

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

*SECONDA FASE*



*RELAZIONE FINALE*





Referenti per la Regione Emilia-Romagna:

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

Hanno collaborato alla realizzazione del progetto:

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

**TRE ALTAMIRA** - Analisi interferometrica dati radar satellitari.

**Gabriele Bitelli, Luca Vittuari, Francesca Franci, Alessandro Lambertini, Leonardo Martelli** (DICAM - Università di Bologna) - Elaborazione stazioni GPS, verifica e calibrazione dati interferometrici, elaborazione grid.

**Monica Carati, Rosalia Costantino, Giacomo Zaccanti** (ARPAE, Direzione Tecnica) - Cartografia ed elaborazioni GIS.

**Daniele Cristofori** (ARPAE, Direzione Tecnica) - Correlazione fra emungimenti da falda e subsidenza nel bolognese.

**Paolo Severi** (Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli - Regione Emilia-Romagna) - Correlazione fra variazioni assestometriche e piezometriche a Castelmaggiore (BO).

Si ringrazia ATERSIR per la disponibilità dei dati sugli approvvigionamenti acquedottistici recenti.

Si ringraziano INGV, GEOTOP-TOPCON, FoGER, HEXAGON, ENI E STOGIT per la disponibilità dei dati grezzi delle stazioni permanenti GPS.

Immagine di copertina: satellite RADARSAT - 2 ([www.nasaspaceflight.com](http://www.nasaspaceflight.com)).

## INDICE

<b>1. Premessa</b>	<b>5</b>
<b>2. Analisi interferometrica</b>	<b>6</b>
2.1 <i>Introduzione</i>	6
2.2 <i>Area d'indagine</i>	6
2.3 <i>Dati satellitari acquisiti</i>	7
2.4 <i>Definizione e preparazione dei siti di elaborazione</i>	9
2.5 <i>Risultati dell'analisi SqueeSAR™ sui singoli siti di elaborazione</i>	11
2.6 <i>Sito di elaborazione di Piacenza</i>	12
2.7 <i>Sito di elaborazione di Parma</i>	13
2.8 <i>Sito di elaborazione di Bologna</i>	14
2.9 <i>Sito di elaborazione di Mirandola</i>	15
2.10 <i>Sito di elaborazione di Ravenna</i>	18
2.11 <i>Sito di elaborazione di Rimini</i>	19
2.12 <i>Verifica dei risultati ed allineamento a scala regionale</i>	20
<b>3. Analisi delle stazioni permanenti GPS</b>	<b>21</b>
3.1 <i>Introduzione</i>	21
3.2 <i>Definizione della rete di inquadramento</i>	21
3.3 <i>Stazioni permanenti analizzate nell'area di pianura della Regione Emilia-Romagna</i>	22
3.4 <i>Elaborazione delle osservazioni giornaliere</i>	26
3.5 <i>Stima delle velocità di movimento (ITRF2014)</i>	27
3.6 <i>Stima delle velocità relative</i>	27
<b>4. Calibrazione e verifiche</b>	<b>29</b>
4.1 <i>Introduzione</i>	29
4.2 <i>I dati disponibili</i>	29
4.3 <i>Calibrazione dell'analisi interferometrica SqueeSAR™</i>	32
4.4 <i>Verifica e validazione dei bersagli radar</i>	36
4.5 <i>Realizzazione della mappa dei movimenti verticali del suolo</i>	47
<b>5. Analisi dei movimenti verticali del suolo</b>	<b>48</b>
5.1 <i>Introduzione</i>	48
5.2 <i>Piacenza e Parma</i>	53
5.3 <i>Reggio nell'Emilia</i>	53
5.4 <i>Modena</i>	53

<b>5.5</b>	<b><i>Bologna</i></b>	<b>54</b>
5.5.1	Introduzione	54
5.5.2	Il dominio territoriale di riferimento	55
5.5.3	Il regime di emungimenti idrici nel breve e medio lungo periodo	55
5.5.4	L'evoluzione dei fenomeni di subsidenza	59
5.5.5	La correlazione fra approvvigionamenti di acque di falda e fenomeni di subsidenza	63
5.5.6	La correlazione fra variazioni assestometriche e piezometriche a Castelmaggiore (Bo)	66
5.5.7	Conclusioni	71
<b>5.6</b>	<b><i>Ferrara</i></b>	<b>72</b>
<b>5.7</b>	<b><i>Ravenna</i></b>	<b>73</b>
<b>5.8</b>	<b><i>Forlì-Cesena</i></b>	<b>73</b>
<b>5.9</b>	<b><i>Rimini</i></b>	<b>74</b>
<b>5.10</b>	<b><i>Il litorale</i></b>	<b>74</b>
<b>6.</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>77</b>
<b>Appendice I - Monografie delle stazioni GPS</b>		<b>80</b>
<b>Appendice II - Indici di precisione dell'analisi SqueeSAR™</b>		<b>104</b>
<b>ALLEGATI</b>		
1.	Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2011-2016. Scala 1:250.000	
2.	Carta delle variazioni delle velocità di movimento verticale del suolo dal periodo 2006-2011 al periodo 2011-2016. Scala 1:250.000	
3.	Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2011-2016. Provincia di Bologna. Scala 1:100.000	
4.	Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2011-2016. Zona costiera. Scala 1:100.000	



## 1. Premessa

La Regione Emilia-Romagna con DGR n. 1596 del 23/10/2017 ha affidato ad ARPAE la realizzazione delle attività inerenti il progetto “Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola - Seconda Fase”, secondo le modalità contenute nella convenzione approvata con lo stesso atto.

Il progetto costituisce la fase conclusiva del lavoro “Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola - Prima Fase” affidato dalla Regione Emilia-Romagna ad ARPAE con DGR n. 1690 del 17/10/2016 e conclusosi con la consegna della relazione finale nell’aprile 2017.

Nella **prima fase** del lavoro sono state realizzate le seguenti attività:

1. verifica della effettiva copertura territoriale delle immagini SAR relative al periodo 2011-2016, definizione e preparazione dei siti di elaborazione;
2. elaborazione SqueeSAR<sup>TM</sup> dei singoli siti;

Nella **seconda fase** del lavoro, oggetto della presente relazione, sono state realizzate le seguenti attività:

3. verifica dei risultati ed allineamento a scala regionale;
4. elaborazione dei dati acquisiti da 36 stazioni permanenti GPS, di cui 33 ubicate all’interno del territorio regionale e 3 limitrofe al confine; inquadramento di tali stazioni nel Sistema Internazionale EUREF; calibrazione dell’analisi interferometrica tramite l’utilizzo di 16 stazioni presenti nell’area di pianura della regione;
5. verifiche post calibrazione tramite l’utilizzo di ulteriori 6 stazioni (area di pianura) e validazione dei dati interferometrici; realizzazione della cartografia delle velocità di movimento verticale del suolo.

**Per una maggiore chiarezza e completezza espositiva nella presente relazione sono inserite anche le attività inerenti la prima fase del lavoro.**

## 2. Analisi interferometrica

### 2.1 Introduzione

Nel 2011-12 Arpa (ora Arpae), su incarico della Regione Emilia-Romagna e in collaborazione con il Dicam dell'Università di Bologna, realizzò il rilievo dei movimenti verticali del suolo sull'area di pianura della regione Emilia-Romagna<sup>1</sup>, utilizzando il metodo dell'analisi interferometrica di dati radar satellitari con tecnica SqueeSAR™ (algoritmo PSInSAR™ di seconda generazione). Tramite tale rilievo fu aggiornata la carta delle velocità di movimento verticale del suolo relativamente al periodo 2006-2011 elaborando immagini radar acquisite dal satellite RADARSAT-1 in tale periodo.

