

**Progetto integrato per la tutela dell'acquifero,  
la lotta alla subsidenza e alla erosione costiera**

**Macro attività 1**  
**Studio della subsidenza tramite interferometria**



Referente per conto dell'Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli: Ing. **Alberto Pistocchi**

Lo studio è stato condotto dalla Struttura Tematica Ingegneria Ambientale dell'ARPA.

Responsabile di progetto: Ing. **Maurizio Morelli**

Le attività connesse all'applicazione della tecnica dei "Permanent Scatterers" sono state realizzate dalla Società Tele-Rilevamento Europa – T.R.E. s.r.l., spin-off del Politecnico di Milano:

- Ing. **Alessandro Ferretti**
- Ing. **Stefano Cespa**

La realizzazione della carta della subsidenza è stata supportata dal Dott. **Flavio Bonsignore** della Struttura Tematica di Ingegneria Ambientale dell'ARPA.

La parte di cartografica informatizzata è stata curata dalla Dott.ssa **Monica Branchi** della Struttura Tematica di Ingegneria Ambientale dell'ARPA.

## **INDICE**

<b>1.</b>	<b>Obiettivi</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>Interferometria differenziale SAR e Tecnica PS</b>	<b>2</b>
2.1	<i>Sistemi di telerilevamento radar satellitari</i>	2
2.2	<i>La piattaforma radar utilizzata</i>	3
2.3	<i>Acquisizione delle immagini</i>	4
2.4	<i>Deformazioni prospettiche</i>	5
2.5	<i>Interferometria Differenziale SAR convenzionale</i>	7
2.6	<i>La Tecnica PS (Permanent Scatterers Technique)</i>	9
2.7	<i>Accuratezza delle stime</i>	12
2.8	<i>Strategie di elaborazione</i>	14
<b>3.</b>	<b>Individuazione e localizzazione dei Permanent Scatterers</b>	<b>15</b>
3.1	<i>Prima fase dell'elaborazione con Tecnica PS</i>	15
3.2	<i>Il dataset elaborato</i>	15
3.3	<i>L'area di interesse</i>	17
3.4	<i>Elaborazione</i>	17
3.5	<i>Geocodifica e posizionamento</i>	22
<b>4.</b>	<b>SPSA Standard PS Analysis</b>	<b>25</b>
4.1	<i>Seconda fase dell'elaborazione con Tecnica PS</i>	25
4.2	<i>Stima e rimozione del disturbo atmosferico</i>	25
4.3	<i>Risultati conseguiti</i>	29
4.4	<i>Esempi di risultati ottenuti</i>	30
<b>5.</b>	<b>Proposta di una carta della subsidenza utilizzando i risultati dell'analisi di movimeto con la tecnica PS</b>	<b>50</b>
5.1	<i>Determinazione delle velocità assolute di abbassamento dei Permanent Scatterers</i>	50
5.2	<i>Realizzazione della carta della subsidenza</i>	52

## **1. OBIETTIVI**

La presente relazione costituisce la relazione tecnica dello “Studio della subsidenza tramite interferometria”, che rappresenta una delle macro-attività in cui si articola il più generale “Progetto integrato per la tutela dell’acquifero, la lotta alla subsidenza e alla erosione costiera” relativo al territorio di competenza dell’Autorità dei Bacini Regionale Romagnoli.

Obiettivo dello studio è quello di analizzare il fenomeno della subsidenza e, successivamente, pervenire ad una mappa della stessa nel territorio di pianura di competenza dell’Autorità, utilizzando le tecniche di analisi delle serie storiche di immagini radar satellitari di tipo SAR (Synthetic Aperture Radar) disponibili e basate sui cosiddetti “permanent scatterers” (PS).

La tecnica “PS” è una tecnologia satellitare capace di fornire stime accurate dei movimenti di un gran numero (molte migliaia) di bersagli radar naturali “PS” distribuiti sulla superficie terrestre; è possibile sia stimare per ciascun “PS” la velocità di spostamento con accuratezza tra 0.1 e 1 mm/anno, sia ricostruire l’intera serie storica di deformazione a partire dal 1992 anno di lancio del primo SAR europeo a bordo del satellite ERS-1 dell’Agenzia Spaziale Europea (ESA).

L’insieme dei “PS” costituisce una sorta di “rete geodetica naturale” che consente l’analisi di deformazione superficiale terrestre.

A seguito di indagini di mercato effettuate nell’ambito di applicazione delle suddette tecnologie, è emerso che a partire dal 1984 uno dei principali nodi scientifici attorno al quale si è sviluppata la tecnica di trattamento e analisi dei dati SAR è stato il Dipartimento di Elettronica e Informazione del Politecnico di Milano; tra il 1996 e il 1997 sono iniziate le prime analisi secondo la tecnica “PS” che, nel 1999, hanno portato al deposito di un brevetto da parte del Politecnico.

Per la valorizzazione dei risultati delle ricerche sul telerilevamento satellitare è nata nel 2000, da uno spin-off dello stesso Politecnico di Milano, la Società Tele-Rilevamento Europa – T.R.E. s.r.l. che risulta essere licenziataria in esclusiva del brevetto delle tecniche PS per l’analisi e l’elaborazione dei dati radar satellitari.

Per le peculiarità delle attività da svolgere nell’ambito dello “Studio della subsidenza tramite interferometria” sul territorio delle province di Ravenna e Forlì-Cesena di competenza dell’Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli, nonché per la titolarità del brevetto relativo alla tecnica “PS” in capo alla Società Tele-Rilevamento Europa – T.R.E. s.r.l., si è pertanto provveduto ad affidare alla suddetta società l’incarico di realizzare l’analisi di deformazione superficiale delle aree di pianura, avvalendosi della Tecnica dei Permanent Scatterers.

La strategia di progetto ha previsto che l’analisi della deformazione superficiale fosse articolata nelle seguenti due fasi:

1. Individuazione e localizzazione dei capisaldi radar (Permanent Scatterers – PS);
2. Completamento dell’analisi PS “standard” del dataset discendente.

Lo sviluppo dei suddetti due punti viene presentato nei successivi tre capitoli della presente relazione, dove vengono illustrate le caratteristiche peculiari del sistema SAR e le procedure standard di elaborazione che consentono di utilizzare i dati radar per analisi di movimento; dopo aver introdotto il concetto di interferometria differenziale tradizionale, viene presentata la Tecnica PS, evidenziandone in particolare i vantaggi rispetto ad un approccio tradizionale.

Nell’ultimo capitolo viene proposto l’utilizzo dei risultati dell’analisi di movimento con i PS per redigere una specifica mappa della subsidenza del territorio in esame.

## 2. INTERFEROMETRIA DIFFERENZIALE SAR E TECNICA PS

### 2.1 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 e sia di giorno sia di notte.

Il principio di funzionamento è il medesimo di tutti i sistemi radar (acronimo di **radio detecting and ranging**): un apparecchio trasmettente illumina lo spazio circostante con un'onda elettromagnetica che incide su eventuali oggetti subendo un fenomeno di riflessione disordinata (diffusione, *scattering*). Una parte del campo diffuso torna verso la stazione trasmettente, 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*).

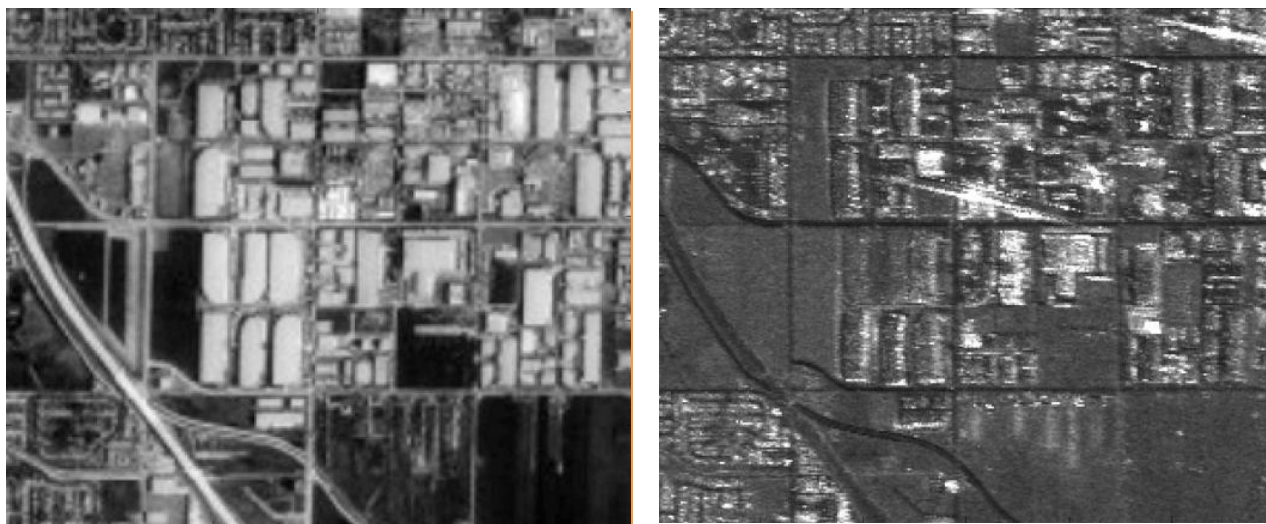
La direttività dell'antenna utilizzata per trasmettere e ricevere il segnale radar, e cioè la selettività nell'illuminazione dello spazio circostante consente di localizzare l'oggetto anche lungo l'altra dimensione (detta di *azimuth*). Quanto più grande è l'antenna, tanto più stretta è la sua impronta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

L'idea alla base del **SAR** (**S**ynthetic **A**perture **R**adar - Radar ad Apertura Sintetica) consente di aggirare la stessa limitazione (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 nelle posizioni successivamente occupate, si sintetizza un'antenna fittizia di grandi dimensioni detta, appunto, apertura sintetica. È proprio questo procedimento a garantire un'elevata risoluzione anche nella direzione di azimuth.

Poiché il sistema illumina lo spazio è un sistema *attivo*, non è quindi richiesta l'illuminazione solare, inoltre le frequenze utilizzate penetrano senza sensibili attenuazioni attraverso le nuvole, evitando così i già accennati problemi di acquisizione dei sistemi ottici.

In Figura 2.1-1 è illustrato il confronto tra un'acquisizione di tipo ottico e una radar, ottenuta dai satelliti ERS dell'Agenzia 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 radar).

Figura 2.1-1 Confronto tra acquisizione ottica e acquisizione radar di tipo SAR (ERS)



## 2.2 LA PIATTAFORMA RADAR UTILIZZATA

Nel presente lavoro sono stati utilizzati i dati rilevati dai satelliti ESA (European Space Agency): ERS-1 ed ERS-2 (Figura 2.2-1): ERS-1 ha acquisito dati dal Luglio 1991 al Marzo 2000, ERS-2 è invece operativo dall'estate del 1995.

Figura 2.2-1 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

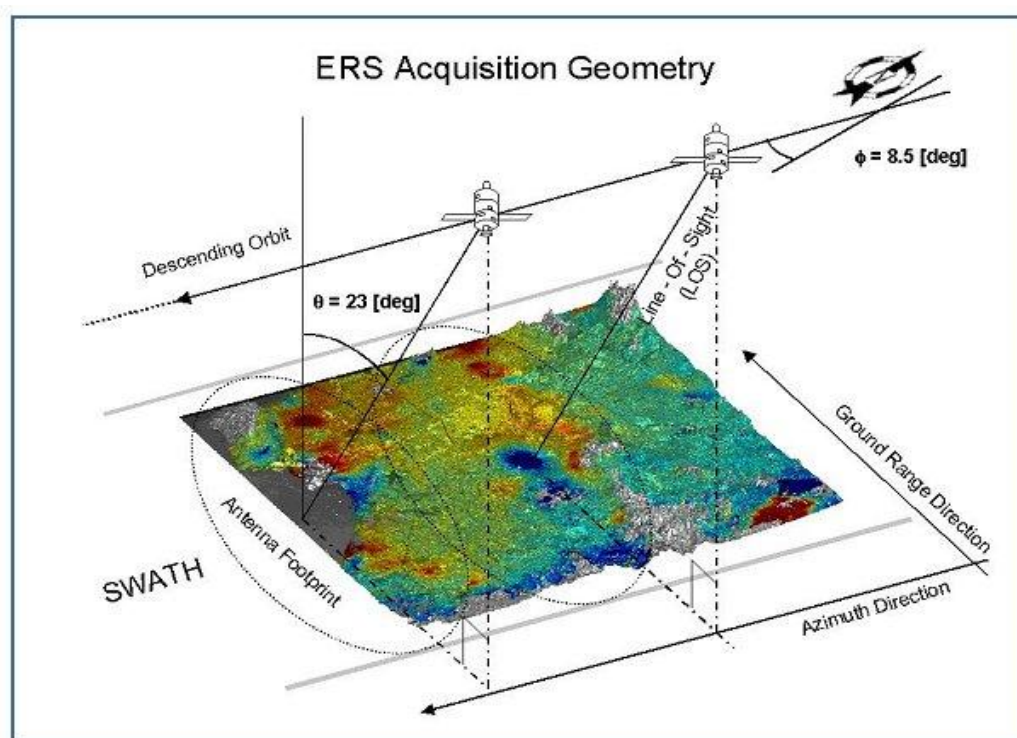
35 giorni, che costituiscono un'informazione storica di enorme rilevanza potendo studiare l'evoluzione della fase per ciascuna acquisizione e ricostruire la storia delle deformazioni.

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 2.2-2 è rappresentata schematicamente la geometria di acquisizione dei sistemi SAR-ERS.

Figura 2.2-2 Geometria d'acquisizione SAR delle piattaforme ERS-1 ed ERS-2



## 2.3 ACQUISIZIONE DELLE IMMAGINI

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.

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 per 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.

## 2.4 DEFORMAZIONI PROSPETTICHE

La modalità di acquisizione, non perpendicolare al suolo ma secondo un angolo di vista  $\theta$ , descritta nel paragrafo precedente, dà origine nelle immagini focalizzate a delle deformazioni prospettiche a causa della topografia del terreno. Ne occorrono di tre differenti tipi, in base alla pendenza del terreno:

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

In Figura 2.4-1 sono riportate le geometrie dei diversi fenomeni.

In Figura 2.4-2 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.



Figura 2.4-1 Deformazioni prospettiche: foreshortening, layover, shadowing

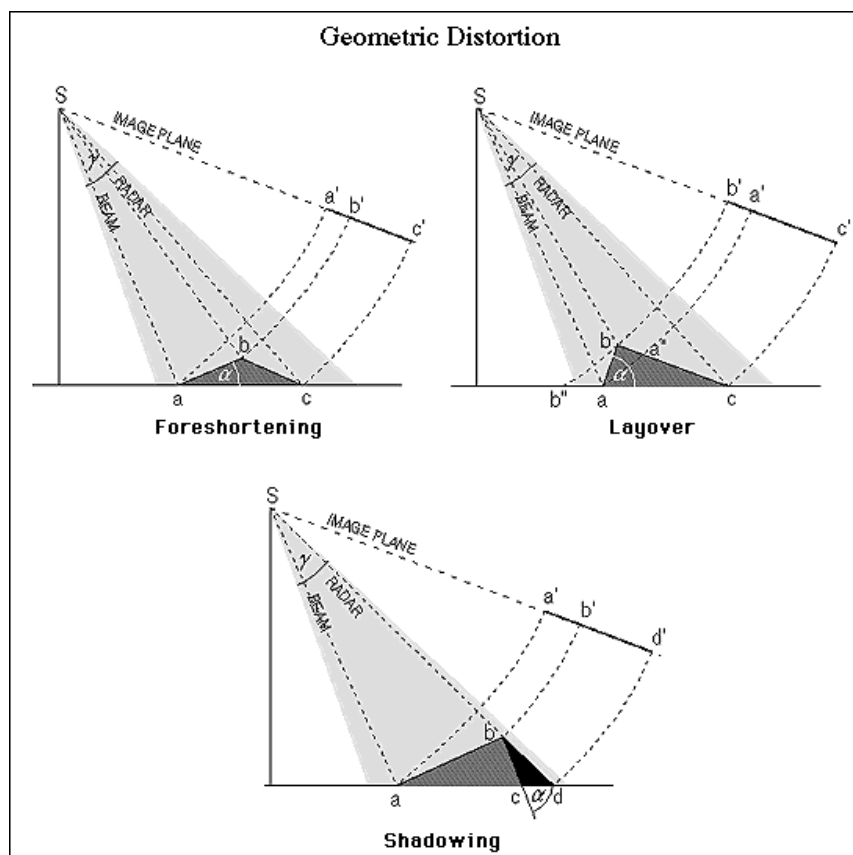
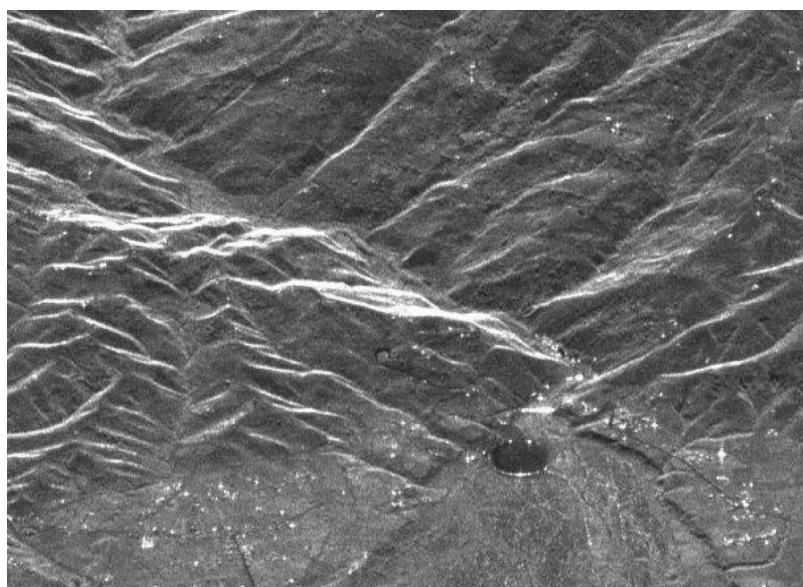


Figura 2.4-2 Fenomeni di deformazione prospettica in immagini focalizzate SAR. Al centro della figura, versanti in foreshortening (linee bianche)



## 2.5 INTERFEROMETRIA DIFFERENZIALE SAR CONVENZIONALE

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,  $r$  è la distanza sensore-bersaglio (questo valore, moltiplicato per il fattore riportato nell'equazione, viene indicato con il termine di *propagatore*) e  $n$  è un inevitabile rumore proprio del sistema di acquisizione.

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

La fase di una singola immagine SAR non è di fatto utilizzabile, perché risulta impossibile discriminare un contributo dall'altro. Se si hanno, però, due acquisizioni relative alla stessa area, accuratamente registrate sulla stessa griglia di riferimento, è possibile utilizzare l'informazione contenuta in esse. In questo caso, infatti, si genera un interferogramma sottraendo la fase di un'immagine a quella dell'altra.

Se non avvengono particolari cambiamenti nel periodo tra le due acquisizioni, i contributi dovuti alla riflettività si elidono e la fase dell'interferogramma dipende, con buona approssimazione, solo dalla distanza sensore-bersaglio e – quindi – da eventuali movimenti intercorsi tra le due acquisizioni (a parte i contributi puri 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 *geometrica*). 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**.

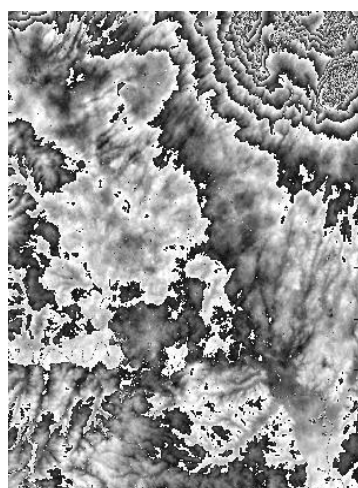
In Figura 2.5-1 è mostrato un esempio riassuntivo.

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.

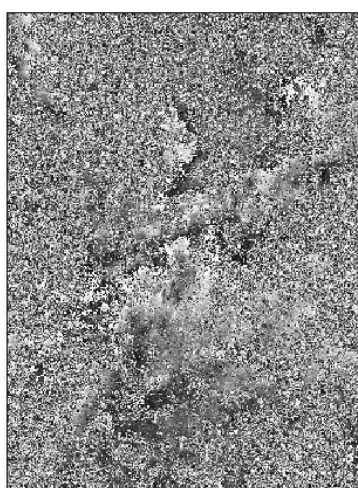
Si può osservare nell'interferogramma b) come, aumentando l'intervallo temporale, pari ora a 1984 giorni, ma mantenendo quasi inalterata la componente di *baseline normale* (149 m), subentrino sensibili disturbi dovuti a decorrelazione temporale e viene a mancare la coerenza presente nel caso a).

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

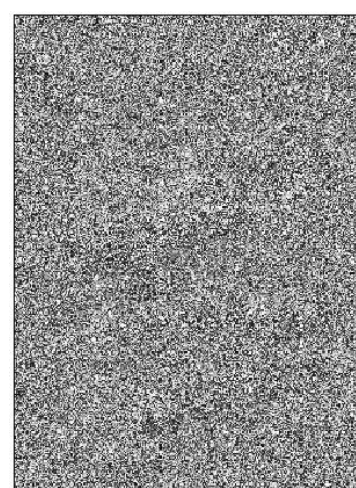
Figura 2.5-1 Interferogrammi e disturbi dovuti a decorrelazione temporale e geometrica



a) Bn = 123 [m], Bt = 1 [gg]



b) Bn = -149 [m], Bt = 1984 [gg]



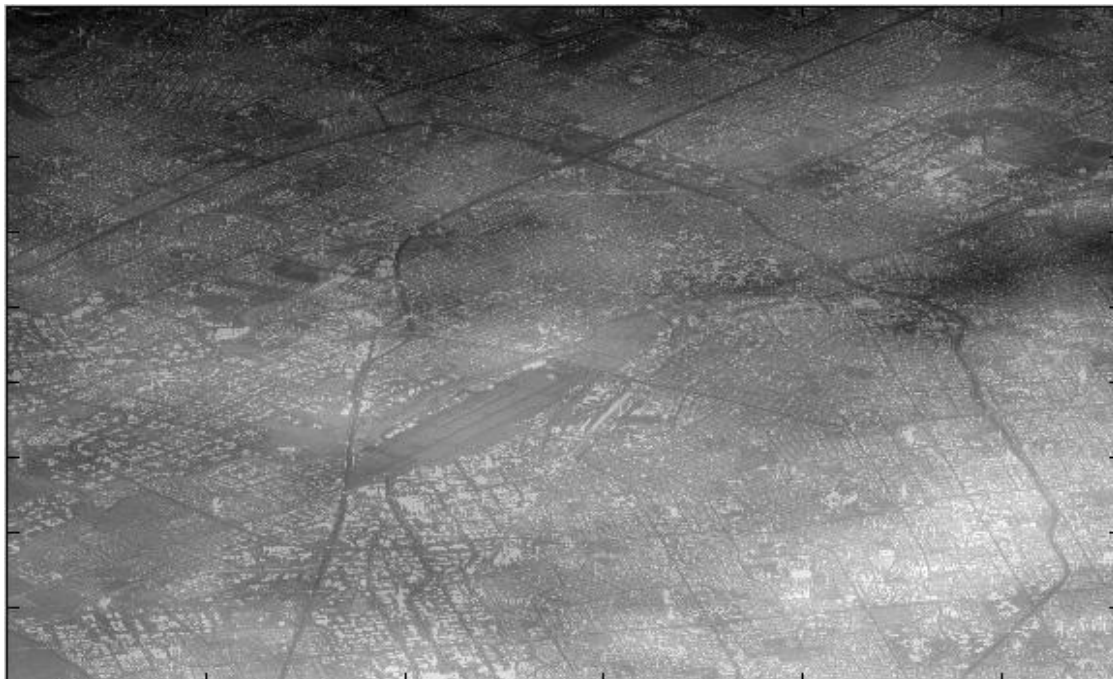
c) Bn = -712 [m], Bt = 1774 [gg]

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 2.5-2).

