Il cuore del brevetto della Tecnica PS risiede nella capacità di stimare correttamente e compensare il disturbo atmosferico che limita le applicazioni interferometriche, svolgendo un'analisi dettagliata solo sul sottoinsieme di PS accuratamente selezionati secondo valutazioni statistiche. Stimato il contributo atmosferico è possibile individuare tutte le componenti che costituiscono la fase interferometrica, eliminare i termini spuri e 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 nell'arco temporale tra il primo e l'ultimo dato disponibile.

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

In corrispondenza di ciascun PS si effettua una misura di deformazione per ogni acquisizione disponibile, con precisione 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 precisione compresa tra 0.1 e 1 mm/anno. La precisione è funzione del numero di immagini e della "qualità" del PS stesso, cioè di quanto l'informazione di fase disponibile presso il PS è immune ai fenomeni di disturbo.

Tutte le misure sono rilevate lungo la congiungente sensore-bersaglio (*LOS, Line of Sight*), e sono di tipo differenziale, ottenute dopo avere determinato uno o più punti di riferimento a terra di coordinate note e supposti fermi o espressamente indicati ad esempio da misure GPS o di livellazione ottica.

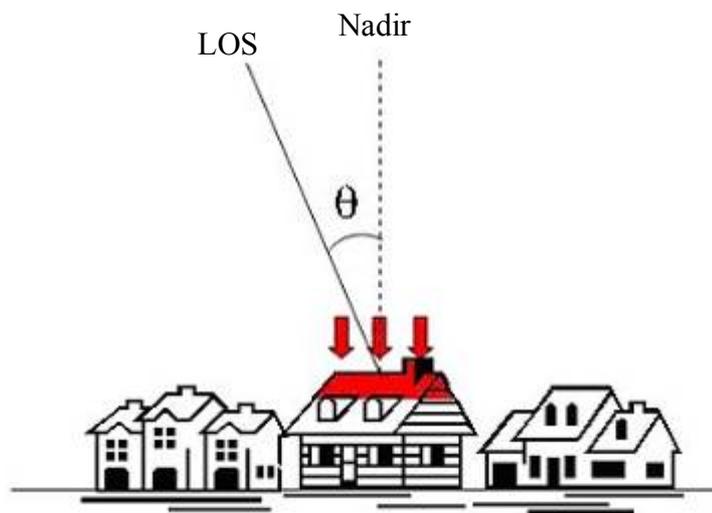
### **Velocità dei PS**

In questo paragrafo vengono descritte varie specifiche inerenti alla misura della velocità dei Permanent Scatterers.

#### *Direzione e verso delle velocità dei PS*

Le velocità di spostamento rilevate con tecnica PSInSAR™ non sono da intendersi come spostamenti puramente verticali, bensì come variazioni di distanza tra sensore e bersaglio lungo la direzione di puntamento dell'antenna (*LOS, line of sight*). Tale direzione risulta avere un'inclinazione rispetto alla verticale di circa 23 gradi per i sensori ERS ed ENVISAT, mentre può raggiungere valori di circa 45 gradi nel caso del

senso RADARSAT che consente acquisizioni in diverse modalità di puntamento d'antenna. In Fig. 9 è rappresentata la direzione di incidenza del segnale radar rispetto alla verticale.



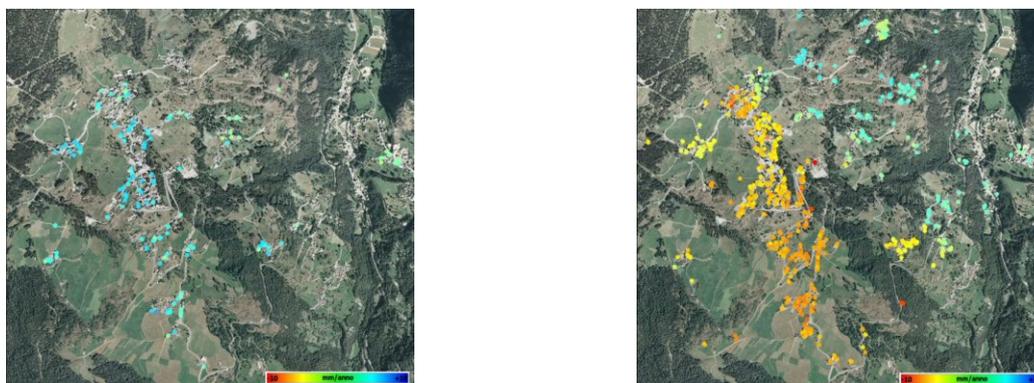
**Fig. 9** - Geometria di acquisizione, angolo di incidenza rispetto all'Nadir.