Con il presente lavoro, si è proceduto ad aggiornare le conoscenze geometriche sul fenomeno della subsidenza, utilizzando ancora la tecnica SqueeSAR™, ulteriormente affinata, per analizzare immagini radar, acquisite dai satelliti RADARSAT-1 e RADARSAT-2 mentre, per un'area limitata del territorio parmense, non adeguatamente coperta da dati RADARSAT, è stato necessario acquisire immagini derivanti dalla costellazione COSMO-SkyMed (CSK) dell'Agenzia Spaziale Italiana, nel periodo 2011-2016.

Nella **prima fase** del lavoro (2016), è stata effettuata l'analisi interferometrica per ciascuno dei 6 siti di elaborazione che ricoprono l'area d'indagine. E' stato così possibile individuare e localizzare i punti di misura (MP) presenti, stimare le loro velocità medie annue di spostamento (in mm/anno) nel periodo 2011-2016 e stimare le serie storiche di spostamento dei PS e dei DS (in mm) nello stesso periodo.

Nella **seconda fase** del lavoro (2017) si è proceduto ad una prima verifica ed allineamento dei singoli siti a scala regionale, è seguita la calibrazione del dato interferometrico tramite l'utilizzo di 16 stazioni GPS permanenti presenti nell'area di pianura della regione. Sono state poi effettuate verifiche post calibrazione tramite l'utilizzo di ulteriori 6 stazioni.

Successivamente sono state condotte analisi statistiche sulla distribuzione spaziale e sulla tipologia dei punti di misura con implementazione di procedure di screening e validazione del *dataset* complessivo al fine di individuare e rimuovere i punti considerati fuorvianti (outliers) ai fini della realizzazione della cartografia delle velocità di movimento verticale del suolo. Sono stati individuati complessivamente 61.369 punti; tra questi, la gran parte sono risultati essere punti isolati con andamento anomalo rispetto all'intorno; sono stati evidenziati anche 116 cluster di punti per i quali si è poi proceduto a verifiche visive su immagini satellitari al fine di decidere l'opportunità o meno di un loro mantenimento nel *dataset* nell'ottica di una rappresentazione dei movimenti a scala regionale. Ottenuto così il *dataset* definitivo, che consta di 1.912.781 MP, si è proceduto prima all'interpolazione dei punti per la produzione di un modello raster di velocità di movimento verticale del suolo e successivamente all'elaborazione della carta a curve isocinetiche relativa all'intera area di pianura regionale.

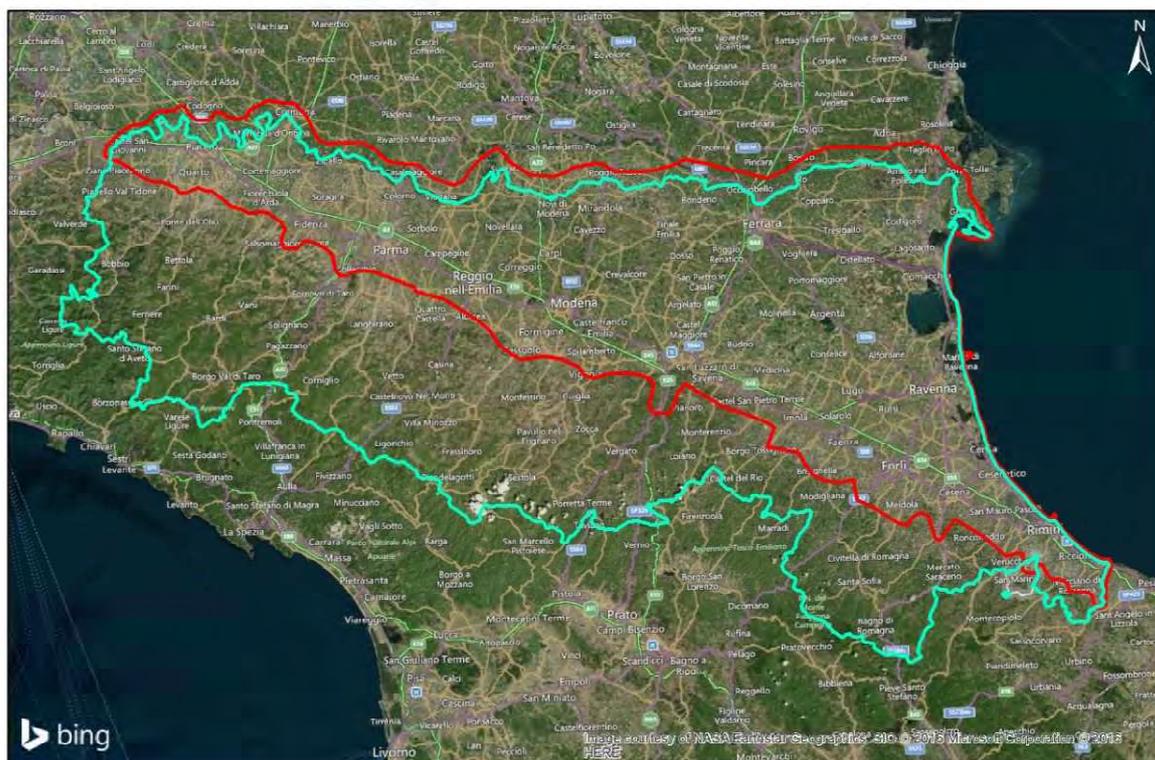
### 2.2 Area d'indagine

L'area d'indagine (*Figura 1*) comprende il territorio di pianura della regione Emilia-Romagna ed una fascia di circa qualche chilometro oltre il confine nord. L'estensione totale dell'area è di oltre 13.000 km<sup>2</sup>.

---

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

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



Limite regionale

Area d'indagine

0 50 km

**Fig. 1 - Estensione dell'area d'indagine**

### 2.3 Dati satellitari acquisiti

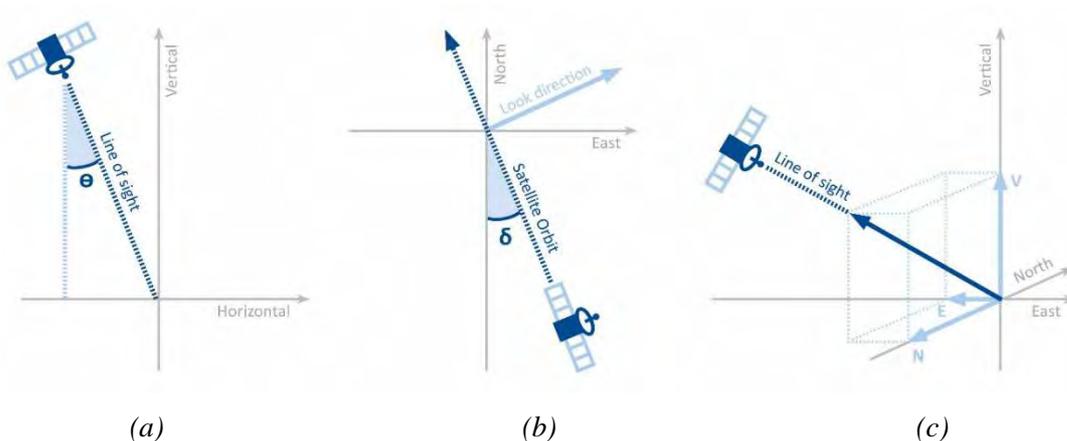
Il monitoraggio realizzato nel 2011 si avvale di immagini radar acquisite dal satellite RADARSAT-1 (RSAT1), un satellite a media risoluzione, in banda C, con una lunghezza d'onda ( $\lambda$ ) del segnale radar pari a 56.564 mm. Tale satellite, lanciato dall' Agenzia Spaziale Canadese nel 1995, non è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