Un'attenta analisi bibliografica porta comunque alla conclusione che, con l'interferometria SAR tradizionale, si possono stimare movimenti con un'accuratezza dell'ordine del centimetro; inoltre, in

genere non è possibile effettuare stime puntuali, ma solo analisi d'insieme per identificare fenomeni macroscopici in essere (estensione > 0.2 km<sup>2</sup>).

Figura 2.5-2 Componente atmosferica di fase sovrapposta all'immagine di ampiezza



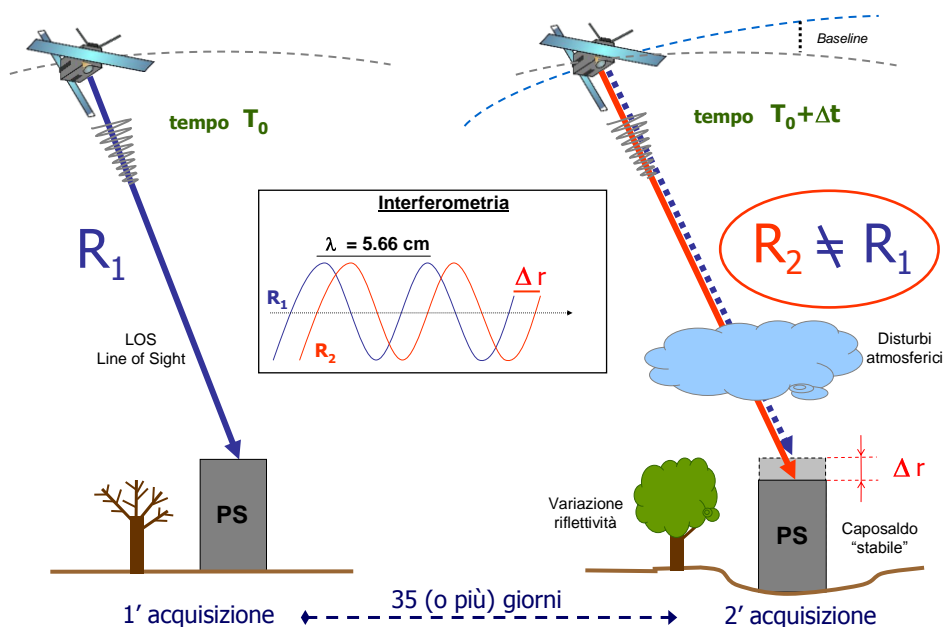
## 2.6 LA TECNICA PS (PERMANENT SCATTERERS TECHNIQUE)

La Tecnica dei Diffusori Permanenti (*Permanent Scatterers*, PS) è stata sviluppata e brevettata presso il Politecnico di Milano e concessa in licenza esclusiva a T.R.E. S.r.l. nel 2000. Si tratta di uno strumento estremamente efficace per il monitoraggio con accuratezza millimetrica di fenomeni di deformazione della superficie terrestre, basato sull'impiego di serie temporali d'immagini radar satellitari (in particolare, dati dei satelliti ERS-1/2 dell'ESA).

L'approccio PS è basato sull'osservazione che un piccolo sottoinsieme di bersagli radar, costituito appunto dai diffusori permanenti (*Permanent Scatterers*, PS o Punti di Misura Permanente, PMP), 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, mentre non accade ad esempio per la vegetazione che muta di continuo.

La Figura 2.6-1 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).

Figura 2.6-1 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 [R1] [R2].

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.

Si può immaginare la griglia di PS come una rete di stazioni GPS (*Global Positioning System*) naturali per il monitoraggio di vaste aree di interesse con una frequenza di aggiornamento del dato mensile e con una densità spaziale di punti di misura estremamente elevata (in aree urbane 100-300 PS/km<sup>2</sup>).

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



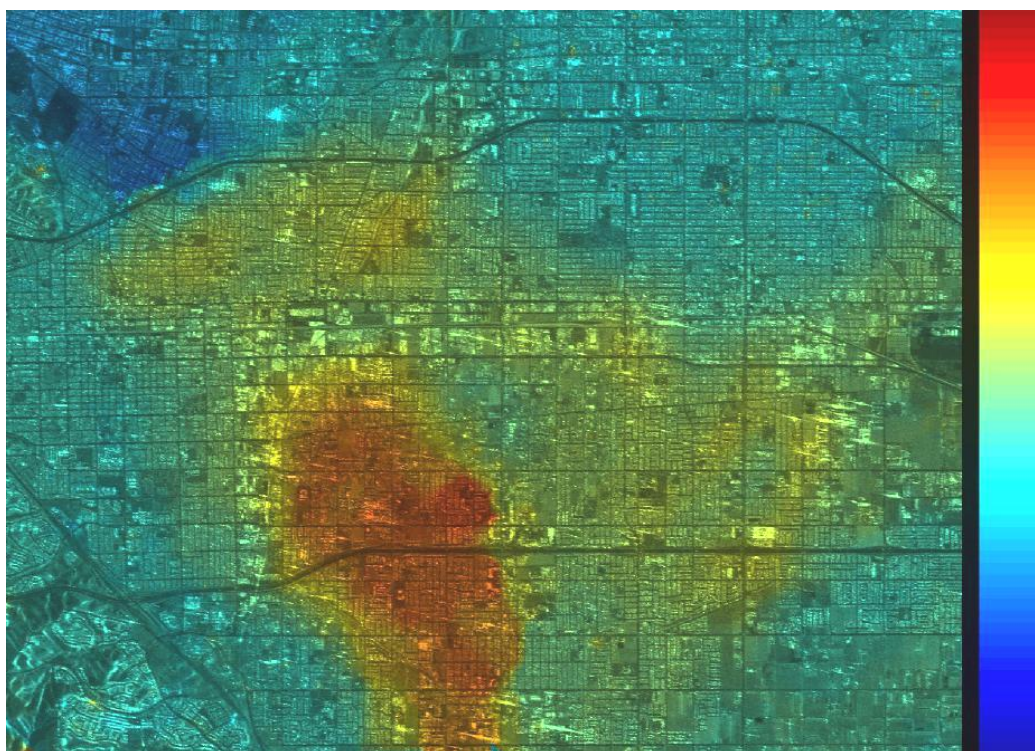
avvalendosi di dataset consistenti in almeno 25-30 immagini ERS. In aree ad elevata urbanizzazione, la densità spaziale di PS raggiunge valori molto alti: 100 – 400 PS/km<sup>2</sup>.

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

Per la visualizzazione delle stime ottenute, è possibile rappresentare il trend medio di deformazione su un qualsiasi background che aiuti un'interpretazione e una geo-localizzazione dei fenomeni in atto (l'ottimo è – ovviamente – operare in ambiente GIS dove l'utente può selezionare il layer opportuno). A titolo di esempio, in Figura 2.6-2, è visualizzata la mappa di deformazione di Pomona (California). I valori del campo di velocità sono saturati a  $\pm 30$  mm/anno.

Figura 2.6-2 Campo di velocità di Pomona (California) saturato a  $\pm 30$  mm/anno, in coordinate SAR



In generale, la **Tecnica PS** presenta i seguenti vantaggi rispetto all'analisi DInSAR convenzionale:

1. Possibilità di **stime puntuali**
2. Maggiore **accuratezza** (sino al millimetro su singole misure)
3. Stima e **rimozione dei contributi atmosferici**

## Vantaggi

I punti di forza della tecnica PS si possono schematicamente riassumere nei seguenti punti:

- presenza di un archivio storico (dal 1992), da cui la possibilità di indagini su fenomeni passati
- misure differenziali con accuratezza 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
- accuratezza verticale delle misure superiore rispetto alla tecnica GPS

## Limiti

È importante sottolineare anche i limiti della Tecnica PS che consistono nella facoltà di apprezzare la deformazione lungo la direzione LOS, cioè approssimativamente lungo la verticale, salvo il caso di analisi *ad hoc* di diverse geometrie di acquisizione, e nel fatto che 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 lieve urbanizzazione oppure presenza di rocce esposte). Inoltre, per l'analisi di fenomeni di deformazione con evoluzione particolarmente rapida (ad es. un improvviso fenomeno di subsidenza), il problema legato all'equivocazione di fase può complicare notevolmente l'interpretazione dei risultati come in tutti i sistemi di tipo coerente. La tecnica interferometrica SAR consente infatti di valutare con accuratezza millimetrica variazioni di distanza sensore-bersaglio pari ad una **frazione della lunghezza d'onda** (5.66 cm per i satelliti ESA-ERS), ma eventuali "salti" di diversi centimetri vengono "equivocati" ovvero non è possibile "contare" il numero intero di lunghezze d'onda. Al limite, se il bersaglio si muovesse esattamente di mezza lunghezza d'onda (2.8 cm per i satelliti ERS) non risulterebbe possibile misurare alcuna variazione di fase rispetto al caso di bersaglio fermo. Il passaggio dei satelliti (*revisiting time*) pari a 35 giorni impedisce inoltre di osservare situazioni di pericolo che richiedono un monitoraggio in tempo reale.

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 capisaldi artificiali)
- difficile previsione della posizione dei PS su aree non urbane
- elaborazione minima: 25-30 immagini radar
- carico computazionale elevato

## 2.7 ACCURATEZZA DELLE STIME

La qualità e l'accuratezza dei risultati ottenuti con la Tecnica PS rappresenta uno dei principali obiettivi per Tele-Rilevamento Europa.

Grazie a numerosi progetti ed analisi svolte sia in ambito commerciale che nel contesto di attività di ricerca, T.R.E. e POLIMI hanno potuto effettuare una serie di esaustive analisi e confronti volti a stabilire l'accuratezza che è possibile ottenere utilizzando la Tecnica PS. Queste validazioni hanno messo in luce la qualità e consistenza dei risultati ottenuti, dimostrando che la Tecnica PS è un valido strumento operativo da affiancare con successo ai più tradizionali metodi di monitoraggio e quindi più conosciuti, quali ad esempio GPS e levelling ottico.

I parametri che caratterizzano i prodotti PS sono tre:

1. Precisione delle velocità stimate
2. Precisione delle quote stimate
3. Precisione di geocodifica

### **Precisione delle velocità stimate**

Due sono le cause che concorrono a degradare la stima delle velocità: disturbo atmosferico e rumore di decorrelazione.

Il disturbo atmosferico ha un comportamento di tipo passa-basso spaziale, e quindi produce un contributo simile per tutti i PS che distano tra loro di una distanza inferiore a circa 1km. Tale disturbo si traduce in una polarizzazione sistematica dei valori di fase, e conseguentemente dei valori di velocità stimati.

Il rumore di decorrelazione ha invece un comportamento totalmente diverso, risultando spazialmente incorrelato e indipendente dal disturbo atmosferico, e presenta generalmente potenze molto basse ( $\sigma_{\text{noise}} < 0.3 \text{ rad}$ ).

Questi due fattori rendono quindi necessario distinguere tra la dispersione dei valori di velocità rispetto ad un punto di riferimento (per esempio il punto di riferimento utilizzato nella catena di elaborazione che costituisce la Tecnica PS) e la precisione tra due PS vicini tra loro. In questa ultima situazione, usando un data-set composto da almeno 30 scene SAR, l'errore nella stima della velocità relativa tra due PS vicini (posti a distanza inferiore ad 1 Km) è generalmente inferiore a  $\pm 0.1 \text{ [mm/anno]}$  ( $1 \cdot \sigma$ ). Nonostante in entrambi i casi l'accuratezza dei risultati dipenda dal numero di immagini utilizzate nell'elaborazione, la valutazione dell'errore di velocità di un punto rispetto al riferimento è molto più complessa perché dipende dalla distanza tra i due (come accade del resto in ogni rete geodetica) e dalla potenza del rumore atmosferico, che differisce da un'immagine ad un'altra. I risultati ottenuti dall'elaborazione vengono quindi forniti con un'immagine che mostra la variazione della potenza dell'errore commesso nella stima delle velocità in funzione della distanza dal punto di riferimento (inserire link a figura o paragrafo).

### **Precisione delle quote stimate**

Le considerazioni riguardanti l'accuratezza nella stima dei valori di velocità possono essere estese per definire l'accuratezza delle quote stimate in corrispondenza dei PS. L'errore relativo tra punti posti ad una distanza inferiore ad 1 km è generalmente minore di  $\pm 1.5 \text{ m}$ , mentre la variazione dell'errore all'aumentare della distanza dal punto di riferimento è illustrato in un'immagine come per le velocità.

### **Precisione di geocodifica**

Ancora una volta, possiamo definire un errore di posizionamento assoluto (rispetto al punto di riferimento utilizzato nell'elaborazione) e un errore di posizionamento relativo (tra PS vicini).

A causa di possibili inaccuranze nella stima dei parametri orbitali e nelle coordinate del Ground Control Point utilizzato durante l'elaborazione, è possibile che i risultati non siano perfettamente



allineati alla griglia di riferimento. In questo caso il problema può essere facilmente superato applicando una traslazione rigida a tutti i PS. L'errore di posizionamento assoluto dipende quindi dall'accuratezza del *layer* di riferimento utilizzato.

L'errore di posizionamento relativo è dettato dalla risoluzione del sistema SAR utilizzato, ed è pari a  $\pm 10$  m nella direzione di range (direzione est-ovest), e  $\pm 2$  m nella direzione di azimuth (direzione nord-sud).

## 2.8 STRATEGIE DI ELABORAZIONE

Sono individuabili due diversi approcci di elaborazione:

**SPSA** – Standard Permanent Scatterers Analysis, per applicazioni su larga scala

Analisi volta ad identificare la presenza di zone stabili o instabili all'interno di un'area di interesse di grandi dimensioni. L'obiettivo è quello di fornire una mappatura del territorio per evidenziare aree a rischio o comunque fenomeni di deformazione superficiale estesi. Vengono identificati i PS ad alta affidabilità e misurate le velocità medie annue di deformazione con una procedura standard che consente di elaborare grandi quantità di dati relativi ad aree molto estese in tempi limitati.

Tabella 2.8-1 Dati tecnici dell'analisi

Parametro	Valore
Dimensioni area minima:	100 Km <sup>2</sup>
Dimensioni area massima:	2000 Km <sup>2</sup>
Risoluzione della cella SAR al suolo:	ca. 4x10 m (fattore di interpolazione in direzione di range pari a 2)
Modello del moto del Permanent Scatterers:	lineare
Stima del disturbo atmosferico:	griglia standard

**APSA** – Advanced Permanent Scatterers Analysis, per applicazioni ad alta risoluzione su aree limitate

Indagine sofisticata, indicata per aree limitate per le quali è necessario massimizzare il contenuto informativo. Richiede tempi computazionali consistenti ed una intensa interazione con un utente esperto per la valutazione accurata dei movimenti individuati. La procedura seguita è specifica per ciascuna area. Un'analisi "Advanced" è fortemente consigliata a seguito di un'analisi "Standard", con la quale si ottiene una zonazione del territorio, per focalizzare le aree di maggiore interesse ed eseguire indagini approfondite sui fenomeni in essere rilevabili con la tecnologia SAR.

Tabella 2.8-2 Dati tecnici dell'analisi

Parametro	Valore
Dimensioni area minima:	1 Km <sup>2</sup>
Dimensioni area massima:	20 Km <sup>2</sup>
Risoluzione della cella SAR al suolo:	ca. 4x5 m (fattore di interpolazione in direzione di range pari a 4)
Modello del moto del Permanent Scatterers:	estensione per moti non lineari
Stima del disturbo atmosferico:	griglia ad alta risoluzione

Per quanto attiene l'analisi per il presente studio si è fatto riferimento alla cosiddetta **SPSA** (Standard Permanent Scatterers Analysis) che verrà presentata nel successivo capitolo 4.

### 3. INDIVIDUAZIONE E LOCALIZZAZIONE DEI PERMANENT SCATTERERS

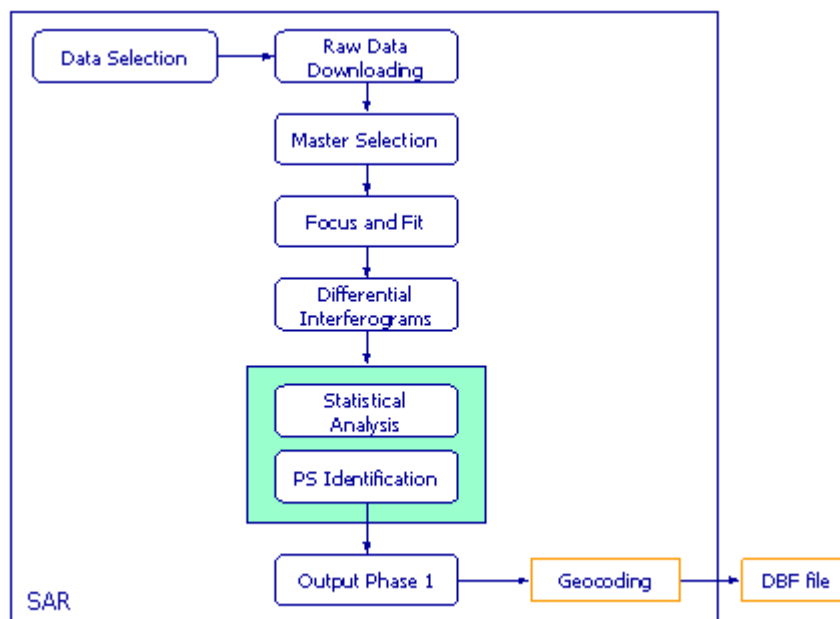
#### 3.1 PRIMA FASE DELL'ELABORAZIONE CON TECNICA PS

La prima fase del progetto di analisi prevede lo studio del segnale radar satellitare SAR per l'identificazione dei *Permanent Scatterers* e la loro localizzazione su supporto geografico opportuno. Dopo una prima fase di taratura delle caratteristiche Hardware e Software al caso specifico si procede con l'identificazione dell'immagine *Master* di riferimento, con le procedure di ricampionamento su griglia comune di tutte le immagini che costituiscono il dataset e con la generazione degli interferogrammi differenziali che costituiranno la base dell'analisi nella seconda fase. Il cuore dell'elaborazione è dato dall'analisi statistica che porta alla successiva identificazione dei Permanent Scatterers. Il processo di geocodifica infine consente di trasformare le coordinate di ciascun caposaldo radar, espresse nella geometria di acquisizione SAR, in coordinate georeferenziate.

Nella seconda fase si procederà con l'analisi delle velocità medie e delle serie storiche di deformazione dei capisaldi radar individuati, partendo dalla stima e rimozione dei disturbi atmosferici che affliggono il segnale.

Operativamente l'elaborazione dei dati SAR con Tecnica PS è costituita dai passi rappresentati nel diagramma a blocchi di Figura 3.1-1.

Figura 3.1-1 Diagramma a blocchi della prima fase dell'elaborazione con Tecnica PS



#### 3.2 IL DATASET ELABORATO

L'elaborazione dell'area di interesse è stata condotta utilizzando 65 delle 69 scene che compongono il data-set ERS-SAR, acquisito in geometria discendente, Track 122 Frame 2709, nell'arco temporale tra il Maggio 1992 e il Dicembre 2000.

Le informazioni relative alle acquisizioni utilizzate sono riportate nella tabella riassuntiva (Tabella 3.2-1) che indica, per ogni immagine, il sensore che ha compiuto l'acquisizione, il *baseline*

temporale (Bt) ed il *baseline normale* (Bn) valutati rispetto all'immagine "master" di riferimento (indicata in rosso nell'elenco).

Tabella 3.2-1 Dataset elaborato, Track 122, Frame 2709

Sensore	Data	Bn	Bt	Sensore	Data	Bn	Bt
ERS1	19920510	296,40	-1844.0	ERS2	19970910	577.82	105.0
ERS1	19920614	247,55	-1809.0	ERS2	19971015	371.71	140.0
ERS1	19920823	295,00	-1739.0	ERS2	19971119	555,44	175.0
ERS1	19920927	267,61	-1704.0	ERS2	19980128	56,76	245.0
ERS1	19921101	1110,16	-1669.0	ERS2	19980304	-490,66	280.0
ERS1	19921206	459,89	-1634.0	ERS2	19980408	-315,50	315.0
ERS1	19930110	-31,12	-1599.0	ERS2	19980513	840,24	350.0
ERS1	19930321	572,59	-1529.0	ERS2	19980617	1004,89	385.0
ERS1	19930425	1125,57	-1494.0	ERS2	19980722	-288,97	420.0
ERS1	19930704	-471,54	-1424.0	ERS2	19980826	207,68	455.0
ERS1	19930912	830,07	-1354.0	ERS2	19980930	918,15	490.0
ERS1	19931121	1045,65	-1284.0	ERS2	19981104	1098,86	525.0
ERS1	19950523	49,27	-736.0	ERS2	19981209	-556,77	560.0
ERS2	19950524	-35,89	-735.0	ERS2	19990324	-48,83	665.0
ERS1	19950627	-577,60	-701.0	ERS2	19990428	-359,53	700.0
ERS2	19950628	-672,69	-700.0	ERS2	19990602	990,64	735.0
ERS2	19950802	508,82	-665.0	ERS1	19990706	-255,41	769.0
ERS2	19960228	928,68	-455.0	ERS2	19990707	-340,25	770.0
ERS1	19960402	-53,57	-421.0	ERS2	19990811	1277,53	805.0
ERS2	19960403	-147,29	-420.0	ERS2	19990915	-326,56	840.0
ERS1	19960507	929,92	-386.0	ERS2	19991020	-260,43	875.0
ERS2	19960508	815,88	-385.0	ERS2	19991229	676,07	945.0
ERS1	19960611	-176,20	-351.0	ERS1	20000307	96,25	1014,0
ERS2	19960612	-273,94	-350.0	ERS2	20000308	210,61	1015,0
ERS2	19961204	-507,71	-175.0	ERS2	20000412	562,62	1050,0
ERS2	19970108	68,00	-140.0	ERS2	20000517	852,67	1085,0
ERS2	19970212	-287,62	-105.0	ERS2	20000621	-309,23	1120,0
ERS2	19970319	90,42	-70.0	ERS2	20000726	-112,58	1155,0
ERS2	19970423	-29,67	-35.0	ERS2	20000830	743,55	1190,0
<b>ERS2</b>	<b>19970528</b>	<b>0.00</b>	<b>0.0</b>	ERS2	20001004	120,95	1225,0
ERS2	19970702	-103,17	35.0	ERS2	20001108	664,15	1260,0
ERS1	19970805	-192,98	69.0	ERS2	20001213	361,21	1295,0
ERS2	19970806	194,10	70.0				

In totale, all'interno dell'archivio ESA-ERS, per questa combinazione Track-Frame sono disponibili 69 immagini. Nella Tabella 3.2-2 vengono riportate le informazioni relative alle 4 immagini non utilizzate all'interno di questo progetto corredate da una breve spiegazione del motivo che ne ha determinato l'esclusione.