In particolare, si può affermare che i sistemi SAR sono in grado di rilevare la sola componente di movimento presente lungo la LOS introducendo così una sottostima del moto che risulta tanto peggiore quanto più la direzione reale del moto si discosta dalla linea di vista del satellite. Nel caso limite di moto perpendicolare alla direzione di LOS, il sistema rileverà uno spostamento nullo.

Sempre a causa della geometria di acquisizione del sistema in uso si sottolinea che, essendo le orbite dei satelliti quasi-polari (inclinate di pochi gradi rispetto all'asse Nord-Sud) e quindi il piano di osservazione circa parallelo al piano equatoriale, le componenti di movimento diretto lungo la direzione Nord-Sud risulteranno pesantemente sottostimate, mentre le componenti in Est-Ovest ben visibili.

Il segno positivo o negativo assegnato ai valori di velocità si riferisce, per convenzione, a moti rispettivamente in avvicinamento ed in allontanamento dal satellite.

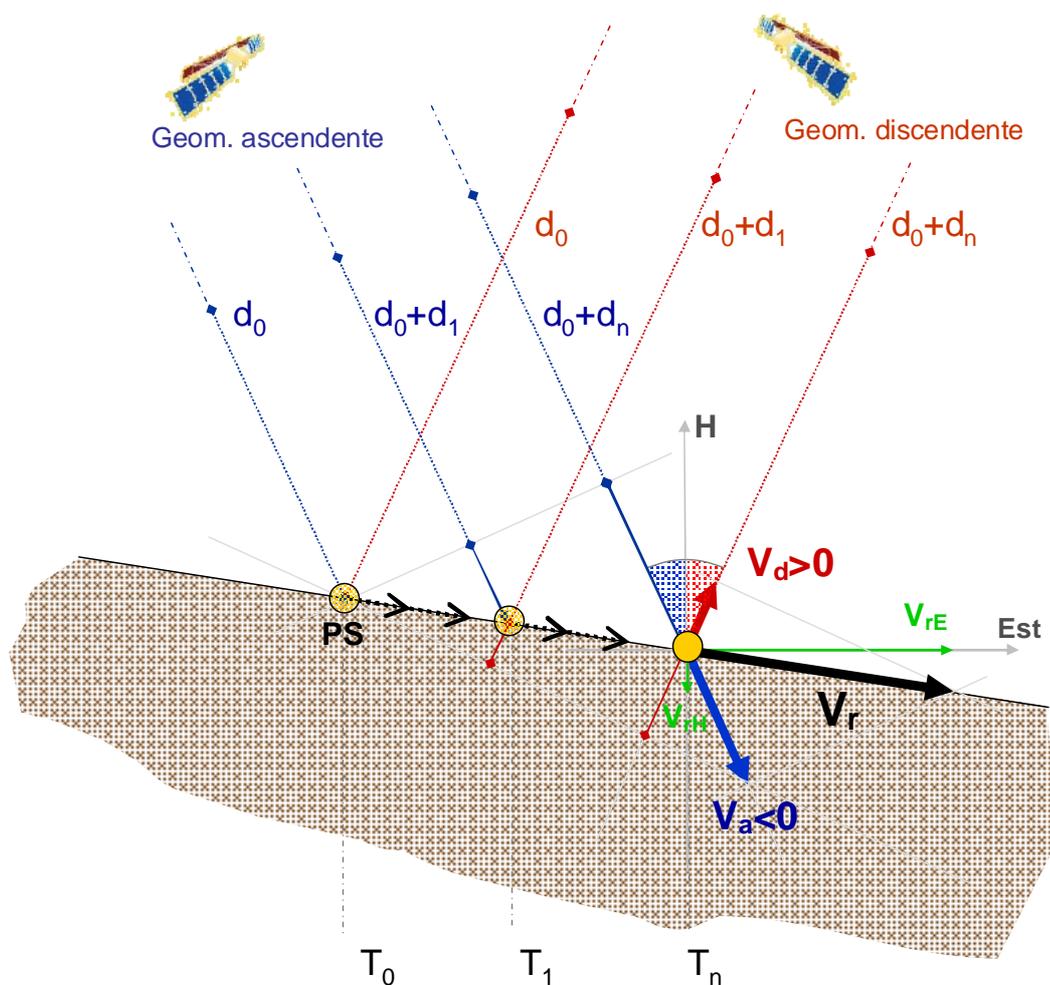
In un'area sulla quale siano presenti dei PS ottenuti sia da analisi in geometria ascendente che discendente e caratterizzata da un movimento nel piano orizzontale in direzione Est-Ovest, il moto verrà evidenziato con valori di velocità di segno opposto nelle due distinte analisi (cfr. figura 10) proprio perché in un caso si assisterà ad una riduzione della distanza sensore bersaglio, mentre nell'altro ad un aumento della stessa.