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

Pertanto, al fine di garantire la continuità del monitoraggio, TRE ALTAMIRA ha sviluppato una specifica modalità di funzionamento dell' algoritmo di elaborazione SqueeSAR™ detta *stitching* che consente l'elaborazione congiunta di dati acquisiti da questi due satelliti. L'elaborazione congiunta richiede che la geometria di acquisizione dei satelliti utilizzati sia la stessa (ascendente o discendente). E' necessario infatti che lo stesso bersaglio radar sia identificabile da entrambi i satelliti. Ne consegue che il numero di punti di misura ottenibili con una elaborazione *stitching* è tanto più alto quanto più simili sono gli angoli di vista delle geometrie di acquisizione utilizzate, ma in generale inferiore a quanto ottenibile dall'elaborazione dei dati di un singolo satellite.

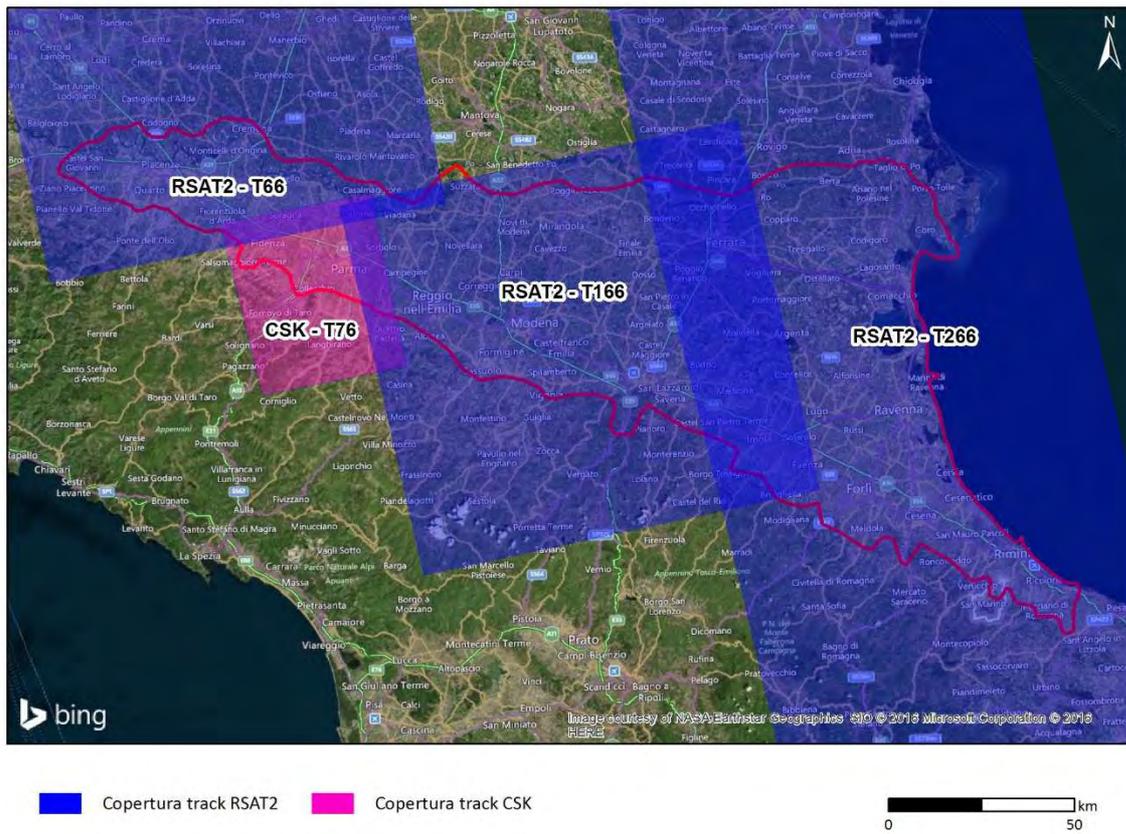
Grazie a questo algoritmo, è stato possibile elaborare congiuntamente immagini acquisite da entrambi i satelliti in geometria ascendente, fornendo informazioni continue sull'intera area d'indagine, nel periodo 2011-2016.

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



**Fig. 2 - Schema standard di acquisizione in geometria ascendente**

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



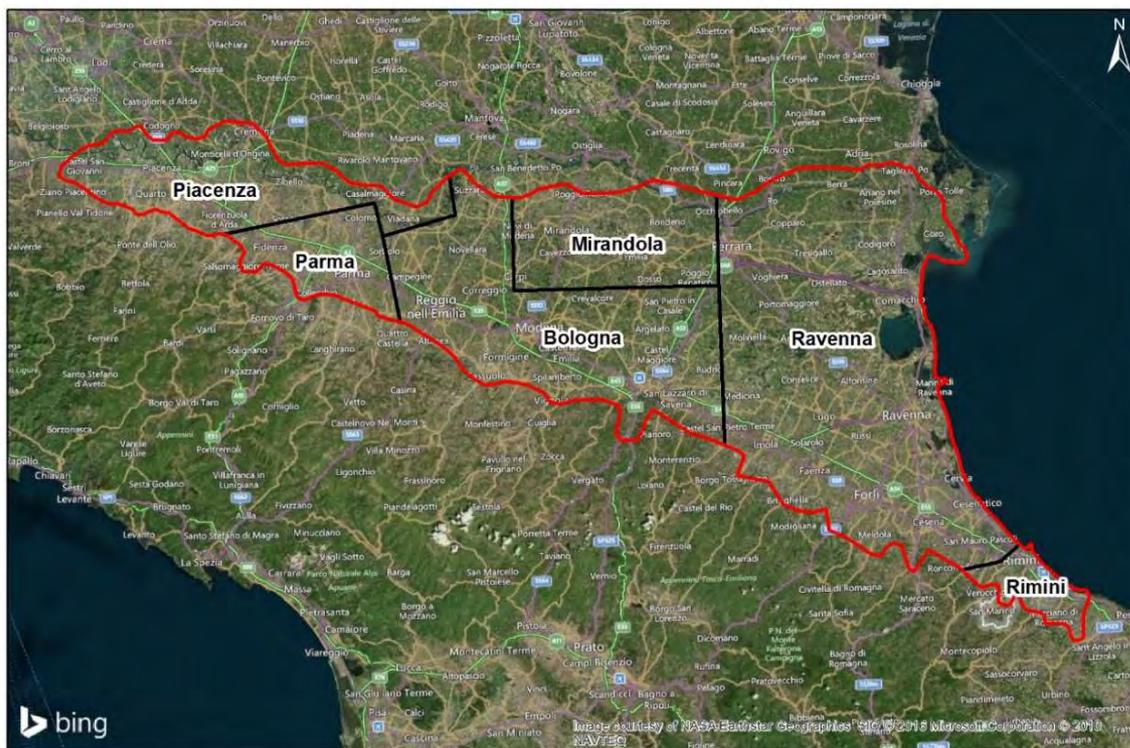
**Fig. 3 - Copertura delle immagini RSAT2 e CSK disponibili sull'area d'indagine**