Tabella 3.2-2 Dataset elaborato, Track 122, Frame 2709, immagini non utilizzate

Sensore	Data	Problema riscontrato
ERS-1	19951010	Scarsa qualità radiometrica
ERS-2	19960821	Presenza di Missing Lines
ERS-2	19991124	Elevato Baseline normale
ERS-2	20000202	Scarsa qualità radiometrica

In particolare le immagini 19951010, acquisita dal satellite ERS-1, e l'immagine 20000202, acquisita dal satellite ERS-2, non risultano conformi ai parametri di qualità richiesti per l'elaborazione del dato. L'acquisizione 19960821 è affetta da *Missing Lines*, ovvero il dato presenta dei "buchi" e quindi non è processabile. L'immagine 19991124 invece presenta un *baseline* geometrico troppo elevato, che compromette l'utilizzo di tale acquisizione per l'elevata deformazione prospettica.

### 3.3 L'AREA DI INTERESSE

L'area di interesse comprende le aree di pianura delle province di Ravenna e Forlì e Cesena, delimitate dalle Valli di Comacchio a nord e dalla via Emilia a ovest, e si protende verso sud fino a Cesenatico per un'estensione totale di circa 1700 Km<sup>2</sup>.

In Tabella 3.3-1 sono riportate le dimensioni dell'area effettivamente elaborata in geometria SAR, coordinate di *range* ed *azimuth*. Si sottolinea che, alle nostre latitudini, la direzione di *ground range* è inclinata di circa 13° rispetto alla direzione del Nord geografico, mentre la direzione di *azimuth* ha la medesima inclinazione però rispetto alla direzione Est.

Tabella 3.3-1 Estensione dell'area elaborata (la direzione di range è inclinata di circa 13° rispetto alla direzione del Nord geografico, mentre la direzione di azimuth ha la medesima inclinazione rispetto alla direzione Est)

Data set	Direzione di range	Direzione di azimuth	Estensione totale area SAR
Track 122 Frame 2709	~64 (Km)	~61 (km)	~3900 (Km <sup>2</sup> )

L'area riguardante il Mare Adriatico è stata successivamente mascherata per evitare inutili oneri computazionali.

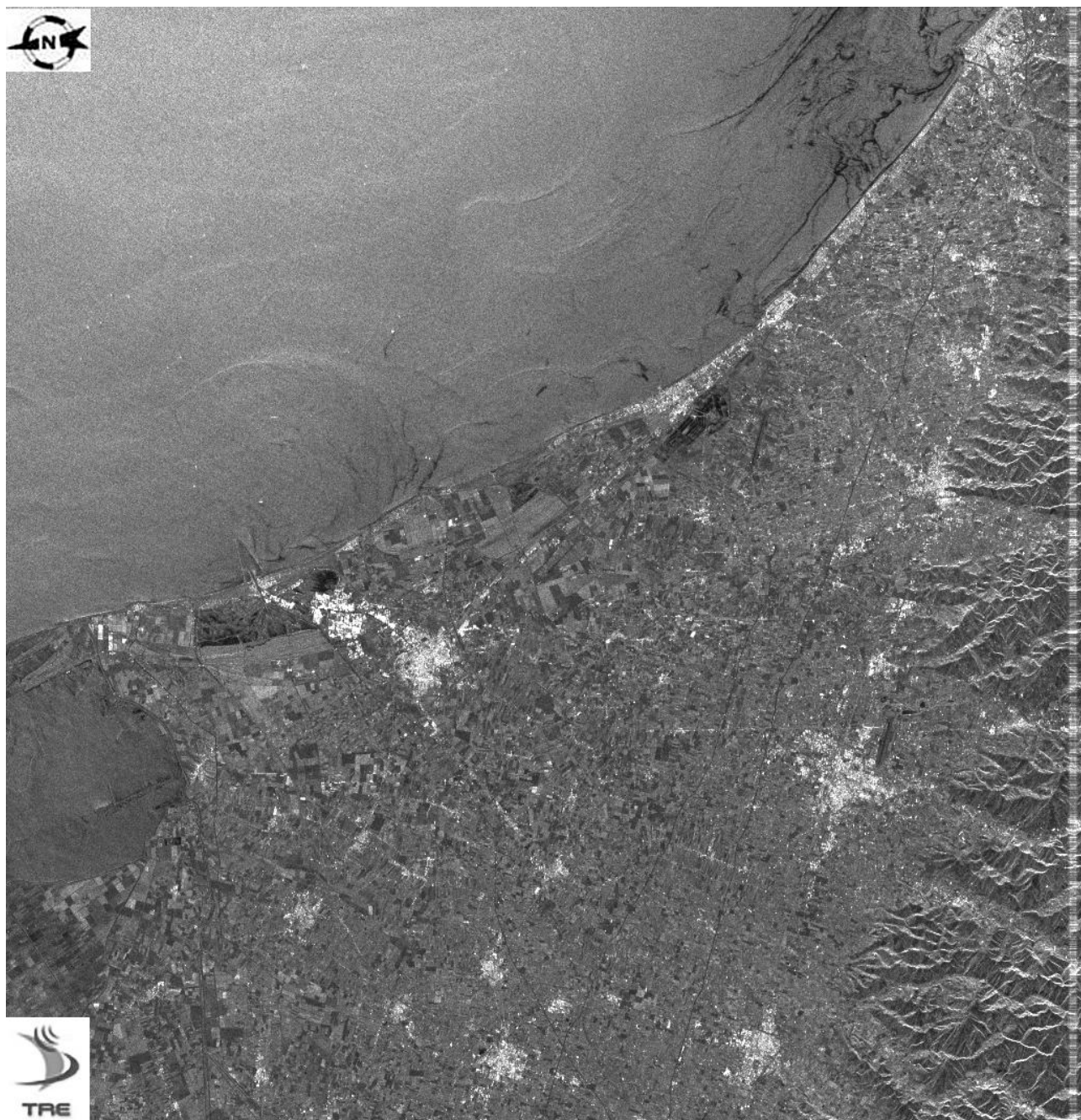
In Figura 3.4-1 è riportata l'immagine di ampiezza dell'acquisizione master che mostra l'intera area focalizzata in coordinate SAR. La direzione verticale corrisponde alla direzione di *ground range*, quella orizzontale alla direzione di *azimuth*, quindi, tenendo conto della geometria di acquisizione discendente, il Nord è a sinistra dell'immagine.

### 3.4 ELABORAZIONE

Dopo aver adattato i parametri HW e SW al caso in esame, l'elaborazione ha inizio con la selezione dell'immagine di riferimento, *Master*. La scelta è dettata dall'esigenza di minimizzare i fenomeni di decorrelazione. Si sceglie quindi l'immagine del dataset che minimizza la dispersione dei *baseline temporali* e *geometrici* delle altre immagini del dataset, definite *slaves*. È opportuno inoltre evitare di scegliere come *master* un'immagine acquisita in un giorno caratterizzato da intensi fenomeni di precipitazione, poiché il disturbo atmosferico ad essa associato potrebbe compromettere la qualità degli interferogrammi differenziali generati.

In Figura 3.4-1 è riportata la singola immagine *master* focalizzata.

Figura 3.4-1 Immagine di ampiezza focalizzata dell'acquisizione "master"



La 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.

Come accennato nel Paragrafo 2.5 la fase del segnale SAR racchiude l'informazione della distanza sensore-bersaglio. La generazione degli interferogrammi differenziali costituisce dunque il primo passo per determinare l'evoluzione della fase stessa e si ottiene mediante la moltiplicazione complessa ("battimento") tra tutte le coppie formate dall'immagine *master* con le immagini *slaves*, ottenendo così N-1 differenziali da N immagini del dataset.

I principali disturbi che affliggono e compromettono la corretta interpretazione della informazione contenuta nella fase sono i fenomeni di decorrelazione temporale e geometrica e i disturbi atmosferici.

Il primo obiettivo dell'analisi 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 caratterizzati da un comportamento puntiforme così da garantire una scarsa sensibilità alle variazioni del punto di vista del sensore nelle varie acquisizioni, descritte dal *baseline normale*.

Con i capisaldi individuati sarà successivamente possibile stimare il disturbo atmosferico e, una volta compensato, determinare le deformazioni in corso, ovvero le componenti della fase associabili al moto.

Lo studio si focalizza quindi sull'analisi statistica delle caratteristiche di pixel omologhi nelle diverse immagini, evidenziando i parametri più opportuni da utilizzare come soglie per discriminare gli effettivi *Permanent Scatterers* dagli altri pixel.

In Figura 3.4-2 è riportata la Mappa di Riflettività Multi-immagine della zona elaborata, ottenuta mediante un processo di media incoerente dei moduli delle 65 acquisizioni. Questa immagine mette in evidenza alcune caratteristiche della zona considerata, quali ad esempio la presenza di aree edificate, sulle quali è possibile trovare una buona densità di PS (Ravenna, Forlì e Cesena), e di zone affette da decorrelazione geometrica (Paragrafo 2.4) su cui non è possibile ottenere punti di misura (appartengono a questa tipologia tutte le creste dei rilievi presenti a destra nella figura).

Si notano anche delle zone scure che indicano parti di immagine a bassa riflettività, ovvero punti che hanno un basso valore di campo elettromagnetico retrodiffuso che tipicamente corrispondono a specchi d'acqua, fiumi o strade. Nella Figura 3.4-2 è ben visibile in basso, la foce del fiume Reno col suo bacino e i tracciati della Autostrada A14 e della Via Emilia che attraversa le varie città.

L'analisi statistica ha consentito l'individuazione di 14249 punti di misura che soddisfano i criteri di stabilità richiesti per le successive analisi di deformazione oggetto della seconda fase. In Figura 3.4-3 ne è rappresentata la posizione in geometria SAR.



Figura 3.4-2      Mappa di riflettività multi-immagine ottenuta utilizzando tutte le acquisizioni disponibili

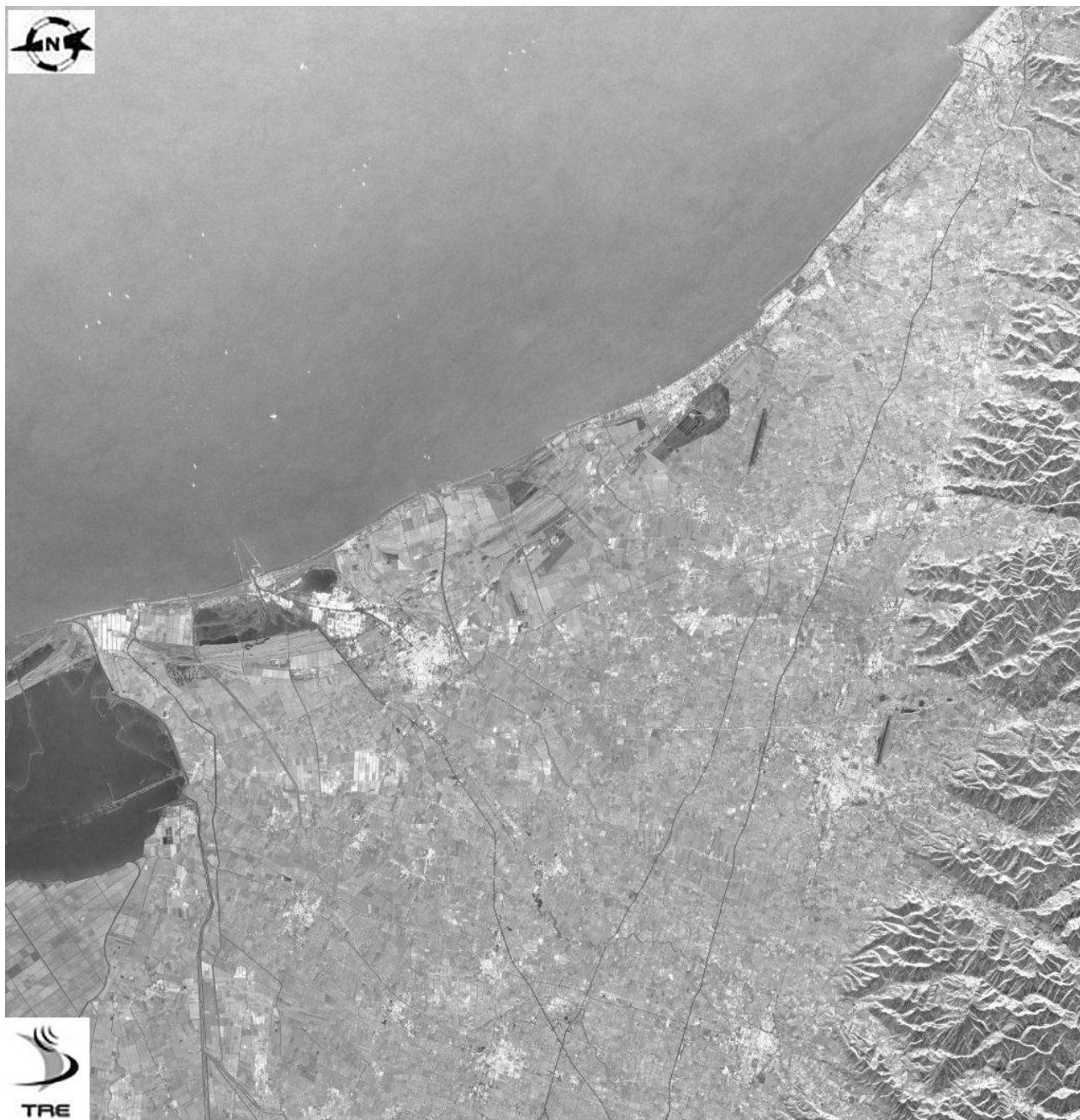
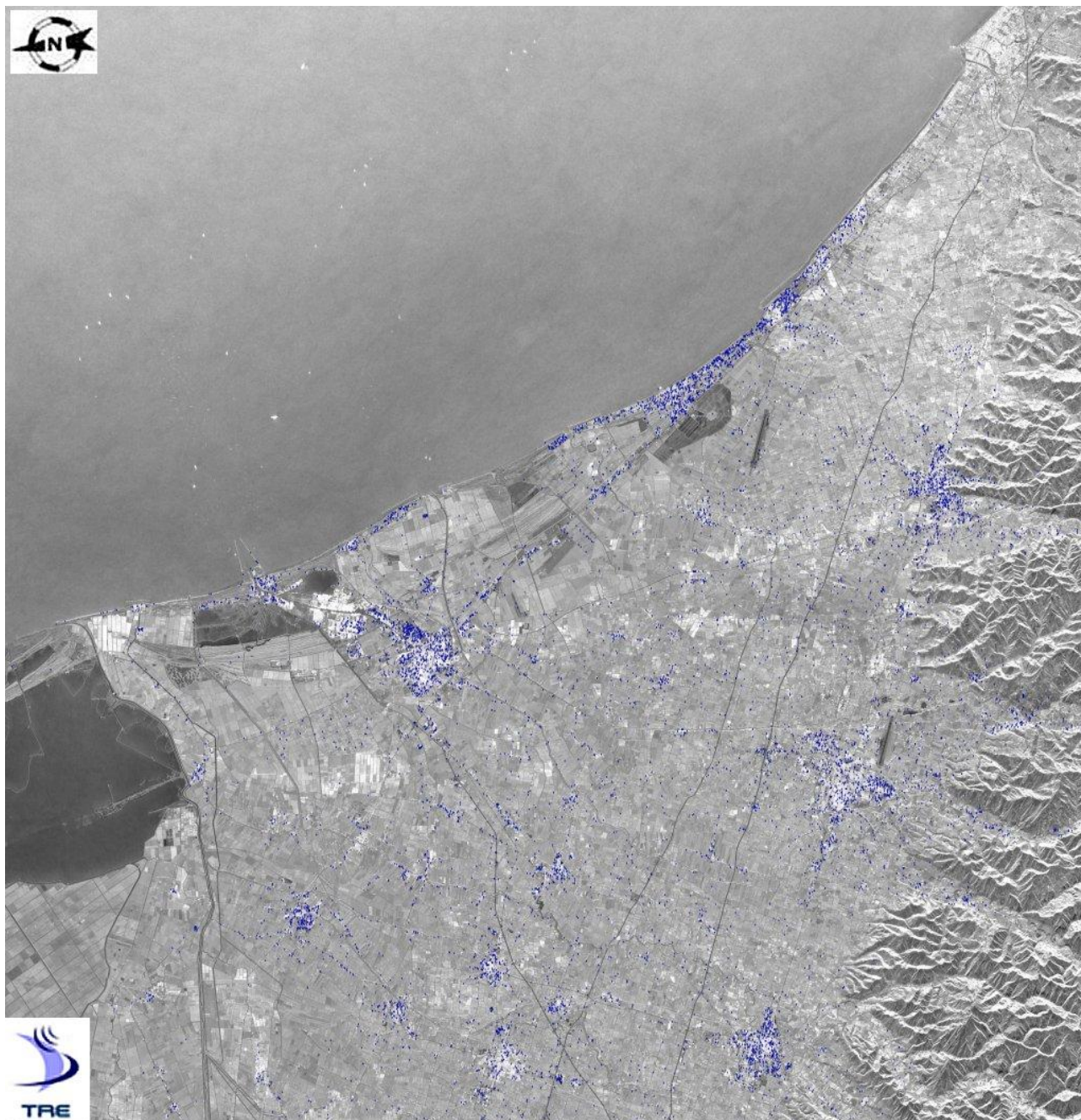


Figura 3.4-3      Posizione dei punti di misura affidabili con coerenza maggiore di 0,85 (coordinate SAR)





### 3.5 GEOCODIFICA E POSIZIONAMENTO

L'operazione di geocodifica consente di ricampionare i dati ottenuti in coordinate SAR su una griglia geografica (latitudine/longitudine). Per questo è necessario disporre di un punto di coordinate note in entrambe le geometrie che garantisca una corrispondenza tra i due sistemi di riferimento. Il punto noto denominato GCP (Ground Control Point) è stato individuato nelle vicinanze dell'abitato di Fosse Ghiaia ed è indicato in Tabella 3.5-1.

Tabella 3.5-1 Coordinate del GCP (Ground Control Point)

Latitudine	Longitudine	Range	Azimuth	Altitudine(slm)
44.34754	12.25575	3200	7750	30

Successivamente una conversione di coordinate permette di visualizzare i risultati sulla Carta Tecnica Regionale fornita da ARPA Regione Emilia Romagna.

Come descritto nel Paragrafo 2.7 è possibile definire un errore di posizionamento assoluto (rispetto al punto di riferimento utilizzato nell'elaborazione) e un errore di posizionamento relativo (tra PS vicini).

Individuando centinaia di punti in un'area limitata, l'errore sistematico, corrispondente ad una traslazione rigida dell'insieme dei punti, può essere facilmente identificato e corretto identificando delle corrispondenze tra il *pattern* di punti ed alcune caratteristiche peculiari dell'area analizzata, quali ad esempio una particolare disposizione di edifici, dei ponti o delle aree costiere o lungo dei corsi d'acqua.

L'errore di posizionamento relativo è dettato dalla risoluzione del sistema SAR utilizzato, ed è pari a  $\pm 10$  m nella direzione di range (direzione est-ovest), e  $\pm 2$  m nella direzione di azimuth (direzione nord-sud).

La distribuzione dei PS è risultata maggiormente concentrata nelle aree urbanizzate, in particolare nei comuni di Ravenna, Forlì e Cesena, come era lecito attendersi.

Nelle figure seguenti viene mostrata la distribuzione dei PS georeferenziata e sovrapposta alle Carte Tecniche Regionali in scala 1:5000.

Data la particolare estensione della zona in esame la rappresentazione della totalità dei punti di misura stabili è stata suddivisa in due parti, nella Figura 3.5-1 è mostrata la porzione di territorio più a settentrione (coincidente con la provincia di Ravenna) mentre nella Figura 3.5-2 viene mostrata la provincia di Forlì-Cesena.