**Fig. 10** - Esempio di area caratterizzata da forte moto orizzontale da Ovest a Est: a destra campo di velocità dei PS rilevati in geometria discendente (punti in allontanamento dal satellite, velocità negative); a sinistra campo di velocità dei PS rilevato in geometria ascendente (punti in avvicinamento al satellite, velocità positive).

Per meglio chiarire questo concetto, in Fig. 11 è riportata una rappresentazione del caso sopra descritto: un PS, indicato con il circolo arancio, è posizionato su di un versante in frana ed il moto reale a cui è sottoposto è indicato dal vettore  $V_r$  le cui componenti orizzontale e verticale sono rispettivamente  $V_{rE}$  e  $V_{rH}$ . La posizione del PS è rappresentata in tre istanti temporali successivi indicati con  $T_0, T_1$  e  $T_n$ ; osservando le distanze satellite bersaglio nei tre diversi istanti si può notare come tale distanza aumenti nella geometria ascendente e diminuisca in quella discendente, il che porta il sistema a rilevare una velocità positiva, indicata con  $V_d$ , per la geometria discendente e negativa, indicata con  $V_a$ , per quella ascendente.

Con riferimento all'immagine si intuisce come tale disparità nelle velocità rilevate per le due geometrie sia funzione della sola componente orizzontale, in assenza della quale le velocità rilevate risulterebbero uguali.



**Fig. 11** - rappresentazione del moto di un punto con velocità prevalentemente orizzontale e descrizione della velocità rilevata in caso di geometria ascendente e discendente.

## **Vantaggi**

I punti di forza della tecnica PS, rispetto ad un'analisi DInSAR convenzionale, consistono principalmente nella possibilità di valutare e rimuovere dal segnale i contributi di disturbo atmosferico, di ottenere stime puntuali, e di ottenere una maggiore accuratezza delle misure (sino al millimetro su singola misura)

In generale i vantaggi offerti dalla tecnica si possono così riassumere:

- presenza di un archivio storico (dal 1992), e quindi possibilità di indagini su fenomeni passati
- misure differenziali con precisione elevata:
  - sul trend di deformazione:
    - velocità media PS: fino a 0,1 [mm/anno]
  - sulla singola misura:
    - spostamento verticale PS: fino a 1 mm
    - spostamento est-ovest PS: fino a 1 cm
- elevata densità spaziale di capisaldi radar (in area urbana fino a ~400 PS/Kmq), già presenti sul territorio
- abbattimento dei costi e dei tempi di indagine su larga scala per la zonazione del territorio
- integrabilità in ambiente GIS
- applicazioni sinergiche con altre tecniche di rilevamento
- precisione verticale delle misure superiore rispetto alla tecnica GPS

## **Limiti**

È importante sottolineare anche i limiti della Tecnica PS: è possibile stimare i movimenti solo lungo la direzione di LOS, cioè approssimativamente lungo la verticale, salvo il caso di analisi *ad hoc* di diverse geometrie di acquisizione; inoltre per portare a termine con successo l'analisi PS è necessario che l'area oggetto di studio presenti una densità sufficiente di diffusori permanenti (quantomeno area a lieve urbanizzazione oppure presenza di rocce esposte).