## 2.4 Definizione e preparazione dei siti di elaborazione

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

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

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



Limite siti elaborazione
  Area d'indagine

km  
 0 50

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

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

*Tabella 1- Caratteristiche dei siti elaborati*

## 2.5 Risultati dell'analisi SqueeSAR™ sui singoli siti di elaborazione

Le analisi condotte hanno permesso di ottenere un totale di 1.974.150 MP sull'intera area d'interesse. Come noto, la distribuzione dei punti di misura dipende principalmente dall'uso del suolo. Le densità massime si ottengono in corrispondenza dei centri abitati e delle infrastrutture antropiche mentre nelle aree coltivate e/o vegetate la densità risulta sensibilmente più bassa. Nei paragrafi successivi sono mostrati in dettaglio i risultati ottenuti sui singoli siti di elaborazione.

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

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

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

La **coerenza temporale** (COHERENCE) è un indice che misura quanto bene il moto stimato segue un modello analitico. Stabilire un modello analitico per il moto significa pensare il moto stesso secondo una certa funzione matematica. Le serie temporali delle analisi SqueeSAR™ vengono confrontate con modelli di tipo polinomiale e sinusoidale. Ogni serie temporale di movimento viene confrontata con il modello, il risultato del confronto è l'indice detto coerenza temporale. Il valore della coerenza temporale è compreso tra 0 (nessuna coerenza - il punto non ha nessuna attinenza con il modello utilizzato ed è quindi inaffidabile) ed 1 (massima coerenza). Il valore 1 assume il significato che ogni misura contenuta nella serie temporale è perfettamente giustificata dal modello matematico, ed è ovviamente un caso limite.

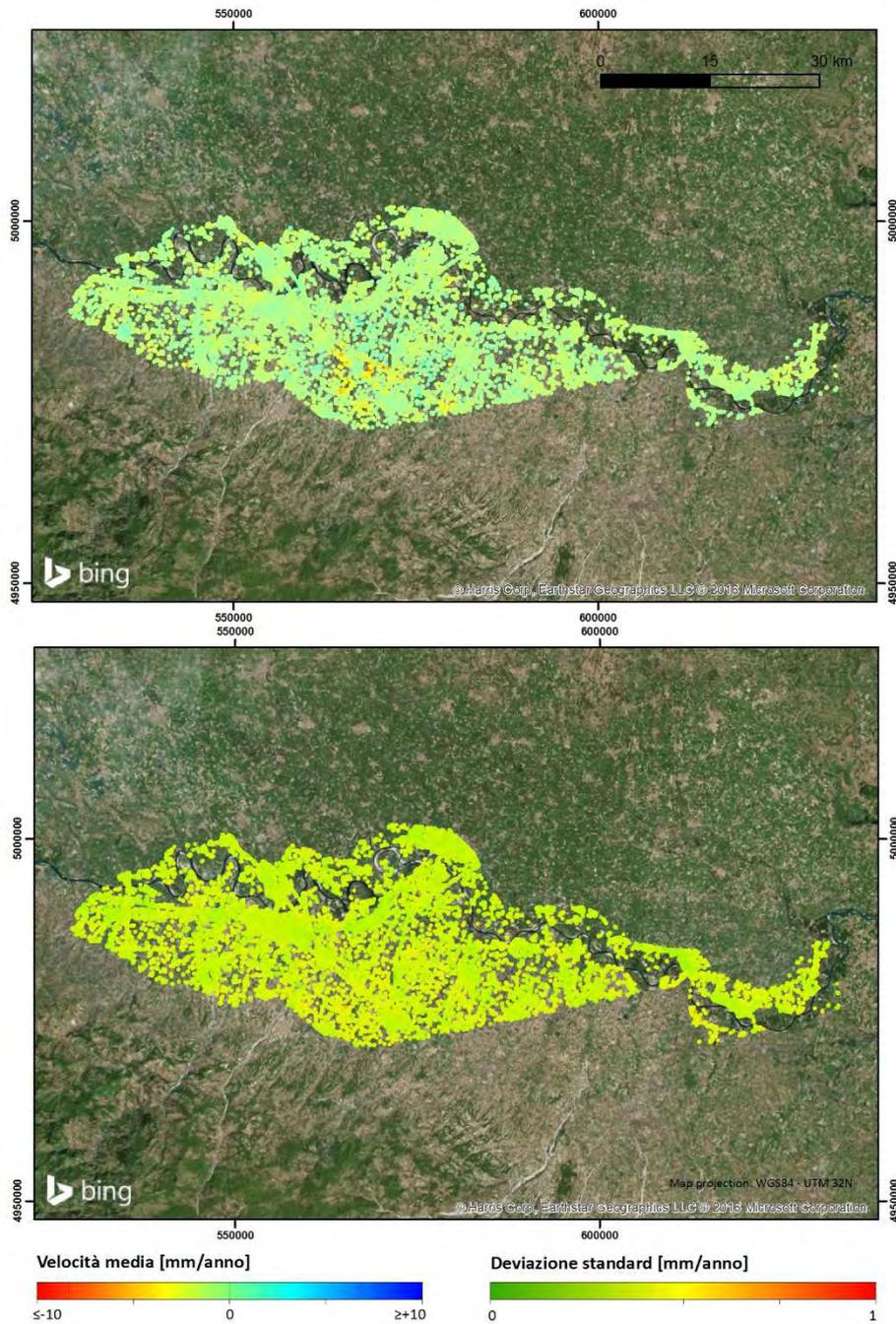
La Tabella 2 sintetizza i valori medi di deviazione standard e coerenza ottenuti per ogni sito. Si noti che tutti i valori di deviazione standard sono compresi entro 1 mm/anno, ad indicare l'ottima precisione delle misure ottenute.