Figura 3.5-1 Posizione geocodificata dei capisaldi radar individuati sull'area di interesse, parte settentrionale

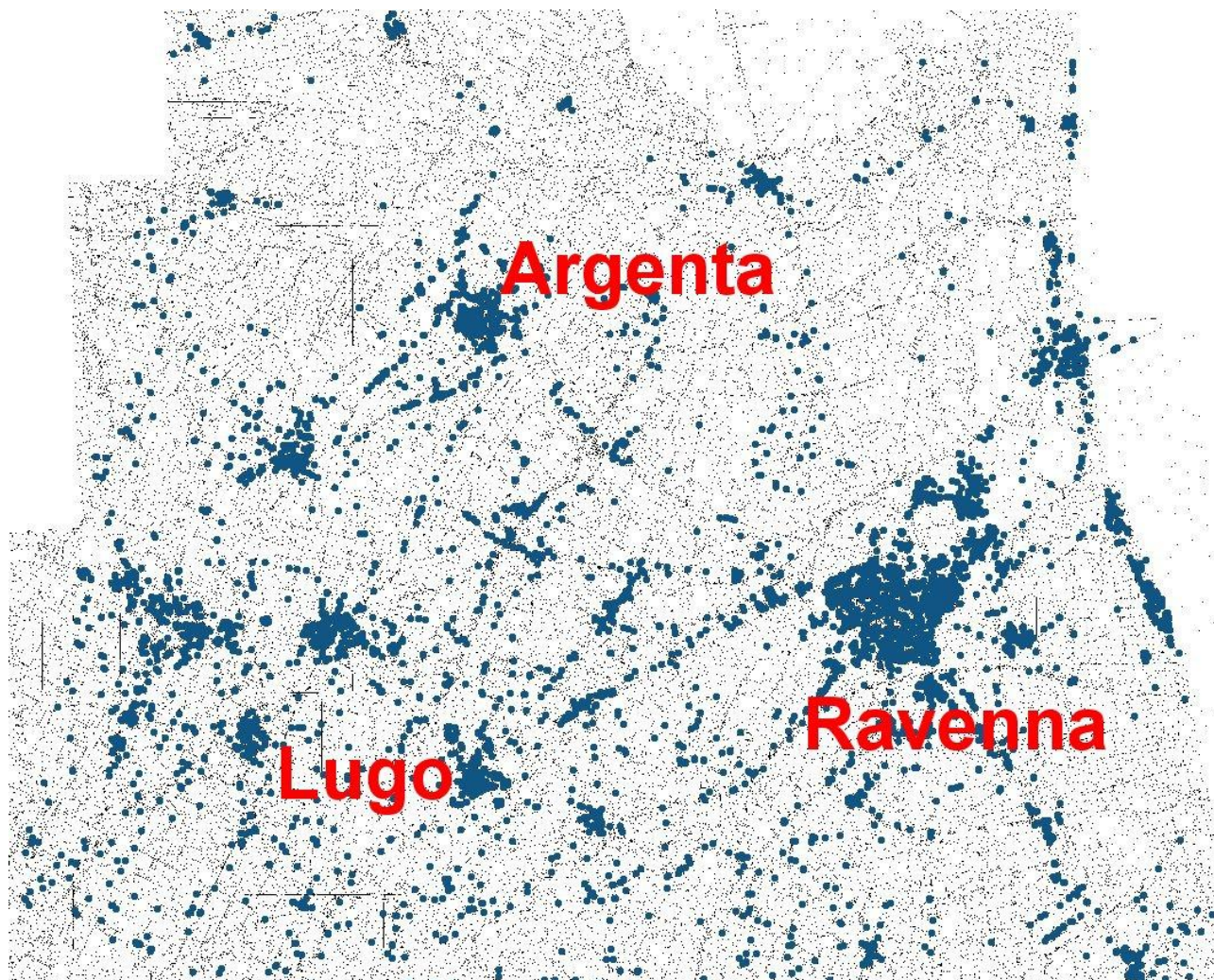
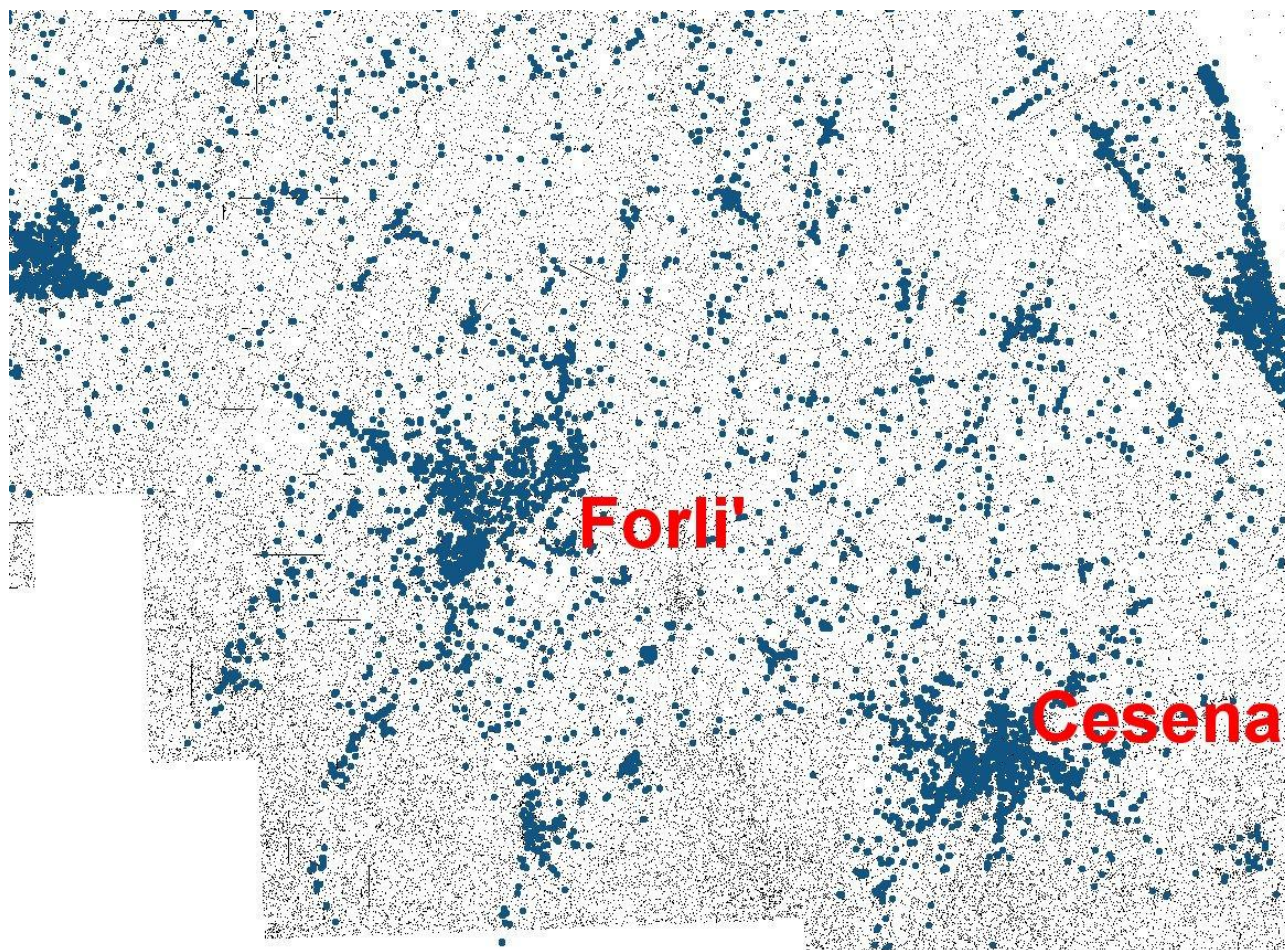




Figura 3.5-2 Posizione geocodificata dei capisaldi radar individuati sull'area di interesse, parte meridionale



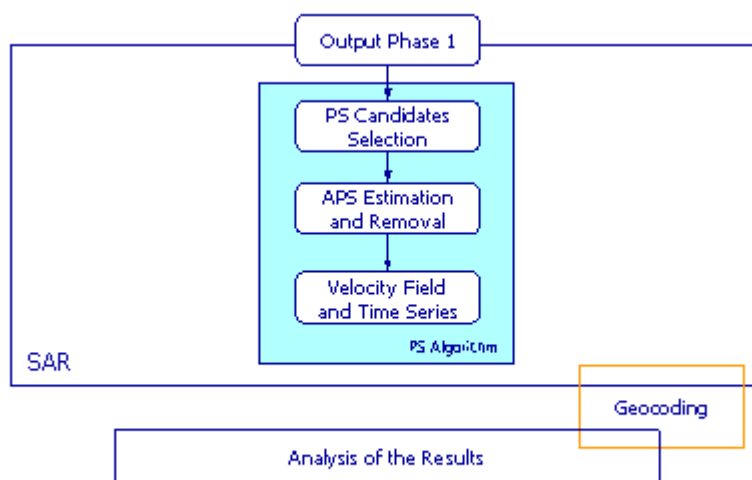
## 4. SPSA STANDARD PS ANALYSIS

### 4.1 SECONDA FASE DELL'ELABORAZIONE CON TECNICA PS

Sulla base di quanto determinato con la prima parte dell'analisi, l'obiettivo della seconda fase è quello di stimare correttamente la componente atmosferica che interessa la fase del segnale radar in modo tale da poter evidenziare solamente i contributi che descrivono il moto dei *Permanent Scatterers* individuati.

In Figura 4.1-1 il diagramma di flusso dei principali passi che costituiscono l'analisi PS.

Figura 4.1-1 Diagramma a blocchi della seconda fase dell'elaborazione con Tecnica PS



### 4.2 STIMA E RIMOZIONE DEL DISTURBO ATMOSFERICO

Il cuore dell'algoritmo della Tecnica PS consiste nella stima del contributo atmosferico presente su ogni acquisizione, per procedere alla successiva compensazione dello stesso e quindi alla determinazione dei termini di fase che descrivono il moto dei Permanent Scatterers.

L'elaborazione risulta essere molto onerosa in termini computazionali, per questo non viene condotta estensivamente su tutti i punti individuati nella prima fase, ma su di un loro sottoinsieme costituito da quelli migliori. A questo insieme di punti ci si riferisce generalmente con il nome di *cluster di PSC* (PSC è acronimo di Permanent Scatterers Candidates). Inoltre, grazie all'osservazione che le caratteristiche del disturbo atmosferico variano lentamente in termini spaziali intorno a ciascun bersaglio radar, ovvero l'atmosfera ha un comportamento di tipo passa-basso spaziale, l'informazione ricavata per il *cluster* può essere estesa a tutta l'immagine, consentendo così di stimare correttamente l'intero contributo atmosferico. Nel corso di questa analisi viene individuato un punto utilizzato come riferimento che viene assunto essere fermo ed esente da errori di quota, a cui sono riferite tutte le altre misure (si ricorda che i risultati della Tecnica PS sono relativi, riferiti temporalmente alla data di acquisizione dell'immagine master, e spazialmente al punto di riferimento scelto nel cluster).

Al termine della stima e rimozione del disturbo, è possibile effettuare una valutazione dell'errore dovuto al contributo atmosferico residuo, che, come descritto nel Paragrafo 2.7, produce una

progressiva riduzione dell'accuratezza con cui vengono stimate la velocità del punto al crescere della distanza dal punto di riferimento. Questa informazione è riportata in Figura 4.2-1, dove sulla mappa di riflettività multi-immagine è stata sovrapposta, con una adeguata scala colori, la deviazione standard dei valori di velocità ed errore di quota stimati per ogni punto appartenente al *cluster*.

Una volta stimato il contributo atmosferico per ogni immagine che costituisce il data-set, è possibile rimuoverlo e procedere a con l'analisi puntuale dei capisaldi radar per cui è possibile estrarre informazioni di movimento.

Il parametro che descrive la qualità delle misure effettuate è la **coerenza**, indice normalizzato tra 0 e 1 che risulta ora essere legato anche alla deviazione standard del rumore di fase del punto. 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 falso allarme si intende la possibilità che una sequenza di rumore venga interpretata come movimento.

Nel caso in esame i 14249 punti ottenuti nella prima fase risultano avere una coerenza superiore a 0.85, garantendo una probabilità di falso allarme ben inferiore agli standard imposti ( $10^{-5}$ ).

In Figura 4.2-2 viene rappresentata, mediante scala colori, le velocità di questi punti sovrapposta alla mappa di riflettività multi-immagine.

Per i Permanent Scatterers ad alto rapporto segnale rumore, in totale 1936 con indice di affidabilità maggiore di 0.92, è stata estratta la serie storica di deformazione. Essa rappresenta, acquisizione per acquisizione, l'evoluzione della distanza sensore-bersaglio (nella direzione di LOS) del punto in esame. Lo spostamento che viene associato a ciascuna acquisizione, espresso in mm, è uno spostamento differenziale riferito allo stesso punto di riferimento con cui si stima il contributo atmosferico.



Figura 4.2-1 Deviazione standard dei valori di velocità stimati (in mm/anno) e di quota (in m)

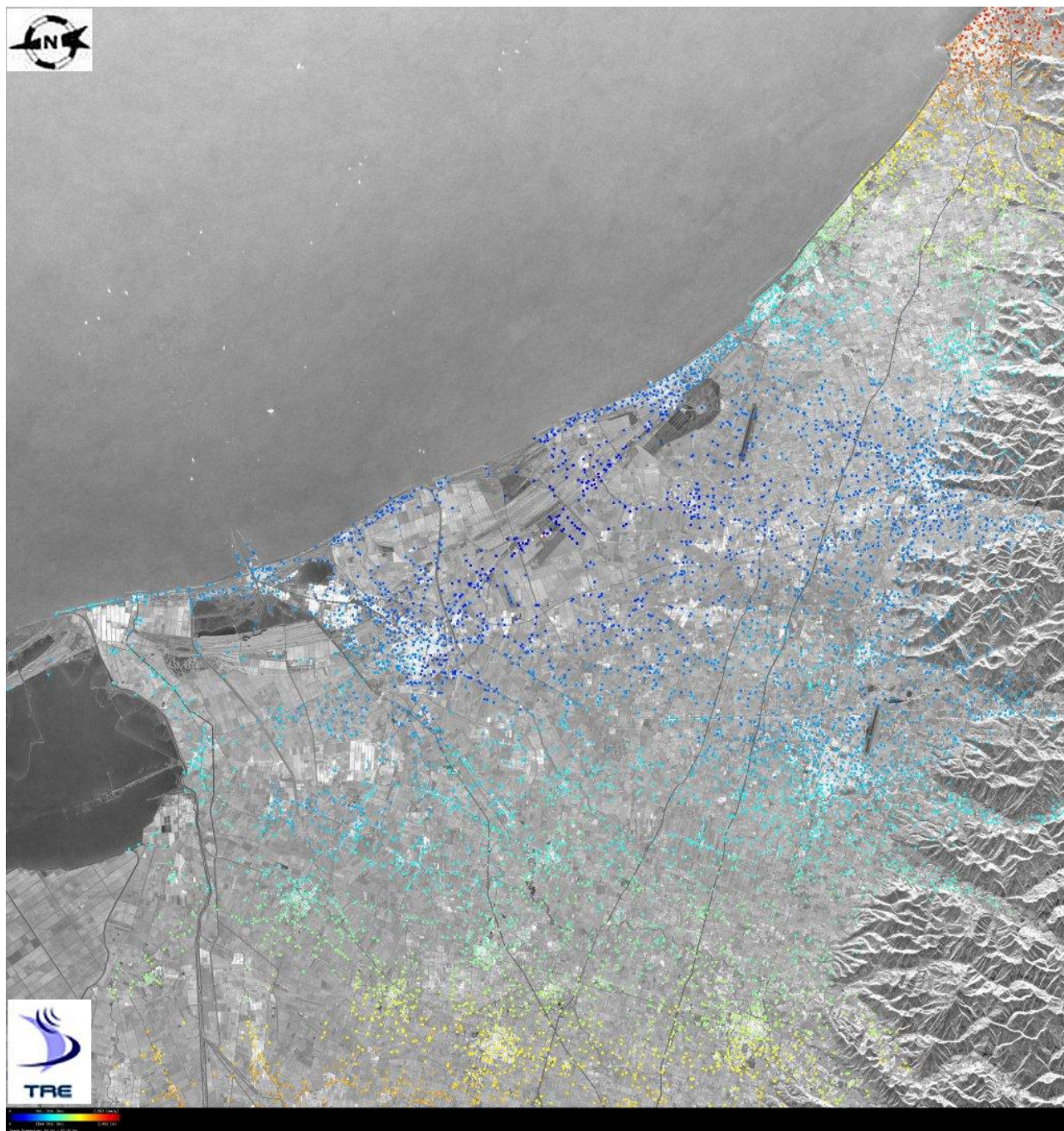
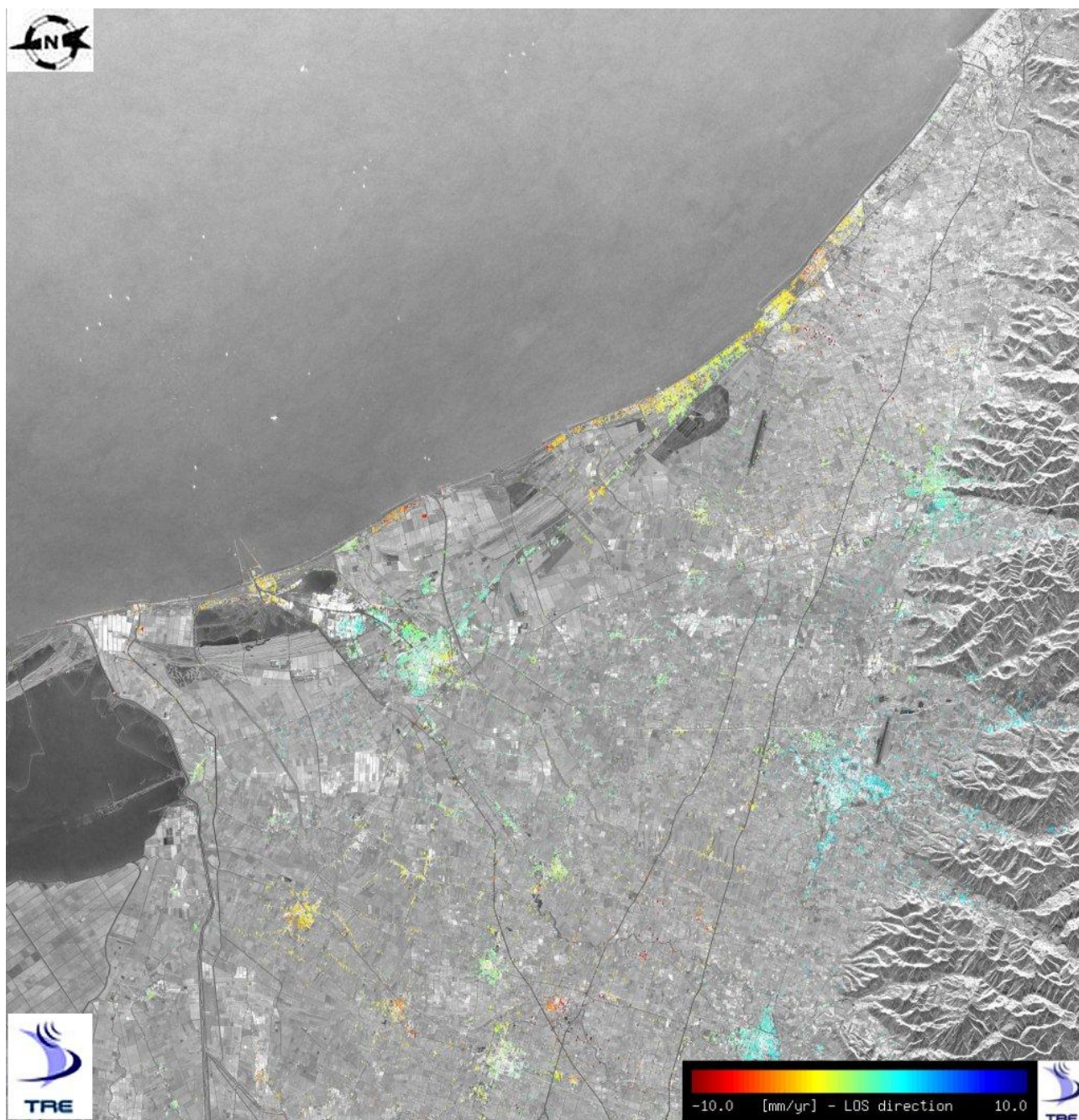




Figura 4.2-2 Velocità dei capisaldi radar con indice di affidabilità maggiore di 0.85 individuati nell'area elaborata (coordinate SAR)



### 4.3 RISULTATI CONSEGUITI

I risultati dell'elaborazione svolta mediante la tecnica PS relativamente all'area di interesse sono contenuti nei file di seguito descritti.

Tabella 4.3-1 Elenco dei database contenenti i risultati

Nome File	Descrizione
Bacini_Romagnoli_085_posPS_GB_allineato.dbf	DBF contenente le informazioni geografiche dei capisaldi radar relativi alla Track 122 – Frame 2709.
Bacini_Romagnoli_085_VelPS_GB_traslato.dbf	DBF contenente le informazioni di velocità di deformazione dei capisaldi radar relativi alla Track 22 – Frame 2691.
Bacini_Romagnoli_092_ts_gb_traslato.dbf	DBF contenente le serie temporali dei capisaldi radar ad alta affidabilità relativi alla Track 122 – Frame 2709.
REF_Bacini_Romagnoli_GB_traslato.dbf	DBF contenente le informazioni del punto di riferimento utilizzato nella Track 122 – Frame 2709.

Il primo file DBF contiene i risultati della prima fase dell'analisi (individuazione e localizzazione dei Permanent Scatterers) eseguita sull'area di interesse; contiene un record per ogni punto di misura analizzato (PS) caratterizzato dalle seguenti informazioni:

1. Codice PS: codice alfanumerico che permette di identificare univocamente il punto di misura all'interno del dbf. Il punto di riferimento del dbf presenta in questo campo il valore **“REF”**.
2. Coordinata Nord: coordinata nord del PS espressa nel sistema di riferimento Gauss-Boaga utilizzato per le CTR forniteci.
3. Coordinata Est: coordinata est del PS espressa nel sistema di riferimento Gauss-Boaga utilizzato per le CTR forniteci.

Il secondo file DBF contiene le velocità medie annue calcolate sull'intero arco temporale (1992-2000) dei PS individuati. Oltre alle coordinate del punto e al suo codice contiene molte altre informazioni utili alla caratterizzazione del punto di misura stabile in oggetto. Queste informazioni sono raccolte in 8 campi:

1. Codice PS: codice esadecimale che permette di identificare univocamente il punto di misura all'interno del dbf. Il punto di riferimento del dbf presenta in questo campo il valore **“REF”**.
2. Coordinata Nord: coordinata nord del PS espressa nel sistema di riferimento Gauss-Boaga opportunamente traslata per ottenere la corrispondente coordinata nel sistema UTM ED 50 fuso 32.
3. Coordinata Est: coordinata est del PS espressa nel sistema di riferimento Gauss-Boaga opportunamente traslata per ottenere la corrispondente coordinata nel sistema UTM ED 50 fuso 32.
4. Altezza: elevazione relativa del caposaldo radar (in metri).
5. Vel: velocità media del PS espressa in mm/anno (valutata rispetto al punto di riferimento).
6. Coer: indice di affidabilità delle misurazione (numero compreso tra 0 e 1).
7. Range: coordinata SAR di range.
8. Azimuth: coordinata SAR di azimuth.

Il terzo file dbf contiene, oltre alle informazioni già descritte per gli altri file, anche la serie temporale del punto, cioè l'evoluzione della distanza sensore-bersaglio lungo la *Line Of Sight* (*L.O.S.*) in corrispondenza delle acquisizioni dell'area in esame e riferite ad un punto supposto fermo.