Inoltre elemento fondamentale per la comprensione dei limiti del sistema è che la tecnica PSInSAR<sup>TM</sup> si basa sulla misura della differenza di fase dell'onda

elettromagnetica del radar tra un'acquisizione e la successiva. A questa differenza di fase corrisponde uno spostamento del PS nella direzione di vista del satellite. Bisogna notare che nel caso in cui il bersaglio si sposti di una quantità tale da far compiere alla fase un angolo giro completo tra un'acquisizione e la successiva il sistema considererà l'oggetto come fermo, in quanto la differenza di fase è in questo caso nulla. Il calcolo dei numeri interi di cicli compiuti dalla fase tra un'acquisizione e la successiva è noto in letteratura scientifica come “**phase unwrapping**”.

Per meglio comprendere questo fenomeno di equivocazione del moto si osservi Figura 12: il solido grigio rappresenta un bersaglio del sistema radar di acquisizione.

Il bersaglio è rappresentato in uno stato iniziale  $T_0$  (in blu) e poi in rosso sono rappresentati tre possibili casi A, B e C di spostamenti di diversa entità ( $S_a$ ,  $S_b$  e  $S_c$ ) all'istante  $T_1$  successivo. Il grafico sinusoidale rappresenta la fase dell'onda elettromagnetica incidente sul bersaglio. Si definisce  $L$  la distanza che l'onda deve percorrere affinché la sua fase ritorni al valore iniziale.

Nel caso A l'oggetto si sposta di una quantità  $\Delta R$  inferiore a  $L$ . Il sistema è in grado di rilevare senza ambiguità questo spostamento  $S_a$  misurando il valore della fase dell'onda all'istante  $T_1$ .

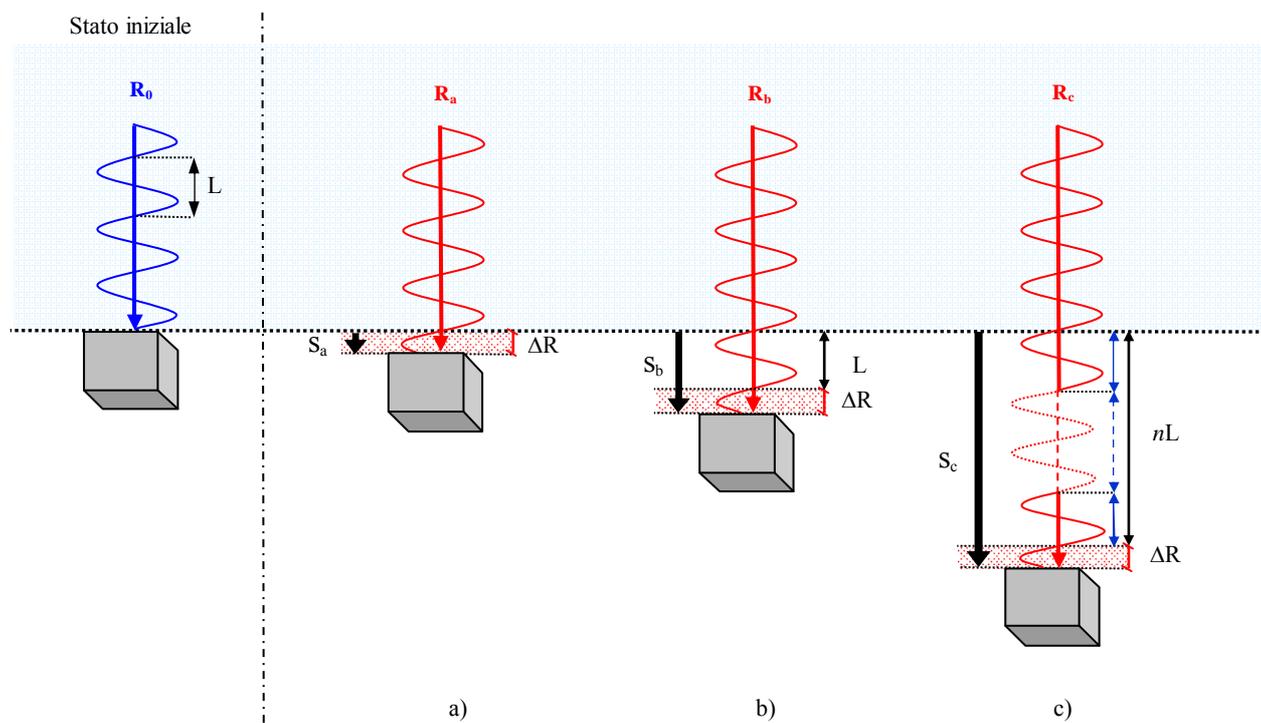
Nel caso B l'oggetto compie un percorso  $S_b = L + \Delta R$ . Il valore della fase dell'onda rende conto anche in questo caso dello spostamento  $\Delta R$  ma, osservando il valore della fase all'istante  $T_1$ , non è in nessun modo possibile ricostruire il fatto che l'onda ha già compiuto un ciclo completo. Il sistema di acquisizione misura perciò uno spostamento pari a  $\Delta R$ , mentre lo spostamento reale è  $L + \Delta R$ .