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

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

## 2.6 Sito di elaborazione di Piacenza

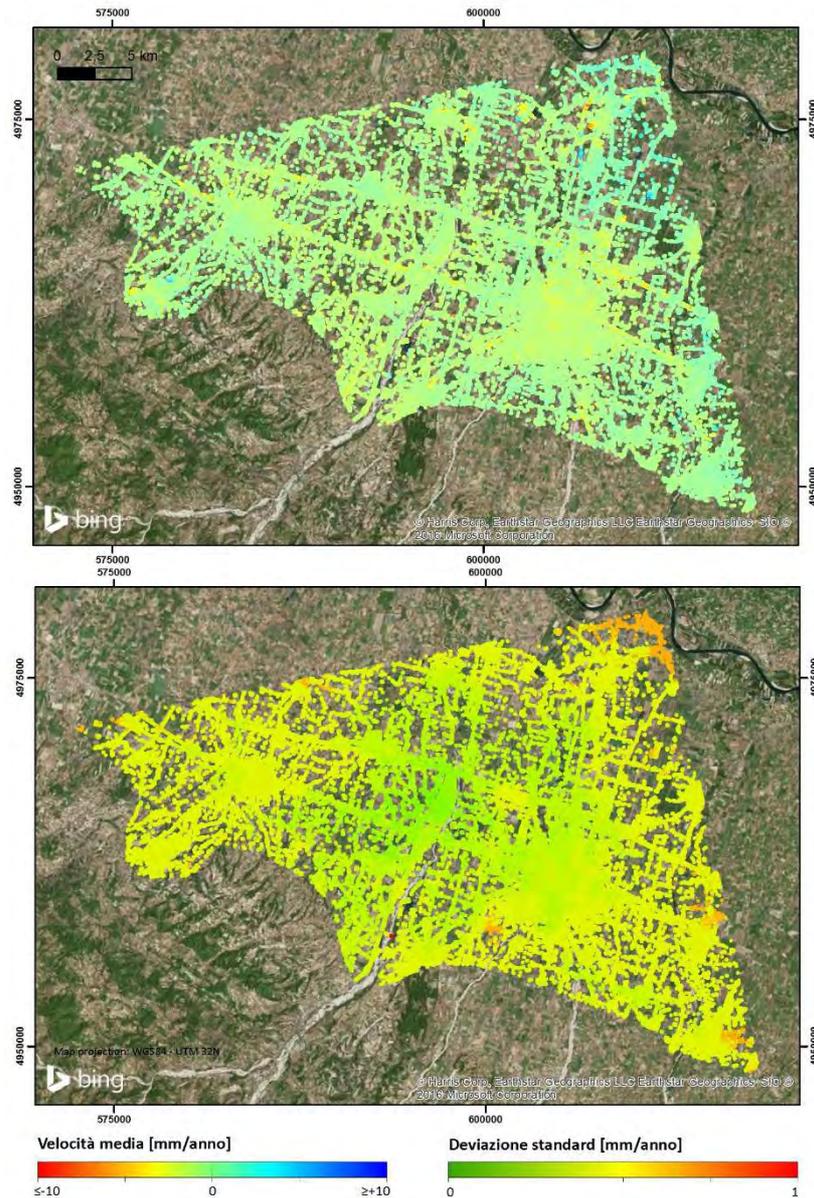
Su questo sito sono stati individuati 141.987 punti di misura (MP), con una densità media di 85 MP/Km<sup>2</sup>. La distribuzione dei punti, visualizzati per velocità media annua e relativa deviazione standard è mostrata in *Figura 5*.



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

## 2.7 Sito di elaborazione di Parma

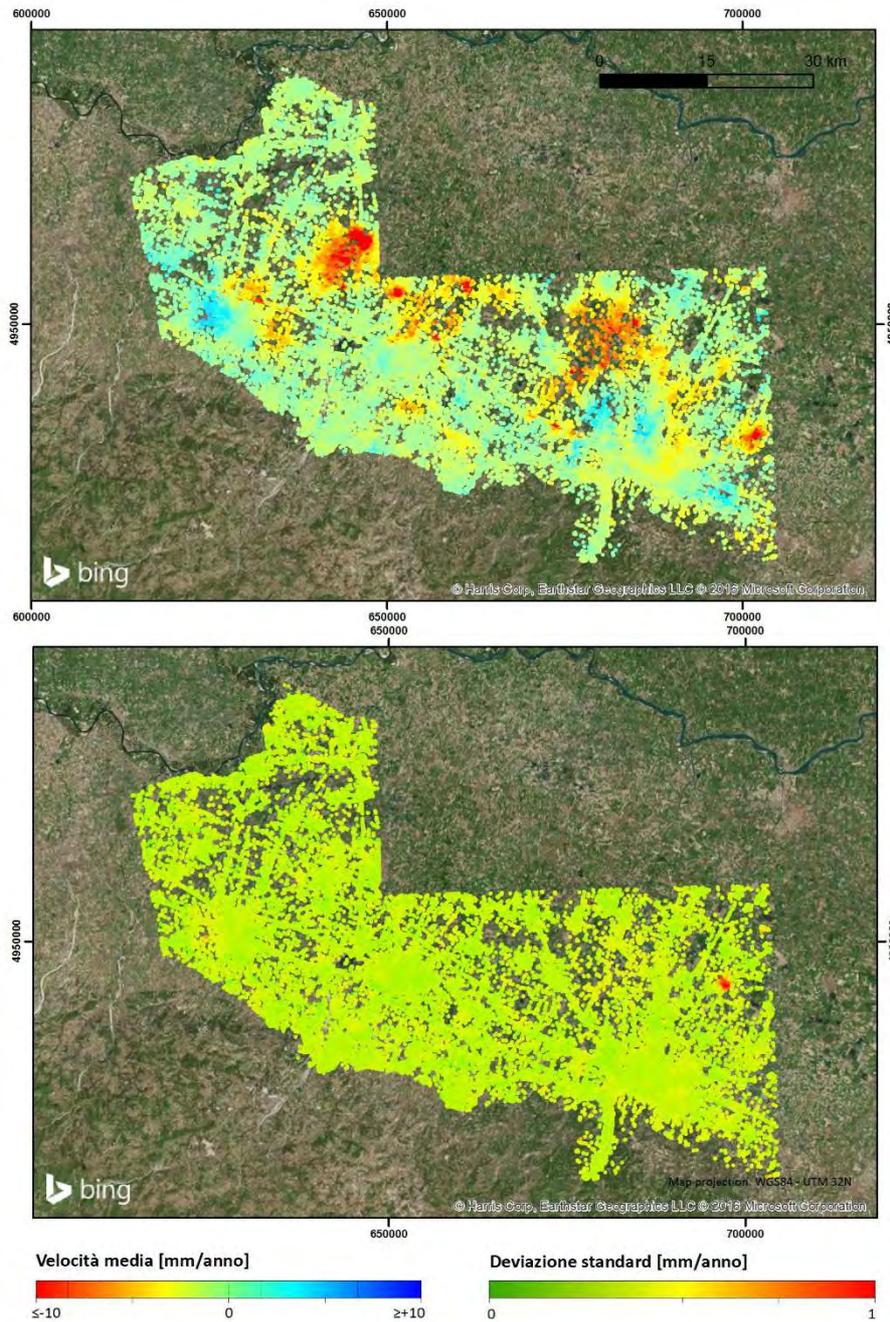
Per questo sito è stato necessario utilizzare immagini acquisite dalla costellazione CSK, poiché non risultava coperto da acquisizioni storiche RSAT2. Questo satellite opera in banda X, con una risoluzione spaziale di 3x3 metri. Grazie alla più alta risoluzione spaziale, il numero di punti di misura individuati su questo sito risulta sensibilmente maggiore rispetto agli altri (1.285.490 MP) e raggiunge una densità media di 1.600 MP/km<sup>2</sup>. La distribuzione dei punti, visualizzati per velocità media annua e relativa deviazione standard è mostrata in *Figura 6*.



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

## 2.8 Sito di elaborazione di Bologna

Su questo sito sono stati individuati 166.358 punti di misura, con una densità media di 55 MP/Km<sup>2</sup>. La distribuzione dei punti, visualizzati per velocità media annua e relativa deviazione standard è mostrata in *Figura 7*.