Si ricorda che la *L.O.S.* è inclinata rispetto alla verticale di circa 23 gradi e quindi la velocità stimata è molto sensibile alla componente verticale.



Il numero di campi contenuti in una linea di questo file sarà quindi pari a: 8 + numero di immagini del data-set. Gli spostamenti lungo la *L.O.S.* sono ordinati cronologicamente ed espressi in millimetri.

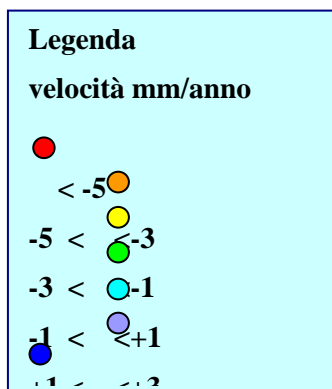
Il quarto file dbf contiene le informazioni relative al punto di riferimento supposto fermo, in modo da avere una rapida visualizzazione dello stesso in ambiente GIS.

#### 4.4 ESEMPI DI RISULTATI OTTENUTI

In Figura 4.4-2 e Figura 4.4-3 vengono presentate le velocità di deformazione stimate per i punti di misura permanenti (PS) individuati nella zona di interesse. Queste figure, create in ambiente GIS, sono il risultato dell'operazione di geocodifica, eseguita come descritto nel Paragrafo 3.5. Anche per queste rappresentazioni, come per quella di Figura 3.5-1 e Figura 3.5-2, si è preferito dividere in due parti la zona oggetto di studio per una più comoda visualizzazione.

Le velocità di deformazione stimate vengono riprodotte in queste figure, come nelle successive, tramite un codice colori riprodotto in Figura 4.4-1. Esso identifica con i colori giallo, arancione e rosso subsidenze di intensità crescente, con il verde terreno sostanzialmente stabile (moti tra -1 e 1 millimetro/anno) e varie tonalità di blu per gli innalzamenti.

Figura 4.4-1 Codice colore utilizzato per la rappresentazione della velocità di deformazione superfiale



L'elaborazione del data-set Track 122 – Frame 2709 non ha presentato problemi di rilievo. Per l'analisi dei movimenti superficiali è stato possibile impiegare 65 immagini sulle 69 disponibili nell'archivio ESA-ERS. L'elaborazione ha portato alla individuazione di **14249 punti di misura** che coprono un'area di circa 1700 Km<sup>2</sup>.

Figura 4.4-2 Velocità di deformazione geocodificata dei capisaldi radar individuati sull'area di interesse, parte settentrionale

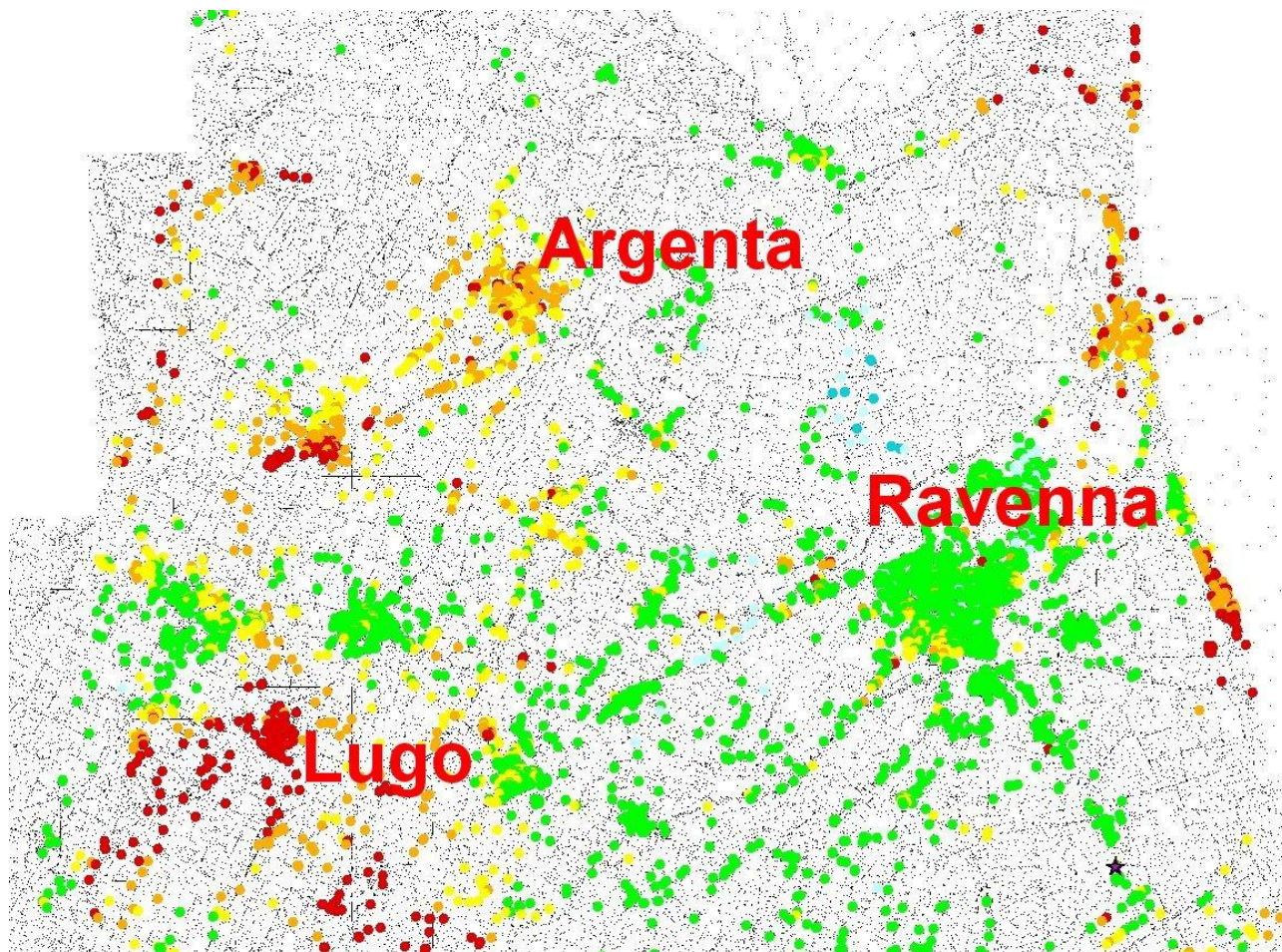
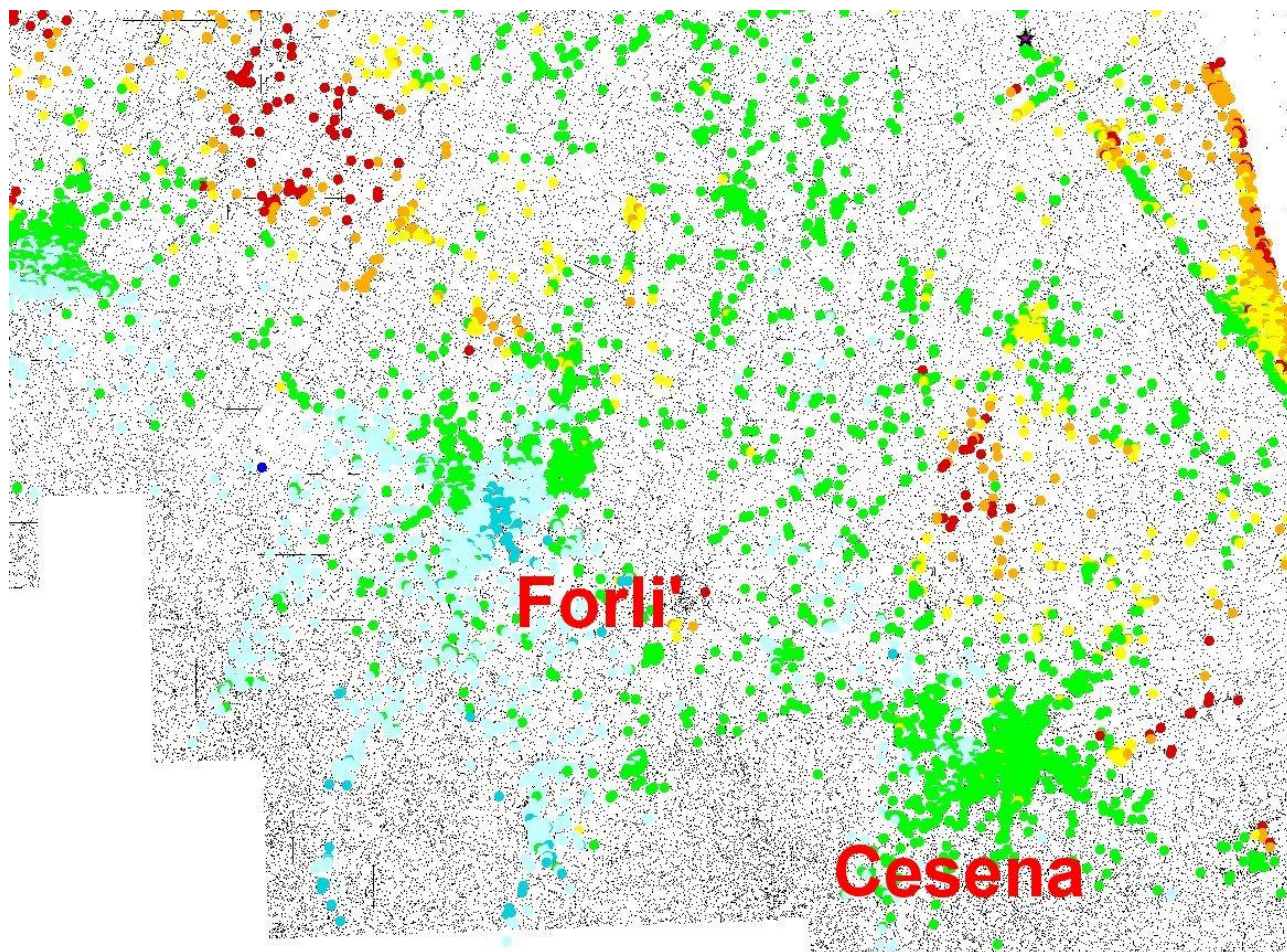




Figura 4.4-3 Velocità di deformazione geocodificata dei capisaldi radar individuati sull'area di interesse, parte meridionale



Nelle figure seguenti vengono proposti una serie di dettagli su alcune zone che mostrano movimenti superficiali significativi. Come layer di sfondo delle figure seguenti sono state utilizzate le ortofoto di ARPA Emilia Romagna.

Per ogni zona vengono selezionati a campione alcuni capisaldi radar significativi e ne vengono rappresentate le serie temporali, ovvero la stima degli spostamenti subiti dal punto in esame lungo la congiungente sensore-bersaglio (*LOS – Line of Sight*). Il grafico della serie storica degli spostamenti può essere utile per approfondire nel dettaglio il comportamento del punto, lineare o meno, regolare o accelerato.

La Figura 4.4-4 mostra la posizione del punto di riferimento utilizzato, supposto fermo per la stima delle velocità di deformazione superficiale dell'intera area di interesse.

Nella Figura 4.4-5 viene mostrato il campo di deformazione superficiale relativo all'abitato di **Marina di Ravenna**. I dati elaborati mettono in evidenza un significativo movimento di deformazione relativa di tutti i manufatti identificati come PS. In particolare il movimento sembra accentuarsi verso la parte Est dell'area di interesse, raggiungendo i massimi valori di subsidenza in corrispondenza della costa Adriatica.

Da Figura 4.4-6 a Figura 4.4-9, per meglio evidenziare le considerazioni fatte precedentemente, vengono presentate le serie storiche dei punti di misura corrispondenti ai bersagli radar segnalati in Figura 4.4-5, che mettono in luce come questa zona sia affetta da un tasso di deformazione medio che si attesta attorno ai -4 mm/anni. La minima velocità registrata in questa zona, all'imboccatura del canale rilevata nel punto AA856, è di -1,63 mm/anno, mentre la velocità massima di -6,96 mm/anno è stata registrata nel punto AA567.

Il dettaglio riportato in Figura 4.4-10 riguarda il territorio adiacente i due centri urbani di **Lugo** e **Russi**, situati a ovest della città di **Ravenna**. Questa zona è particolarmente interessante in quanto costituisce un esempio tipico di subsidenza urbana. Procedendo da Est a Ovest si nota come le velocità di deformazione passino da un valore praticamente nullo (punti verdi nell'abitato di **Russi**) fino ad assumere velocità maggiori (in valore assoluto) di 5 mm/anno per poi tornare a valori vicini allo zero (o comunque inferiori in valore assoluto a 1 mm/anno) a Sud-Ovest dei centri abitati. Queste considerazioni vengono confermate dallo studio delle serie storiche di deformazione presentate da Figura 4.4-11 a Figura 4.4-18. Come si nota la velocità dei punti AJ501 e AJ507 (serie storiche di deformazione in Figura 4.4-17 e Figura 4.4-18) e del punto AL948 (serie storica in Figura 4.4-14) è prossima allo zero, segno di sostanziale stabilità della zona. Procedendo verso Ovest le velocità di deformazione superficiale si alzano in valore assoluto, ad esempio i punti AJ602 e AJ606 (serie storiche in Figura 4.4-15 e Figura 4.4-16) posizionati subito a Nord dell'abitato di **Russi** hanno una velocità di circa -5,7 mm/anno. Il punto AK547, posizionato all'interno dell'abitato di **Lugo**, la cui serie temporale è rappresentata in Figura 4.4-11 ha una velocità di -7,13 mm/anno. Le velocità di deformazione aumentano ancora procedendo verso Sud-Ovest, fino ad arrivare al punto AM398 (serie storica in Figura 4.4-13) con velocità -8,18 mm/anno. Successivamente le velocità di deformazione cominciano a diminuire in valore assoluto come dimostra la velocità, -1,83 mm/anno, e la serie storica, in Figura 4.4-12, del punto AM323. Nella Figura 4.4-19 viene presentato un particolare dell'area elaborata relativo alla zona dell'abitato di **Cesenatico**. Anche in questo caso si nota un aumento del movimento di subsidenza avvicinandosi alla costa Adriatica. Inoltre si può ipotizzare una sorta di epicentro del movimento situato vicino al caposaldo AT268 (serie storica in Figura 4.4-24, velocità di deformazione di -6,28 mm/anno). Allontanandosi da tale PS, in direzione Nord e Sud, si nota una diminuzione progressiva delle velocità di deformazione superficiale, fino ad arrivare a velocità praticamente nulle (punti verdi). Muovendosi lungo questa linea si incontrano i punti AV348 a Sud (serie storica in Figura 4.4-22 con velocità -3,03 mm/anno) e AR796 a Nord (serie storica in Figura 4.4-23 e velocità pari a -2,56 mm/anno). Procedendo invece nell'entroterra il movimento di subsidenza sembra incrementare, in valore assoluto, la sua velocità. In una linea parallela a quella appena descritta si incontrano i punti AT105 (serie storica in Figura 4.4-21 e velocità di -6,59 mm/anno), AU080 (serie storica in Figura 4.4-25 e velocità di -4,65 mm/anno) e il punto AW237 (serie temporale in Figura 4.4-20 e velocità di -10 mm/anno).

La Figura 4.4-26 mostra un dettaglio relativo alle zone circostanti la città di **Cesena**. A fronte di una sostanziale stabilità della zona urbana della città si può notare una differenza tra i moti relativi della periferia esterna. Infatti nella zona Est si possono riconoscere dei PS affetti da subsidenza (crescente in valore assoluto allontanandosi dal centro abitato principale) mentre nella zona Ovest si riscontrano capisaldi radar affetti da moti con velocità di deformazione positive. Le serie storiche di deformazione proposte da Figura 4.4-27 a Figura 4.4-32 mettono in risalto questa considerazione. Si passa dalla velocità di -3,24 del punto AY190 alle velocità di circa +1,5 mm/anno dei punti AW875 (periferia nord), AZ332 (Ovest) e BB024 (Sud-Ovest).

In Figura 4.4-33 è infine rappresentato un particolare del centro della città di **Cesena**, che mette bene in evidenza la differenza dei moti tra la città e le immediate vicinanze.

Ovviamente questi dettagli non sono esaustivi di tutti i movimenti presenti su questa ampia zona di interesse, ma possono sicuramente rendere l'idea della qualità del risultato ottenuto e dell'ampia gamma di fenomeni monitorabili con l'utilizzo della tecnica PS. Si ricorda infine che tutte le misure di velocità sono differenziali e riferite ad un punto (detto punto di riferimento) supposto fermo. Disponendo di altri dati, provenienti anche da altre tecniche di monitoraggio, relativi al movimento del punto supposto fermo, tutte le velocità calcolate possono essere scalate rigidamente per adattarle alle informazioni note.



Figura 4.4-4 Posizione del punto di riferimento utilizzato per la stima delle velocità di deformazione superficiale nell'area di interesse



Figura 4.4-5 Velocità di deformazione superficiale nell'area di Marina di Ravenna

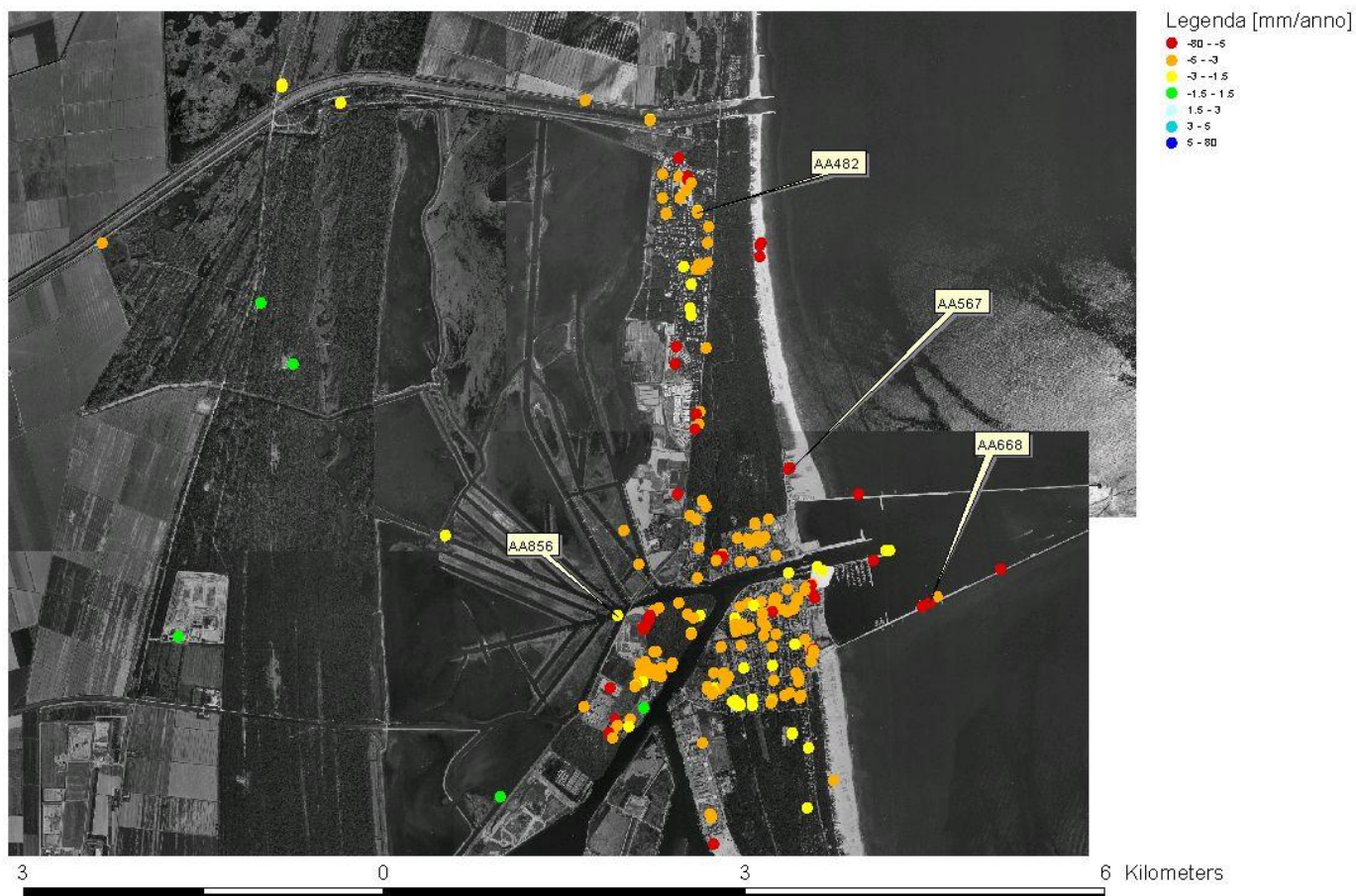


Figura 4.4-6 Serie storica del punto AA482. L'asse delle ordinate è espresso in millimetri e la velocità media di deformazione in mm/anno

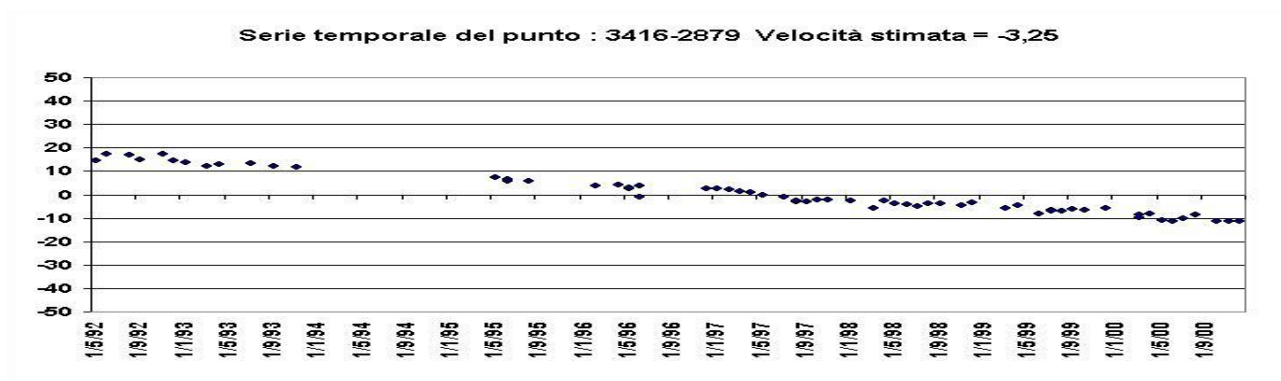


Figura 4.4-7 Serie storica del punto AA567. L'asse delle ordinate è espresso in millimetri e la velocità media di deformazione in mm/anno