Nel caso C si ha una situazione analoga al caso B, ma, a differenza di quest'ultimo, la fase dell'onda compie  $n$  (numero intero) cicli di fase prima di compiere la variazione corrispondente a  $\Delta R$ . Lo spostamento effettivo dell'oggetto è  $S_c = nL + \Delta R$ , ma per il sistema l'oggetto si è mosso solamente di  $\Delta R$ . Anche in questo caso si è caduti in una situazione di equivocazione del moto. I casi A, B e C sono del tutto equivalenti per il sistema di acquisizione, che misura in tutte e tre le situazioni uno spostamento dell'oggetto di  $\Delta R$ .

Concludendo: affinché non si cada in errori nella valutazione dello spostamento dell'oggetto è necessario che tra i due istanti di osservazione l'oggetto non si sposti più di  $L$ . Per essere più precisi, per essere sicuri di misurare correttamente non solo lo

spostamento ma anche la direzione di questo (l'oggetto si è avvicinato o allontanato di  $\Delta R$ ?), è necessario che l'oggetto non si sposti più di  $L/2$ .

Applicando questa considerazione geometrica al caso specifico dei satelliti ERS, ENVISAT e RADARSAT (lunghezza d'onda  $\lambda$  di 5.6 cm) la distanza  $L$  dell'esempio di Fig 12 è pari a  $\lambda/2$ . Pertanto la distanza massima misurabile tra un'acquisizione e la successiva sarà pari a  $\lambda/4$ , ovvero 1.4 cm. Considerando che i sensori ERS e ENVISAT hanno un *revisiting time* di 35 giorni e RADARSAT di 24 giorni, sotto l'ipotesi di idealità (assenza di rumore), di acquisizioni regolari e di moto del PS perfettamente lineare, è possibile misurare rispettivamente velocità annue massime pari a circa 140 [mm/anno] e 210 [mm/anno]. Nel caso pratico, soprattutto a causa dell'impossibilità di avere acquisizioni perfettamente regolari, questo valore scende a circa 60 [mm/anno] per ERS e ENVISAT e circa 150 [mm/anno] per RADARSAT.