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

## 2.9 Sito di elaborazione di Mirandola

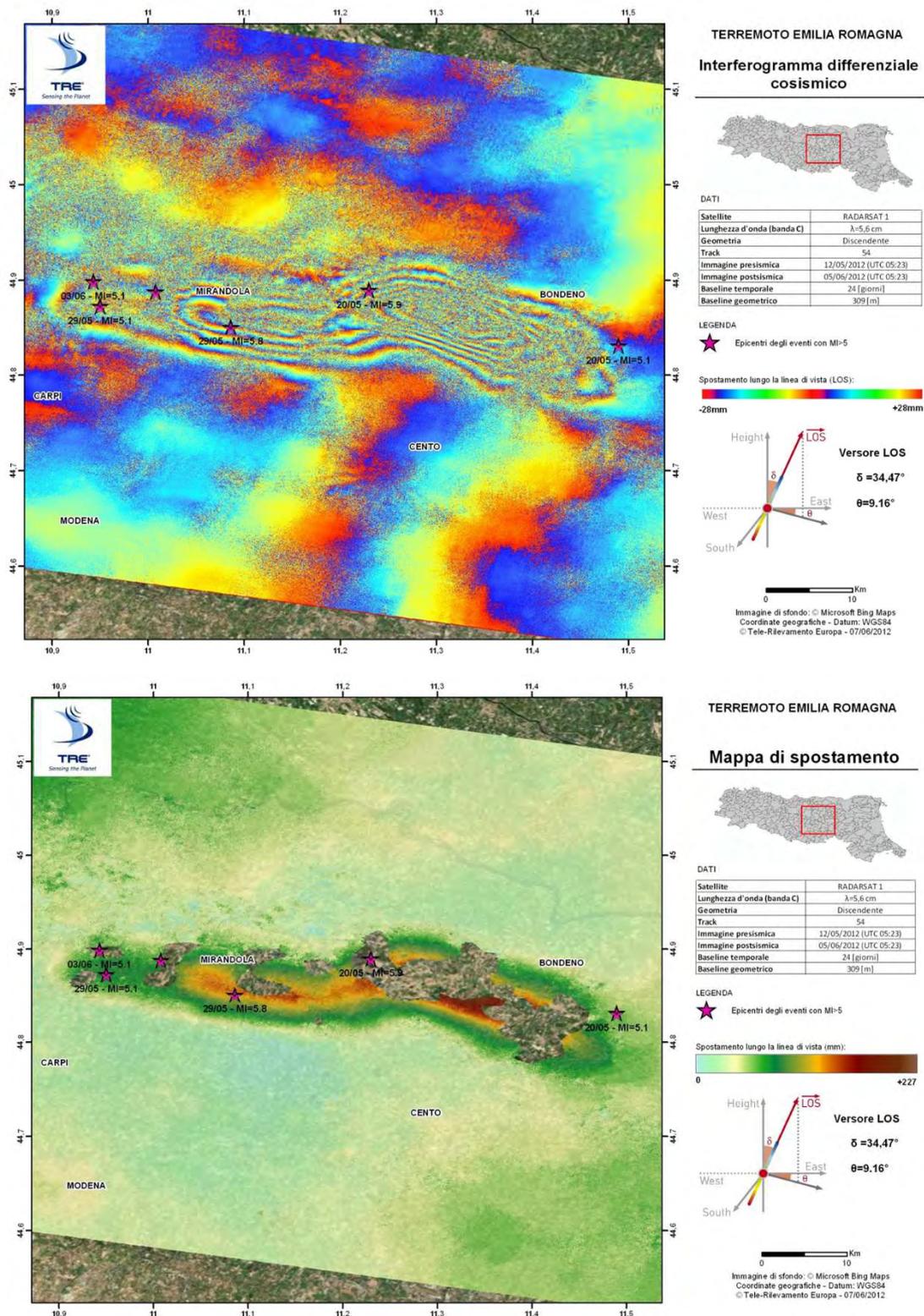
Come anticipato al paragrafo 2.4, per questo sito è stato necessario condurre un'elaborazione a se stante a causa degli eventi sismici che hanno coinvolto l'area di Mirandola nel maggio del 2012.

A titolo informativo, la *Figura 8* mostra i risultati di un'analisi DInSAR tradizionale (interferogramma e relativa mappa di spostamento) realizzati da TRE subito dopo gli eventi sismici del 2012. Come noto, una analisi DInSAR fornisce misure monodimensionali e con precisione centimetrica su moti veloci (oltre qualche cm/anno) avvenuti a cavallo di due acquisizioni. Il confronto tra queste due immagini SAR restituisce un interferogramma, una mappa che mostra la differenza tra i valori di fase del segnale radar tra le due acquisizioni. Gli spostamenti occorsi tra le due immagini sono evidenziati dalla presenza di frange interferometriche (bande colorate concentriche). Ogni frangia corrisponde ad una variazione di fase pari a  $2\pi$  radianti che si traduce in uno spostamento del bersaglio pari a metà della lunghezza d'onda del radar utilizzato.

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

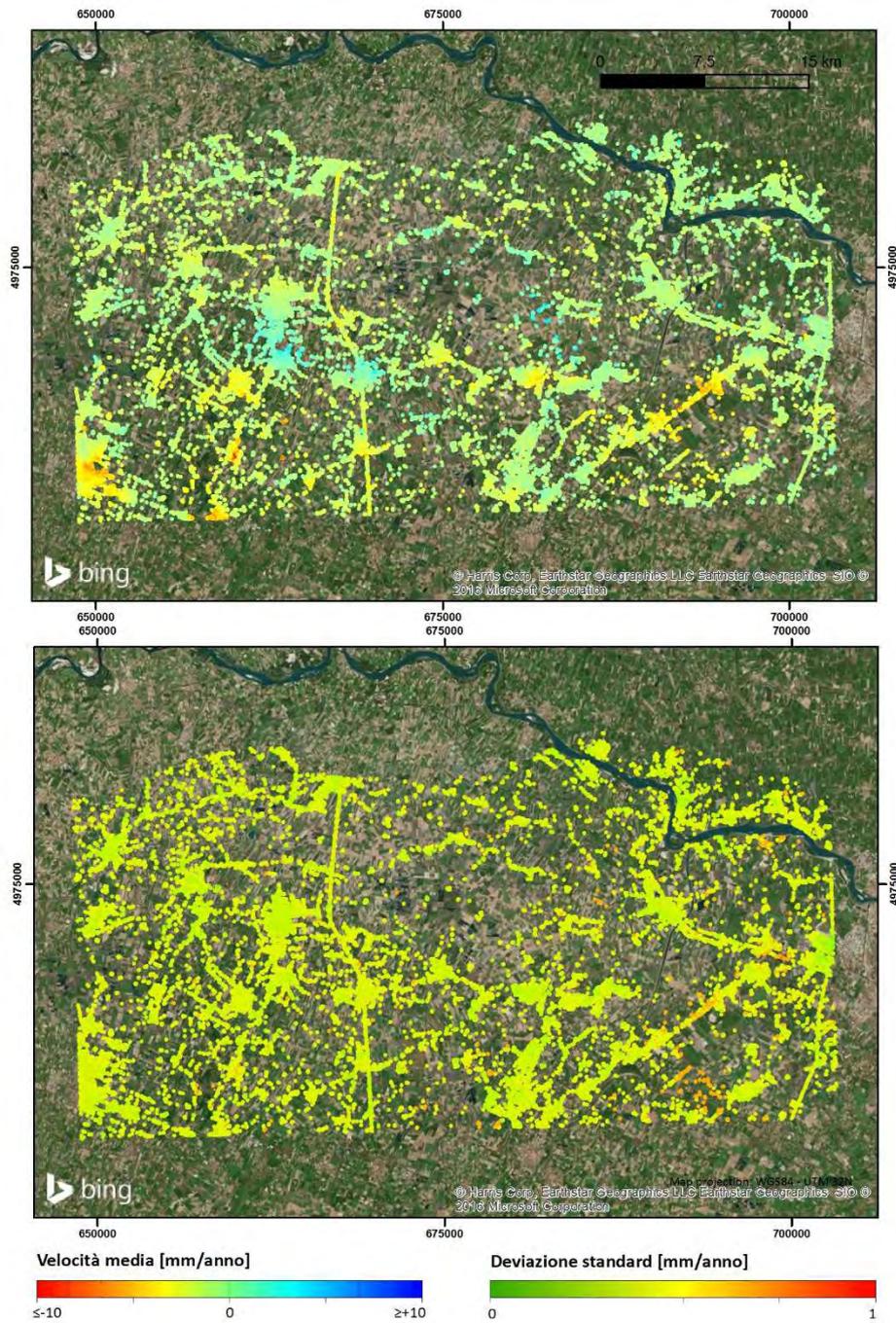
Dai dati DInSAR elaborati dopo gli eventi sismici, utilizzando le immagini acquisite dal satellite RSAT1 il 12/05/2012 ed il 05/06/2012, si osserva che nell'area di Mirandola il terreno ha subito un innalzamento di oltre 20 cm a seguito dei due principali eventi sismici del 20 Maggio e 29 Maggio 2012.