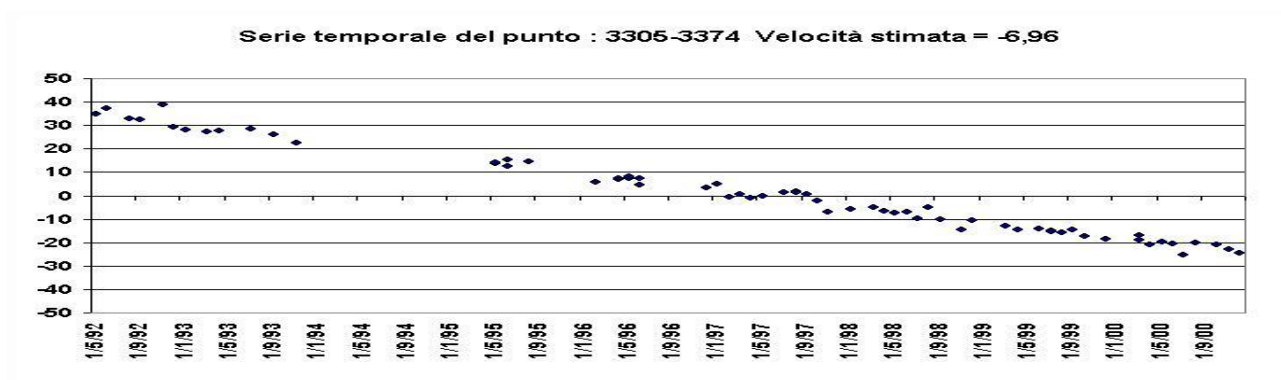


Figura 4.4-8 Serie storica del punto AA668. L'asse delle ordinate è espresso in millimetri e la velocità media di deformazione in mm/anno

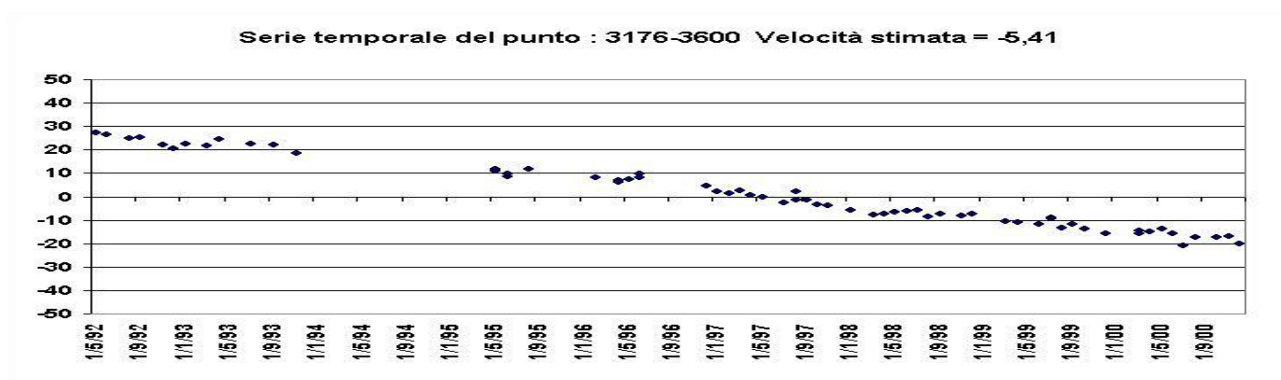




Figura 4.4-9 Serie storica del punto AA856. L'asse delle ordinate è espresso in millimetri e la velocità media di deformazione in mm/anno

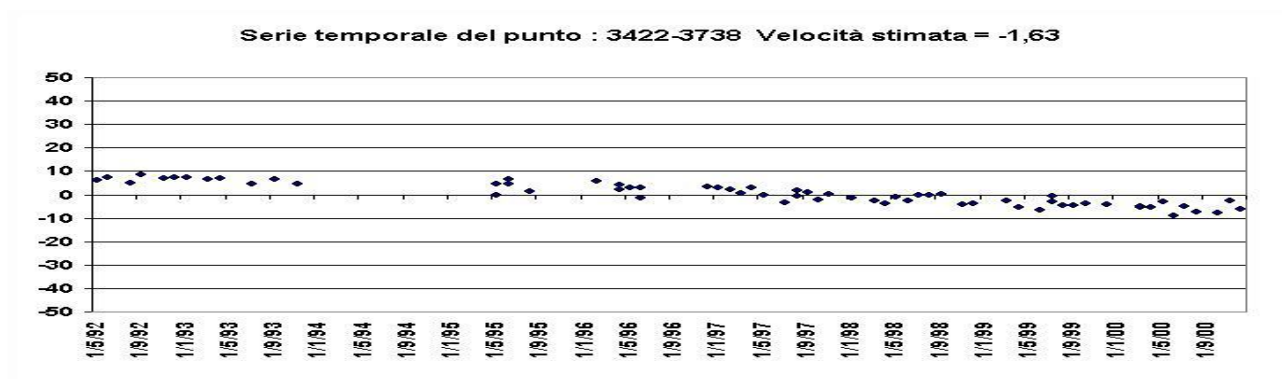


Figura 4.4-10 Velocità di deformazione superficiale nelle vicinanze delle città di Lugo e Russi

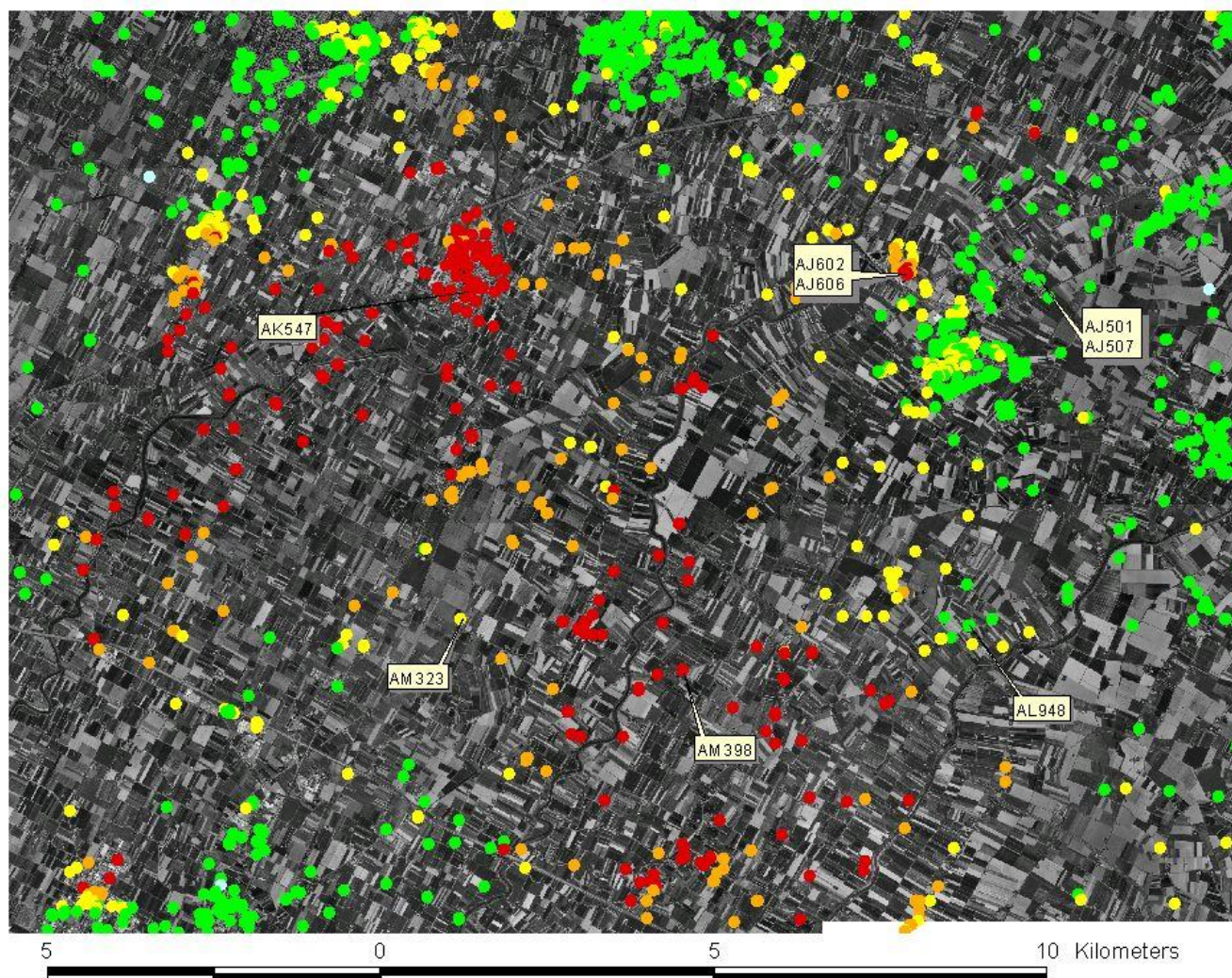


Figura 4.4-11 Serie storica del punto AK547. L'asse delle ordinate è espresso in millimetri e la velocità media di deformazione in mm/anno

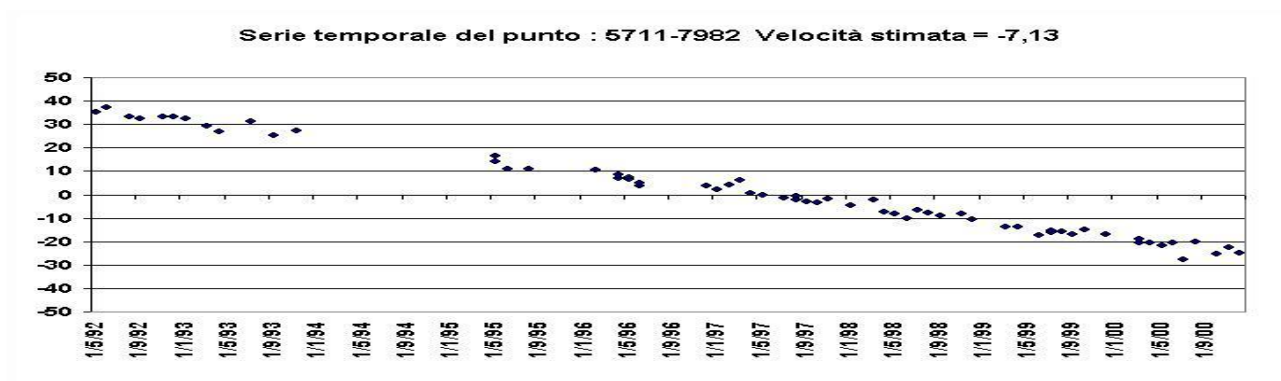


Figura 4.4-12 Serie storica del punto AM323. L'asse delle ordinate è espresso in millimetri e la velocità media di deformazione in mm/anno

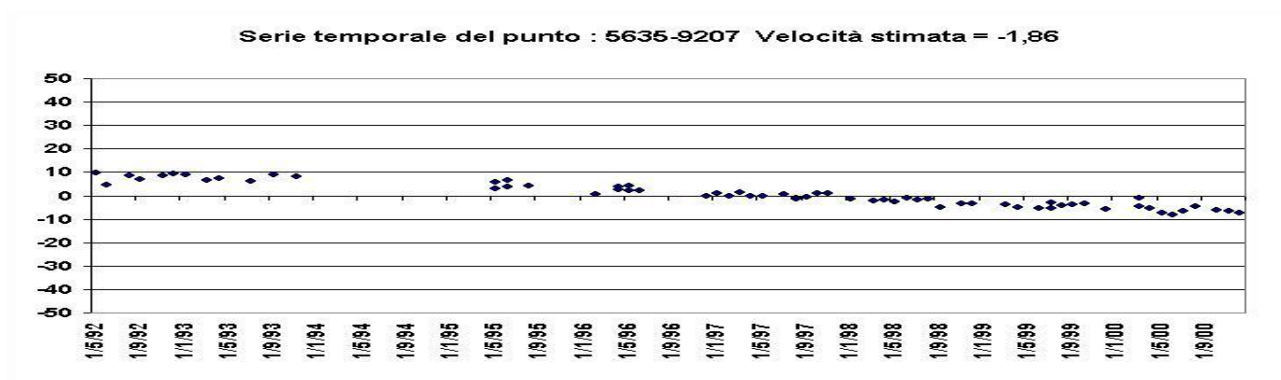


Figura 4.4-13 Serie storica del punto AM398. L'asse delle ordinate è espresso in millimetri e la velocità media di deformazione in mm/anno

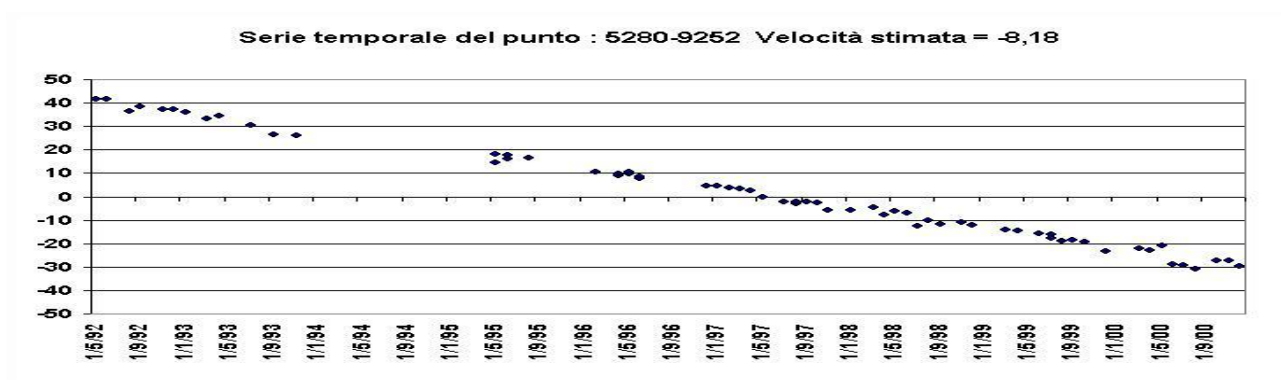




Figura 4.4-14 Serie storica del punto AL948. L'asse delle ordinate è espresso in millimetri e la velocità media di deformazione in mm/anno

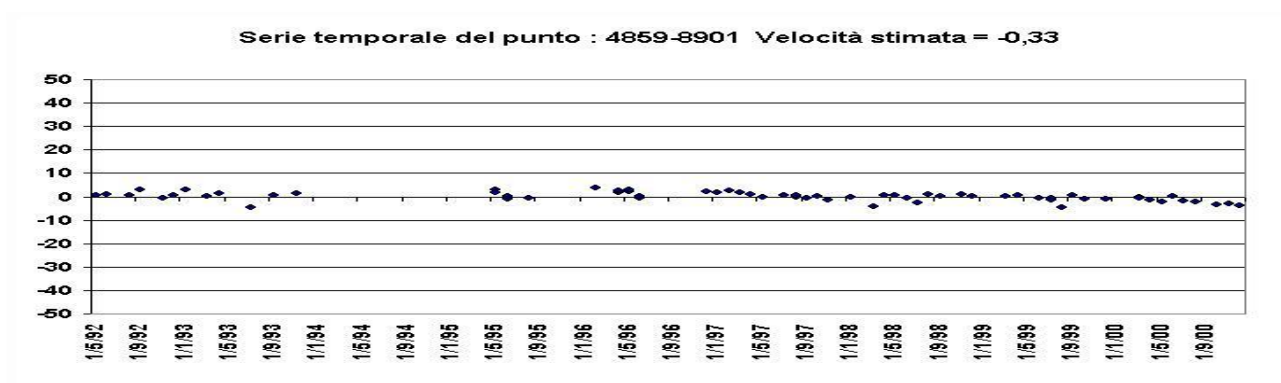


Figura 4.4-15 Serie storica del punto AJ602. L'asse delle ordinate è espresso in millimetri e la velocità media di deformazione in mm/anno

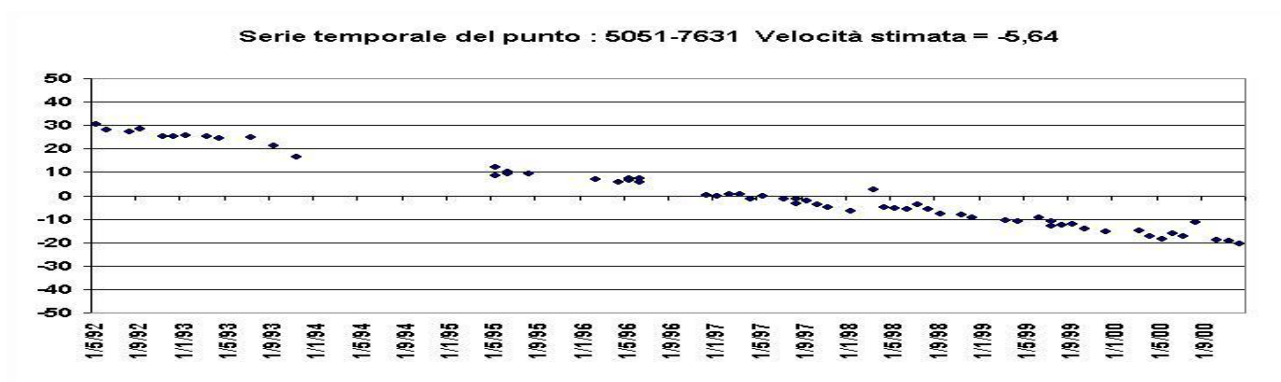


Figura 4.4-16 Serie storica del punto AJ606. L'asse delle ordinate è espresso in millimetri e la velocità media di deformazione in mm/anno

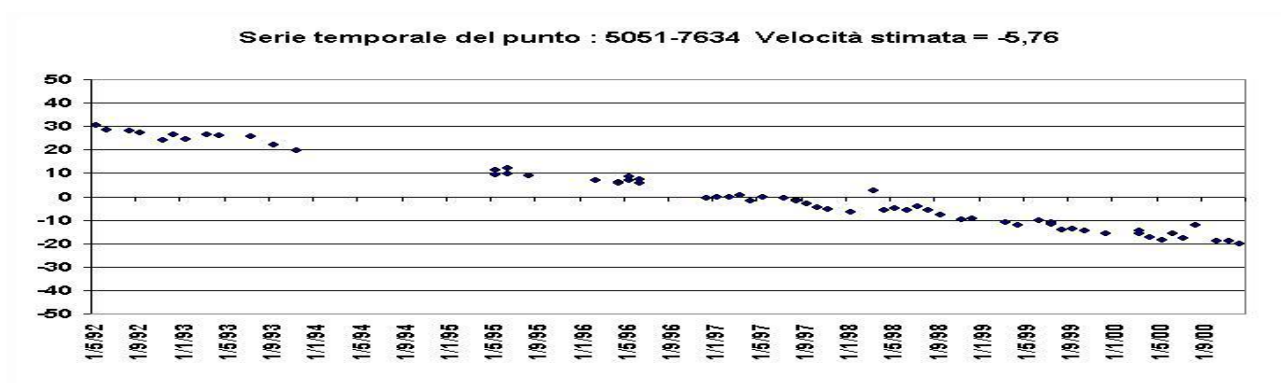




Figura 4.4-17 Serie storica del punto AJ501. L'asse delle ordinate è espresso in millimetri e la velocità media di deformazione in mm/anno

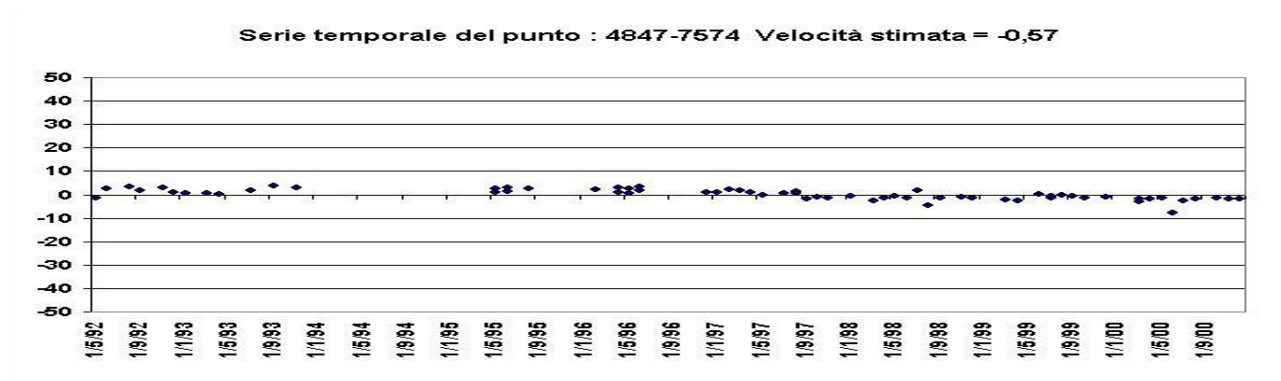


Figura 4.4-18 Serie storica del punto AJ507. L'asse delle ordinate è espresso in millimetri e la velocità media di deformazione in mm/anno

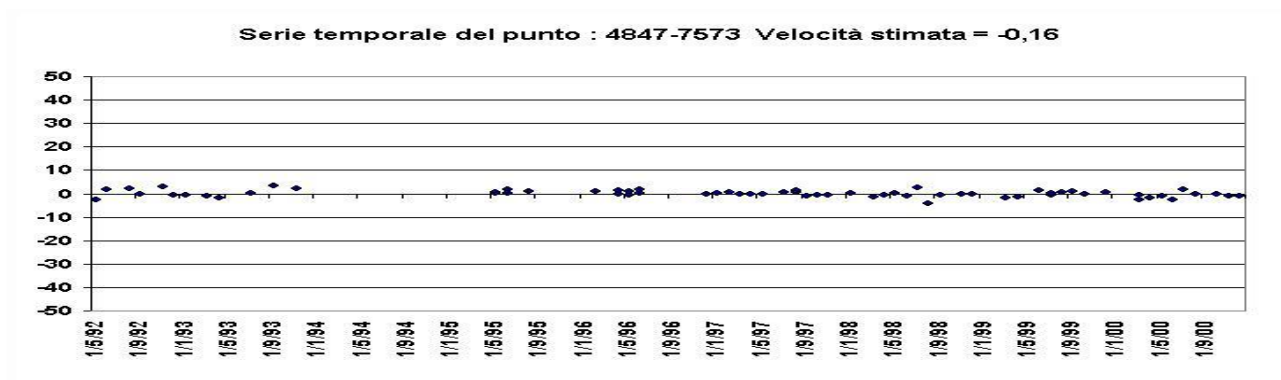


Figura 4.4-19 Velocità di deformazione superficiale nelle vicinanze della città di Cesenatico