**Fig. 12** - Esempio di equivocazione del moto del PS

Riassumendo, i limiti riguardano:

- moti rapidi (superiori a 1 cm/35 giorni) non possono essere monitorati senza informazioni “a priori”
- monitoraggio in “tempo reale” impossibile: frequenza del dato (35 giorni) anche se è possibile integrare più geometrie di acquisizione
- assenza di misure in aree senza bersagli radar (necessità di installare riflettori artificiali)
- difficile previsione della posizione dei PS su aree non urbane
- elaborazione minima: 25-30 immagini radar
- carico computazionale elevato

### **Riflettori artificiali**

Nel caso di totale assenza di bersagli radar con caratteristiche di *Permanent Scatterers*, è possibile installare degli oggetti specifici, detti riflettori artificiali o bersagli radar artificiali, che per caratteristiche costruttive si comportano da capisaldi radar. Si tratta di manufatti in metallo di tipo passivo (ovvero non alimentati da corrente elettrica), che non richiedono una particolare manutenzione e che, successivamente al momento dell’installazione, sono identificabili e monitorabili da satellite.

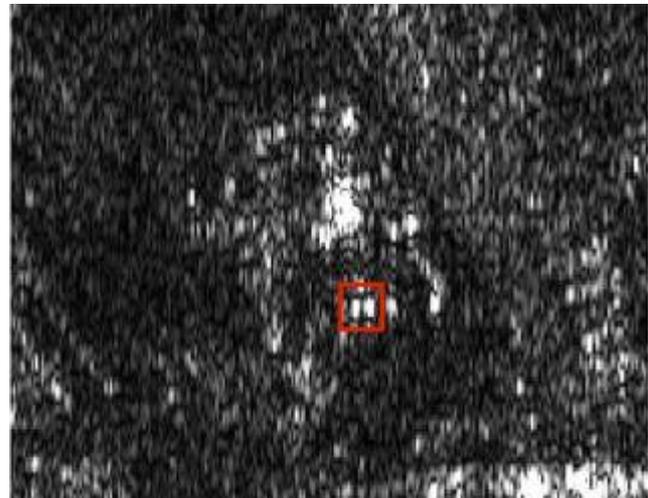
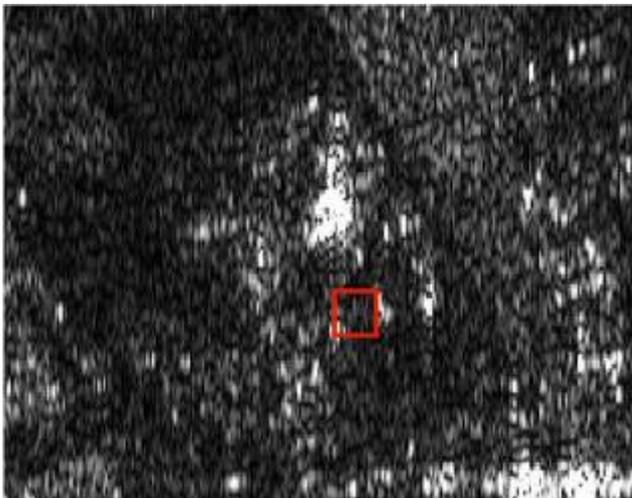
In figura 13 sono rappresentati alcuni esempi di riflettore artificiali standard:

- il tipo “*corner*”, costituito da un triedro triangolare cavo;
- il tipo “*planar*” o specchio piano, costituito da una lastra quadrata;
- il tipo diedro, costituito da due piani di metallo disposti ortogonalmente.

La tipologia di riflettore artificiale da installare dipende dalla particolare applicazione richiesta. Ciascuno di questi oggetti, infatti, è caratterizzato da precise e differenti proprietà elettromagnetiche. Di conseguenza, per poter rappresentare un punto di misura in un’immagine radar satellitare (figura 14), è necessario che siano soddisfatti specifici requisiti sulla dimensione del riflettore e sulla precisione richiesta nella fase di puntamento dello stesso.



**Fig. 13** - riflettori artificiali di tipo “*corner*” (sopra a sinistra), di tipo “*planar*” o specchio piano (sopra a destra), e di tipo diedro (sotto).



**Fig. 14** - Immagine SAR prima dell’installazione di una coppia di riflettori artificiali (sinistra) e dopo (destra).