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



**Fig. 8 - Interferogramma (in alto) e relativa mappa di spostamento (in basso) realizzate da TRE subito dopo gli eventi sismici del Maggio 2012**

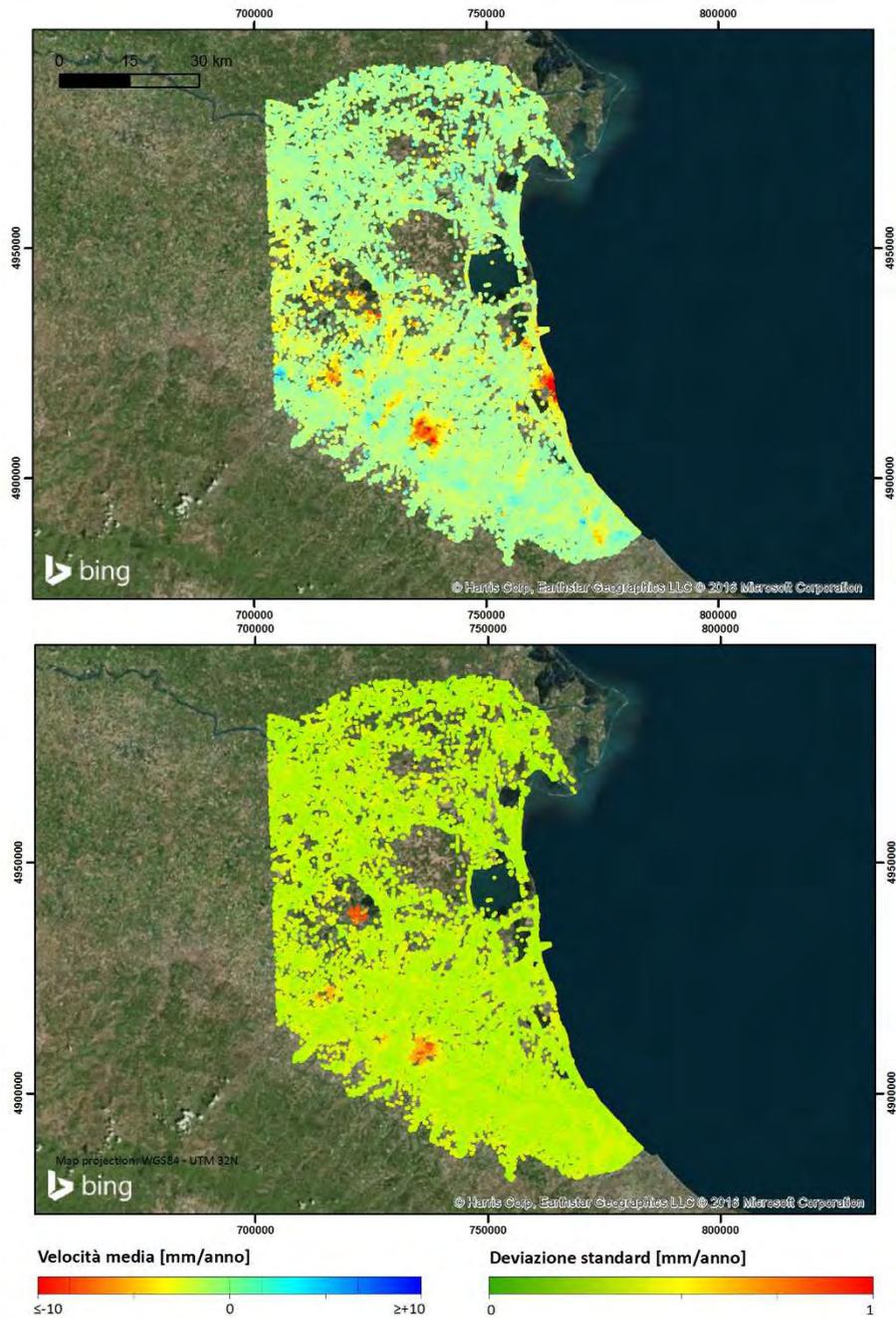
Sul sito di Mirandola sono stati individuati 34.262 punti di misura, con una densità media di 25 MP/Km<sup>2</sup>. La distribuzione dei punti, visualizzati per velocità media annua e relativa deviazione standard è mostrata in Figura 9.



**Fig. 9** - Velocità media annua (in alto) e relativa deviazione standard (in basso) dei punti individuati con l'elaborazione del sito di Mirandola