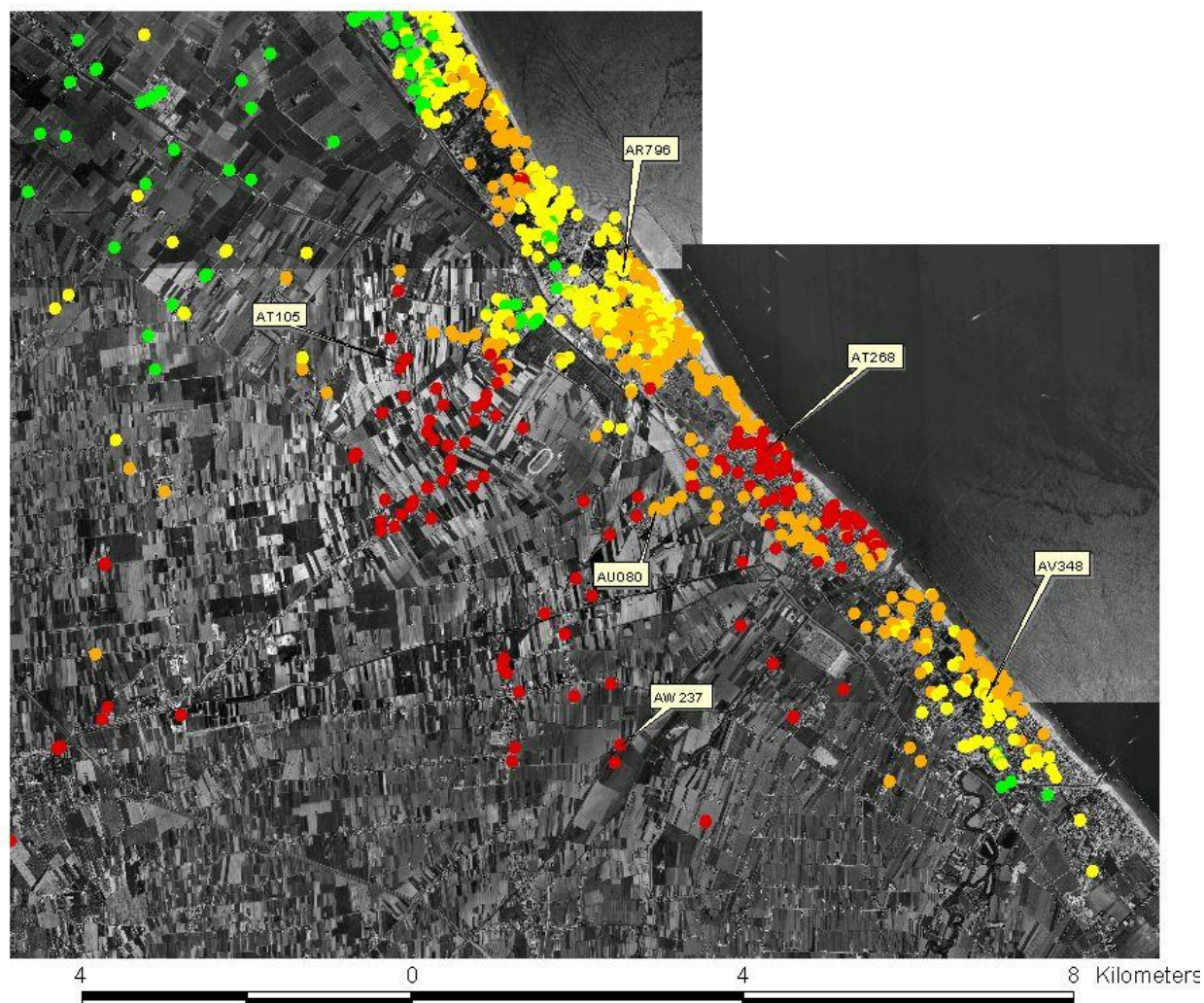


Figura 4.4-20 Serie storica del punto AW237. L'asse delle ordinate è espresso in millimetri e la velocità media di deformazione in mm/anno

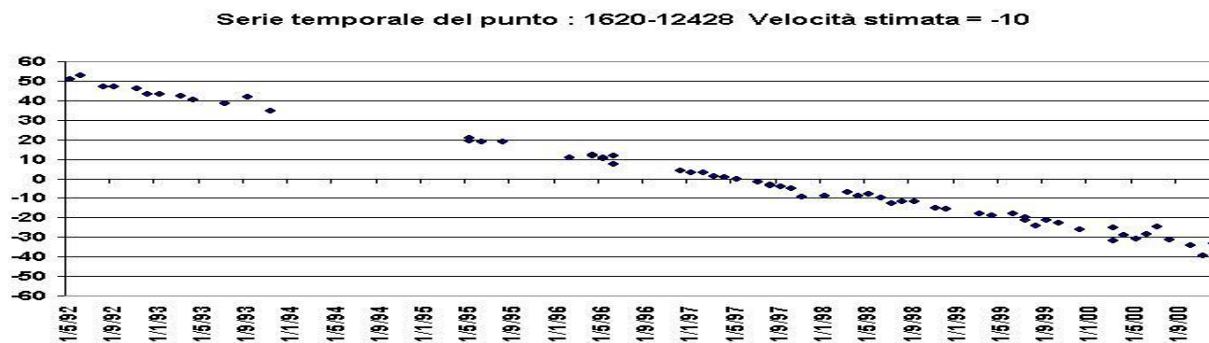


Figura 4.4-21 Serie storica del punto AT105. L'asse delle ordinate è espresso in millimetri e la velocità media di deformazione in mm/anno

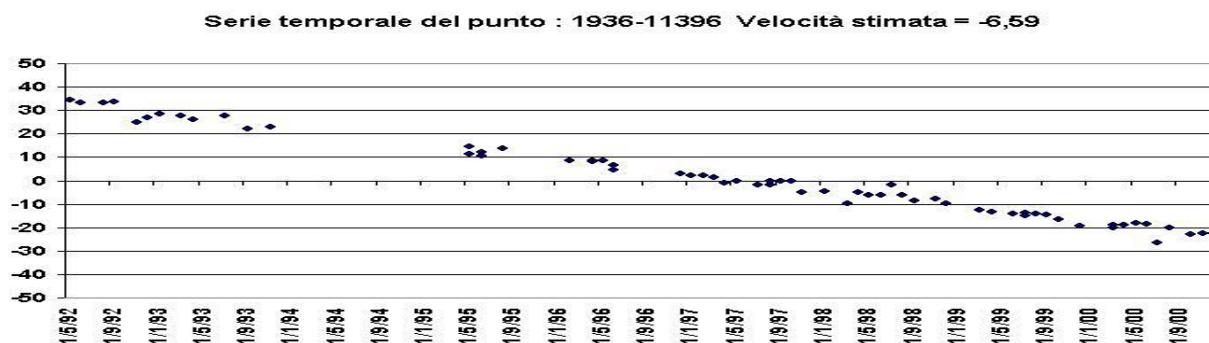


Figura 4.4-22 Serie storica del punto AV348. L'asse delle ordinate è espresso in millimetri e la velocità media di deformazione in mm/anno

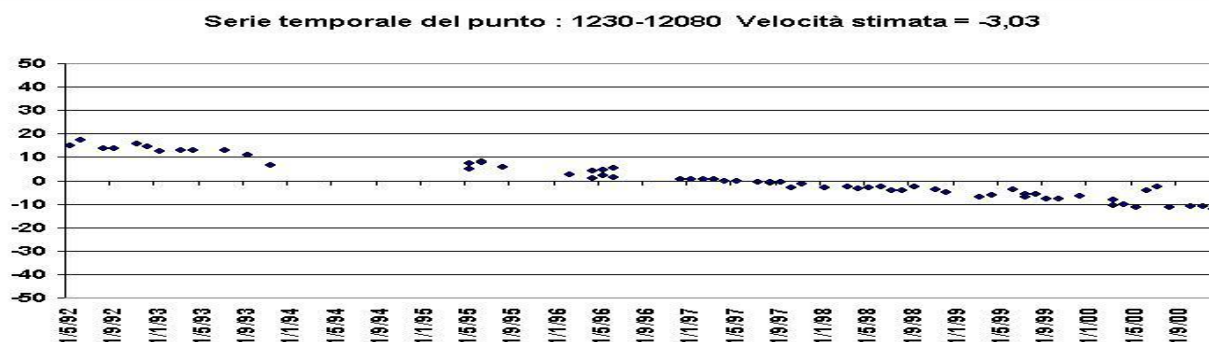


Figura 4.4-23 Serie storica del punto AR796. L'asse delle ordinate è espresso in millimetri e la velocità media di deformazione in mm/anno

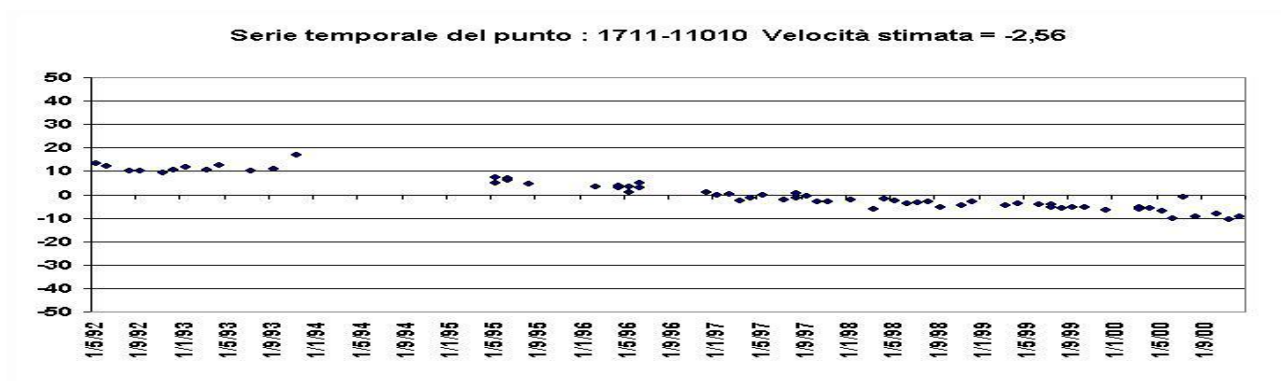


Figura 4.4-24 Serie storica del punto AT268. L'asse delle ordinate è espresso in millimetri e la velocità media di deformazione in mm/anno

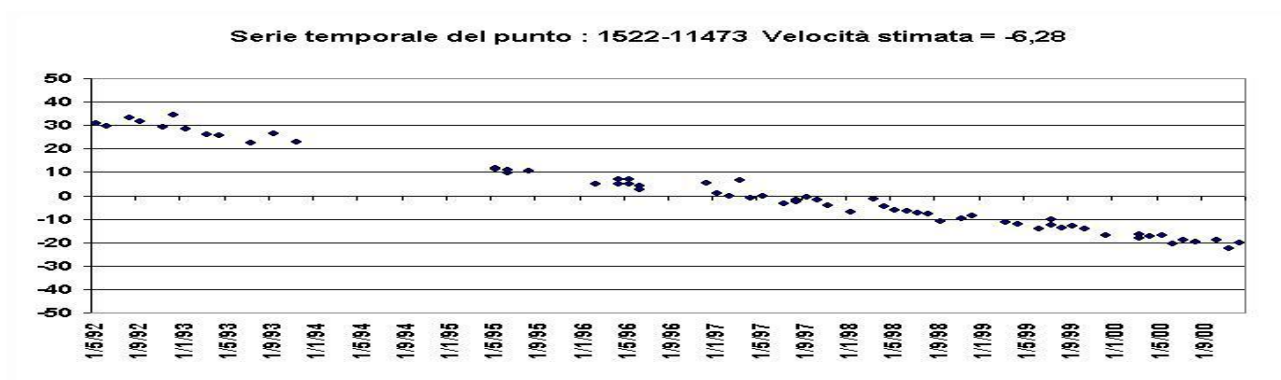


Figura 4.4-25 Serie storica del punto AU080. L'asse delle ordinate è espresso in millimetri e la velocità media di deformazione in mm/anno

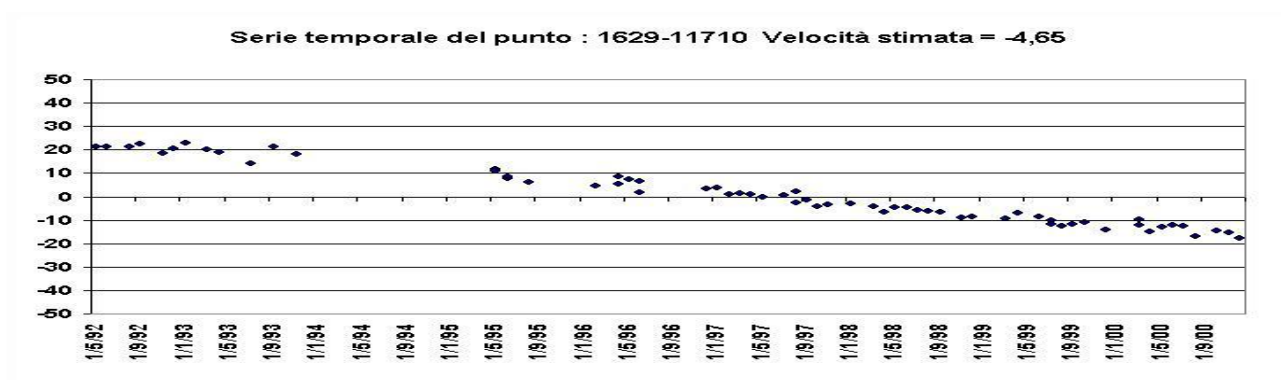




Figura 4.4-26 Velocità di deformazione superficiale nei dintorni della città di Cesena

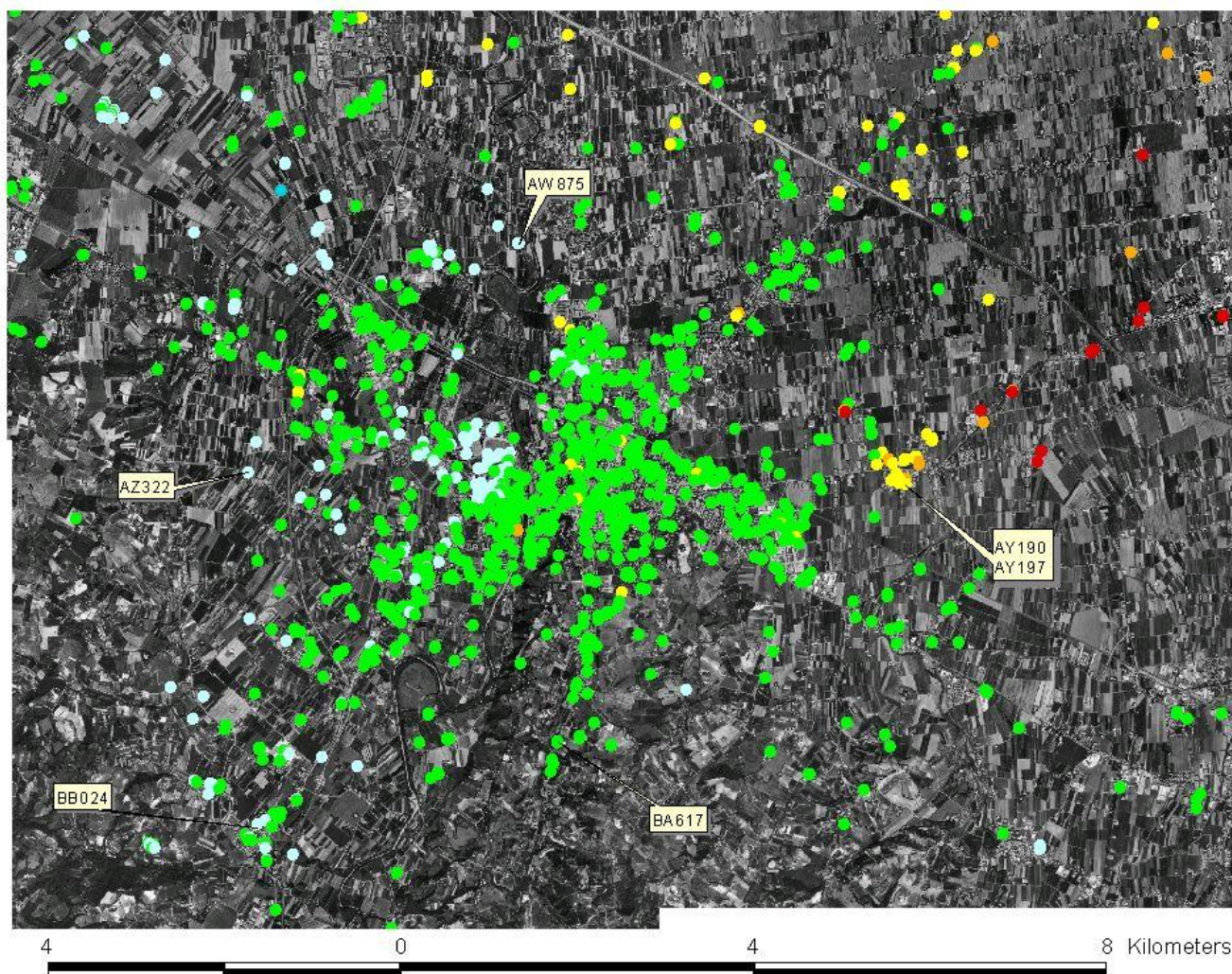


Figura 4.4-27 Serie storica del punto AW875. L'asse delle ordinate è espresso in millimetri e la velocità media di deformazione in mm/anno

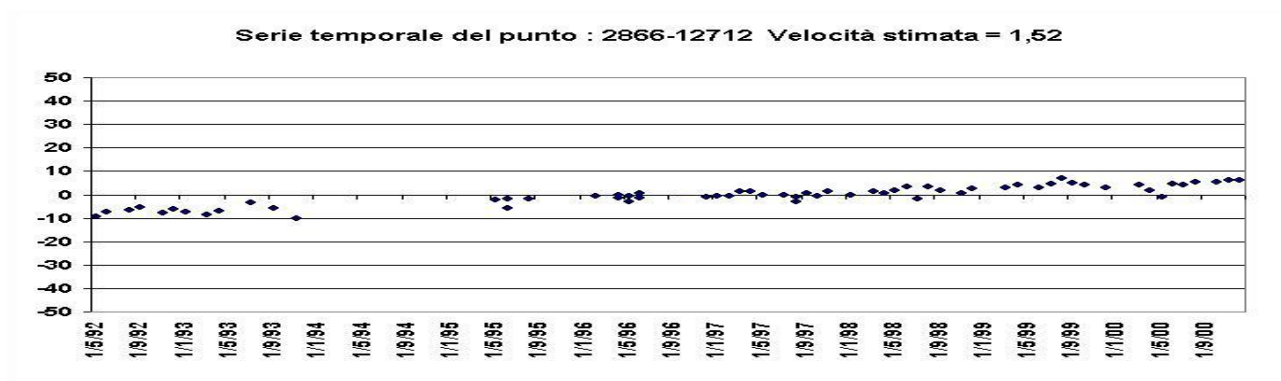


Figura 4.4-28 Serie storica del punto AY190. L'asse delle ordinate è espresso in millimetri e la velocità media di deformazione in mm/anno

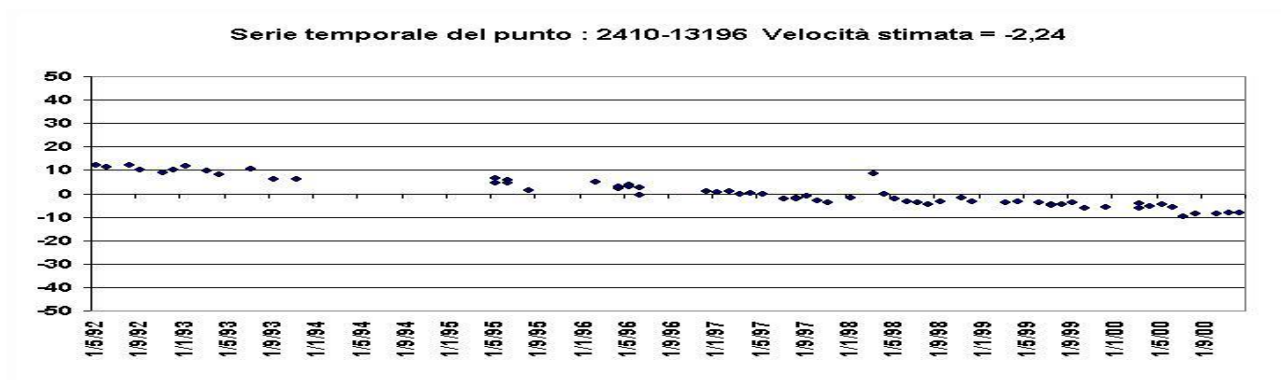


Figura 4.4-29 Serie storica del punto AY197. L'asse delle ordinate è espresso in millimetri e la velocità media di deformazione in mm/anno

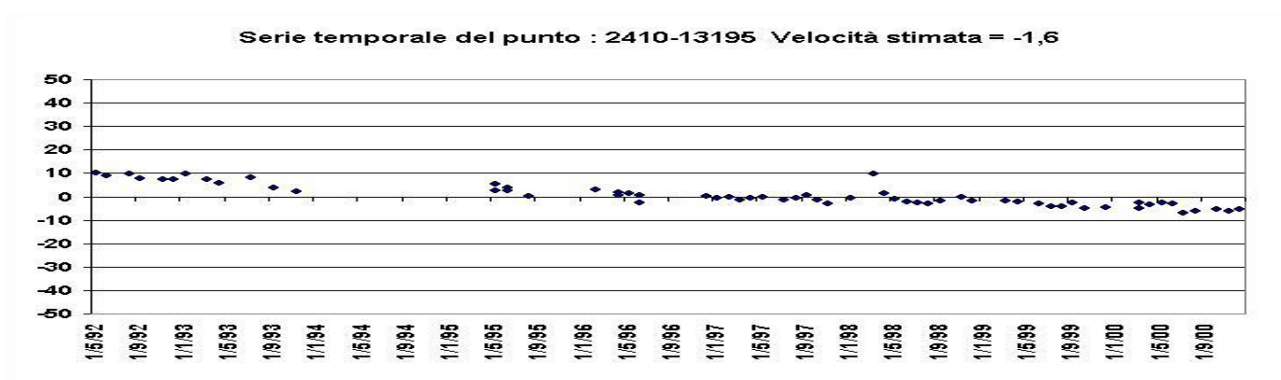


Figura 4.4-30 Serie storica del punto BA617. L'asse delle ordinate è espresso in millimetri e la velocità media di deformazione in mm/anno

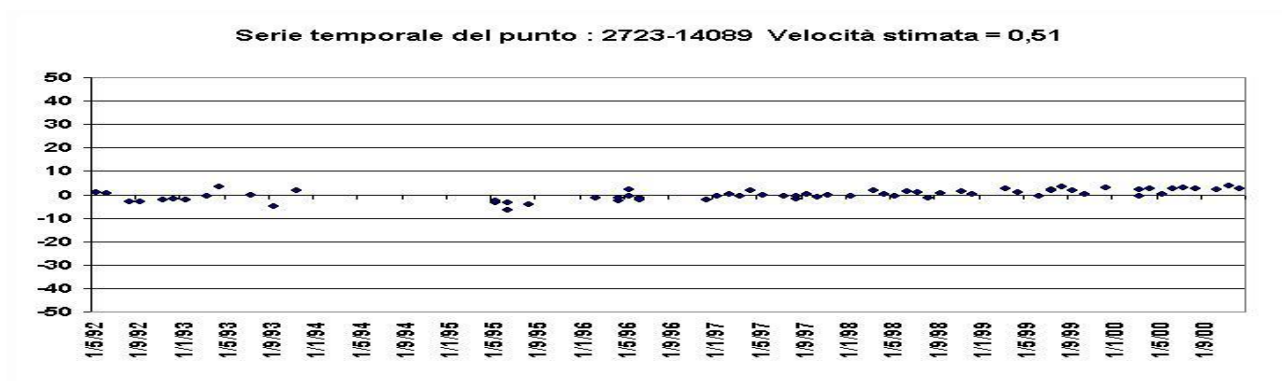


Figura 4.4-31 Serie storica del punto AZ332. L'asse delle ordinate è espresso in millimetri e la velocità media di deformazione in mm/anno

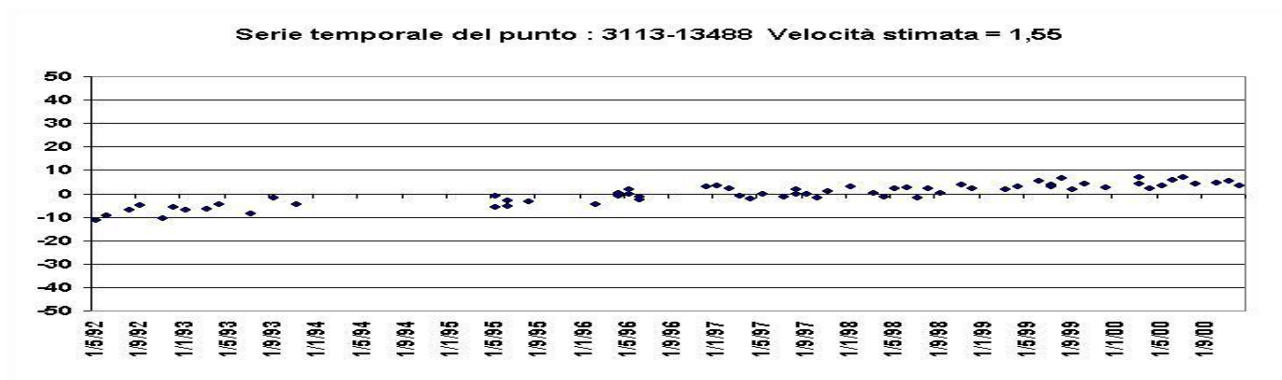


Figura 4.4-32 Serie storica del punto BB024. L'asse delle ordinate è espresso in millimetri e la velocità media di deformazione in mm/anno

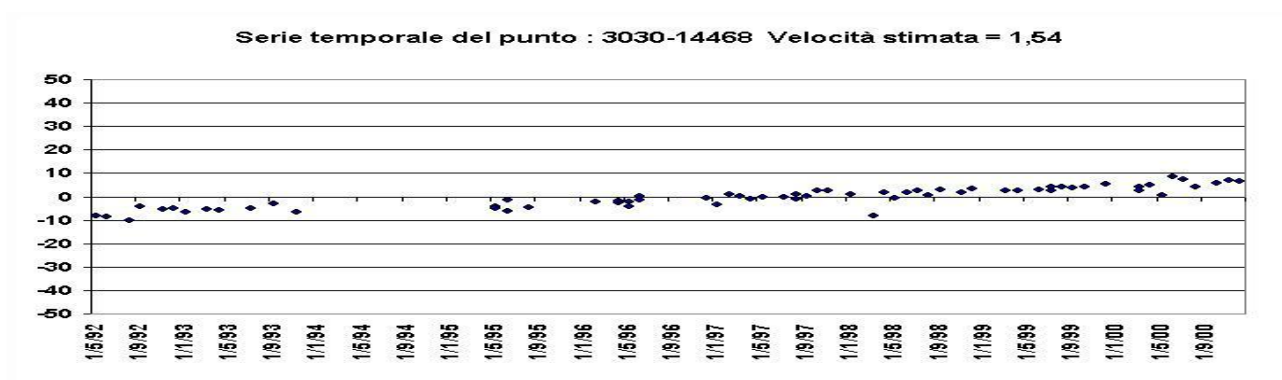
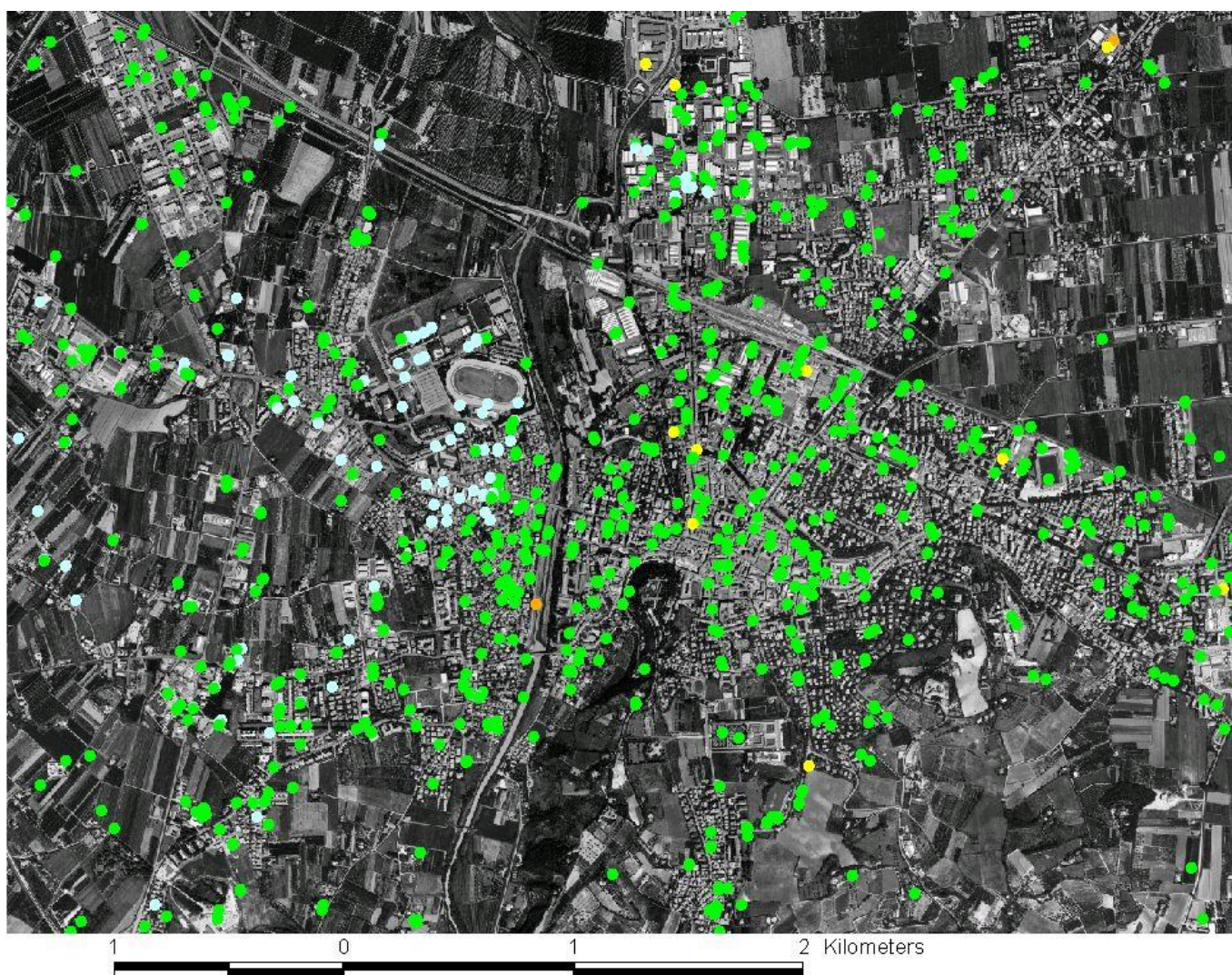




Figura 4.4-33 Velocità di deformazione superficiale nel centro cittadino di Cesena





## 5. PROPOSTA DI UNA CARTA DELLA SUBSIDENZA UTILIZZANDO I RISULTATI DELL'ANALISI DI MOVIMENTO CON LA TECNICA PS

### 5.1 DETERMINAZIONE DELLE VELOCITÀ ASSOLUTE DI ABBASSAMENTO DEI PERMANENT SCATTERERS

L'analisi condotta per determinare i movimenti dei capisaldi radar con la tecnica "PS" ha permesso di pervenire ad un database, denominato "Bacini\_Romagnoli\_085\_VelPS\_GB\_traslato.dbf", il quale contiene le velocità medie annue calcolate sull'intero arco temporale (1992-2000) dei PS individuati. Le informazioni, raccolte in 8 campi, sono le seguenti:

1. Codice PS codice esadecimale che permette di identificare univocamente il punto di misura all'interno del dbf. Il punto di riferimento del dbf presenta in questo campo il valore "REF".
2. Coordinata Nord coordinata nord del PS espressa nel sistema di riferimento Gauss-Boaga opportunamente traslata per ottenere la corrispondente coordinata nel sistema UTM ED 50 fuso 32.
3. Coordinata Est coordinata est del PS espressa nel sistema di riferimento Gauss-Boaga opportunamente traslata per ottenere la corrispondente coordinata nel sistema UTM ED 50 fuso 32.
4. Altezza elevazione relativa del caposaldo radar (in metri).
5. Vel velocità media del PS espressa in mm/anno (valutata rispetto al punto di riferimento).
6. Coer indice di affidabilità delle misurazione (numero compreso tra 0 e 1).
7. Range coordinata SAR di range.
8. Azimuth coordinata SAR di azimuth.

Come si vede il dato della velocità media annua è rappresentato da un valore relativo, ovvero la velocità è stata determinata supponendo che il punto di riferimento (REF) dell'insieme dei vari PS risulti fermo.

Allo scopo di pervenire ad un set di dati di velocità assoluti e, quindi, adatto alla realizzazione di una carta della velocità di abbassamento del suolo a scala sub-regionale, è stato necessario agganciare il PS di riferimento ad un caposaldo storico, del quale era conosciuta l'evoluzione altimetrica durante lo stesso intervallo temporale 1992-2000 utilizzato per l'analisi dei dati interferometrici.

Le coordinate del punto di riferimento (REF) dei vari PS sono le seguenti:

Tabella 5.1-1 Coordinate del punto di riferimento (REF) dei vari PS

	UTM X	UTM Y
REF	760195,09	915126,62

Tale punto è, approssimativamente localizzato in corrispondenza della località Fosso Ghiaia nel comune di Ravenna.

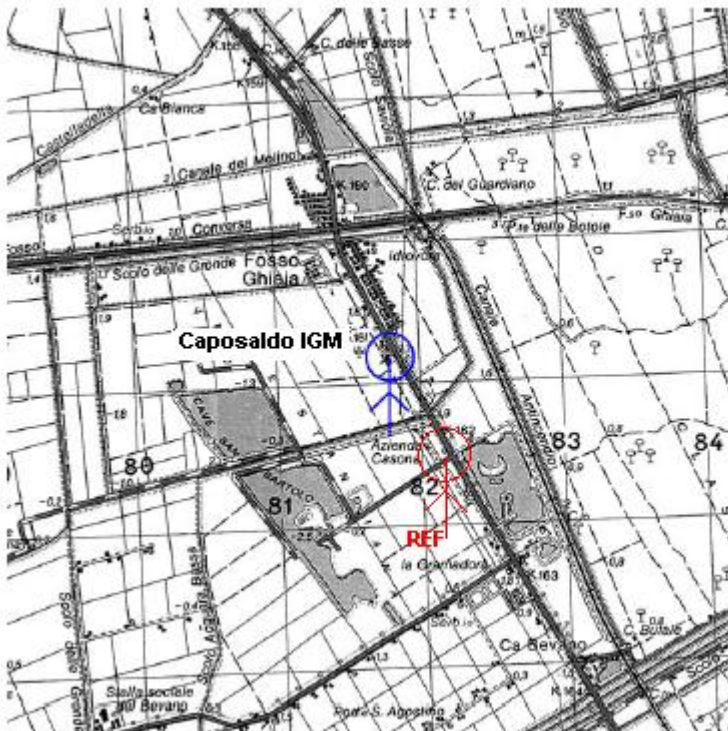
In prossimità del REF è stato individuato un caposaldo istituito dall'IGM nel 1970 e, attualmente, inserito nella rete regionale di controllo della subsidenza.

Proprio per questa peculiarità si sono rese disponibili le varie misure di quota ottenute da diversi rilievi storici, tra cui quello del 1990 e quello del 1999, realizzato proprio in occasione dell'istituzione della citata rete regionale. In particolare su questi due rilievi è stata determinata

l'effettiva velocità di abbassamento che il punto di riferimento (REF) dei capisaldi radar ha subito nel periodo 1992-2000.

Nella figura seguente viene localizzato il caposaldo istituito dall'IGM, rispetto al quale sono determinate le velocità assolute di abbassamento dei PS; per quanto attiene al punto di riferimento (REF) esso è invece localizzato poche centinaia di metri a sud del caposaldo IGM, in corrispondenza, anch'esso della S.S. 16 Adriatica.

Figura 5.1-1 Localizzazione del caposaldo (IGM) rispetto al quale sono determinate le velocità assolute di abbassamento dei PS (REF)



Nello specifico le caratteristiche del caposaldo istituito dall'IGM sono le seguenti:

- istituito da: IGM
- anno: 1970
- località: Fosso Ghiaia
- comune: Ravenna
- coordinata X (UTM): 760097
- coordinata Y (UTM): 915716
- velocità media di abbassamento: -3.73 mm/anno

La velocità di abbassamento del caposaldo IGM rappresenta un valore medio annuo stabilito, come detto, facendo riferimento ai valori delle due misure di livellazione effettuate ad una distanza temporale di 9 anni; in tal modo si è supposto che la velocità di abbassamento sia costante per tutto l'intero intervallo temporale.

Una volta individuata il tasso di abbassamento di un caposaldo prossimo al punto di riferimento dei vari PS, è stato immediato "scalare" tutte le velocità medie annue relative degli stessi PS, determinate in precedenza con l'analisi interferometrica, sommando algebricamente il valore della velocità di abbassamento di -3.73 mm/anno.

In tal modo la maggiore semplificazione introdotta è rappresentata dalla supposizione che la velocità di subsidenza si sia mantenuta costante nell'arco di circa un decennio; ciò può non rispondere al vero anche se una preliminare analisi delle serie storiche degli spostamenti subiti da quei PS caratterizzati ad alta affidabilità (vedere il paragrafo 4.4 relativamente ad un campione di tali punti) e disponibili nel database "Bacini\_Romagnoli\_092\_ts\_gb\_traslato.dbf", mostra una notevole regolarità lungo l'arco temporale 1992-2000 "coperto" dall'analisi interferometrica.

## **5.2 REALIZZAZIONE DELLA CARTA DELLA SUBSIDENZA**

Nel paragrafo precedente si è visto come sia stato ottenuto un nuovo database delle velocità medie annue assolute dei vari PS, utilizzando il rateo di subsidenza misurato in un caposaldo "storico" dell'IGM collocato nelle vicinanze del cosiddetto REF, ovvero il punto rispetto al quale l'analisi interferometrica ha ricostruito le varie velocità medie dei diversi PS.

Partendo dai valori di velocità dei PS e, ovviamente, dalla disposizione planimetrica degli stessi è stato possibile realizzare una carta in grado di rappresentare l'andamento spaziale del fenomeno della subsidenza.

La cartografia prodotta, nella rappresentazione ad isolinee dell'andamento spaziale della velocità di abbassamento medio annua, richiede una distribuzione di questo su di un reticolo regolare, ottenibile a partire dai dati di velocità assoluti dei diversi PS, questi ultimi distribuiti in maniera irregolare sul territorio, attraverso tecniche di interpolazione spaziale.

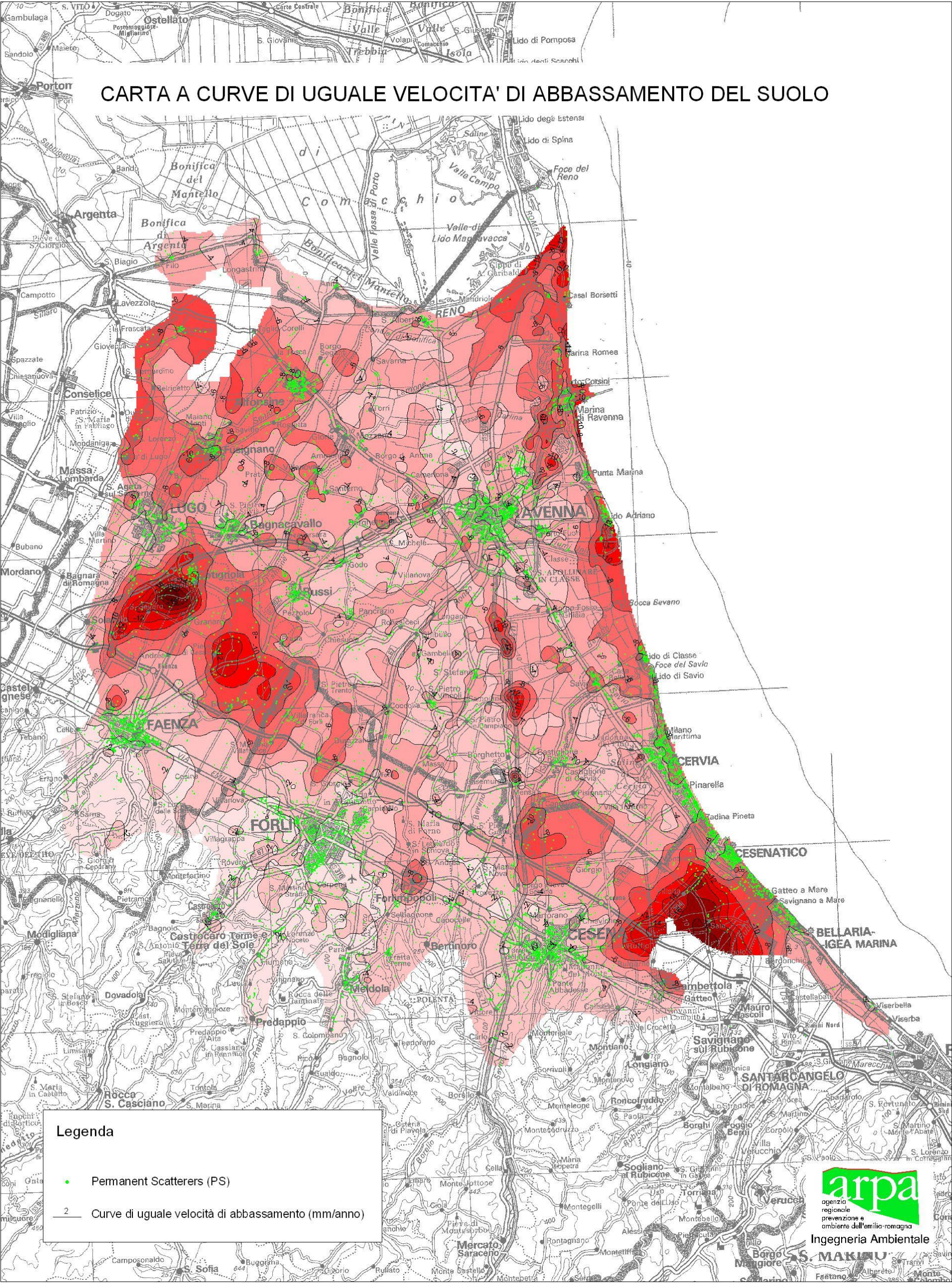
Tra le diverse tecniche di interpolazione a disposizione si è utilizzata quella nota con il nome di kriging, strumento base nel campo della geostatistica.

Il kriging è usato quando i dati presentano una forte variabilità naturale e si basa sull'assunzione che il parametro che si intende interpolare possa essere trattato come una variabile regionale, ovvero che tra dati tra loro vicini esista una certa correlazione spaziale, mentre tra punti distanti vi sia una indipendenza statistica. Esso consiste in un complesso di metodologie idonee alla stima ottimale dei valori incogniti di una variabile regionale, ottenibile attraverso la minimizzazione dell'errore che si commette nello stimare il valore incognito in un punto qualsiasi sulla base di uno o più valori noti della stessa variabile in altri punti.

Il criterio di ottimo utilizzato nel kriging non prevede necessariamente l'esatta corrispondenza del valore stimato con quello disponibile nei punti di misura; la loro differenza può essere calcolata ed utilizzata come indicatore di quanto i dati sperimentali aderiscano alla superficie interpolante stimata.

In allegato alla presente relazione viene fornita la carta, in scala 1:100.000, ad isolinee relativa alla distribuzione della velocità assoluta di abbassamento del suolo; a titolo esemplificativo la stessa carta viene riportata nella figura seguente, ad una scala idonea per una rappresentazione all'interno di una relazione.







Vale la pena segnalare come la carta confermi quanto era già noto sul fenomeno subsitivo in atto nella pianura dell'intera Regione, sulla base di varie analisi condotte nel tempo e basate sulle risultanze delle misure di livellazione via via succedutesi negli decenni scorsi.

In sintesi dalla si evince quanto segue:

- gran parte dell'area circostante l'abitato di Ravenna presenta delle velocità di abbassamento abbastanza contenuti;
- in alcuni significativi tratti della fascia costiera, a nord e a sud di Porto Corsini, persistono valori di subsidenza piuttosto elevati;
- nell'entroterra risultano confermati alcuni punti critici, già evidenziati in passato e con valori assolutamente confrontabili con quanto emerso dalla presente analisi, a sud di Lugo e di Cesenatico.