## 2.10 Sito di elaborazione di Ravenna

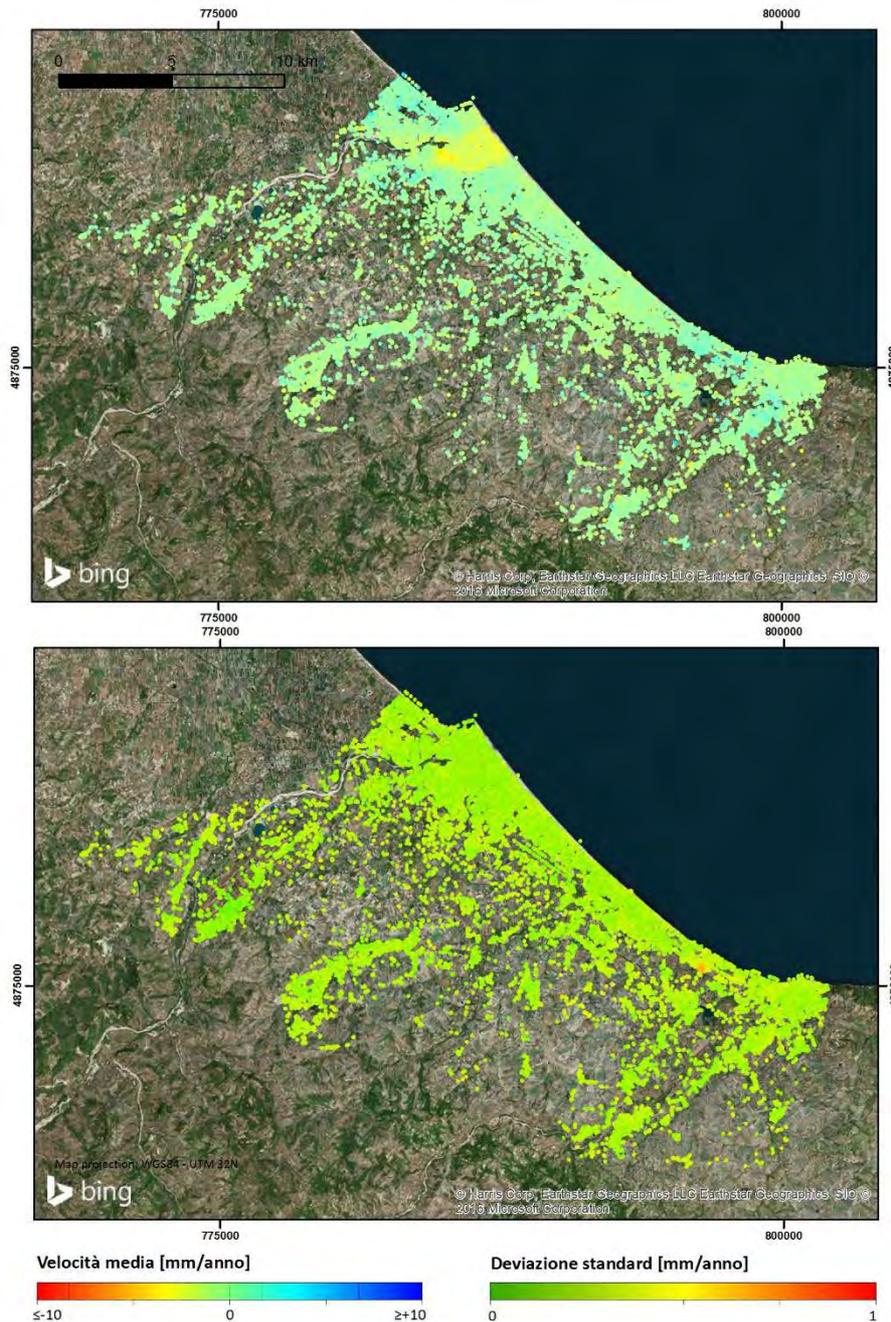
Sul sito di Ravenna sono stati individuati 325.871 punti di misura, con una densità media di 56 MP/Km<sup>2</sup>. La distribuzione dei punti, visualizzati per velocità media annua e relativa deviazione standard è mostrata in *Figura 10*.



*Fig. 10* - Velocità media annua (in alto) e relativa deviazione standard (in basso) dei punti individuati con l'elaborazione del sito di Ravenna

## 2.11 Sito di elaborazione di Rimini

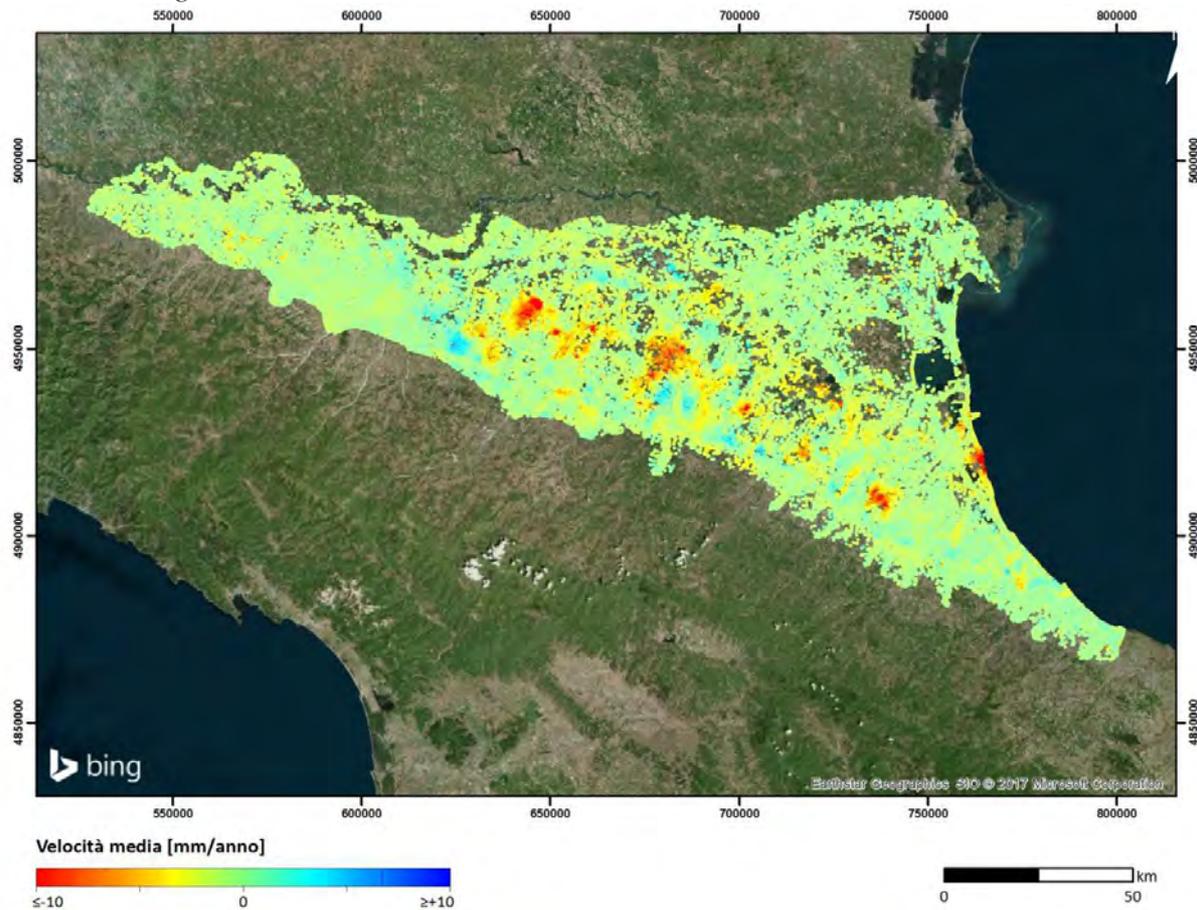
Sul sito di Rimini sono stati individuati 20.182 punti di misura, con una densità media di 56 MP/Km<sup>2</sup>. La distribuzione dei punti, visualizzati per velocità media annua e relativa deviazione standard è mostrata in *Figura 11*.



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

## 2.12 Verifica dei risultati ed allineamento a scala regionale

Al fine di preparare i dati per la successiva fase di calibrazione tramite l'elaborazione di un congruo numero di stazioni GPS, sfruttando le aree di sovrapposizione tra le varie *track* di acquisizione, è stato possibile, dapprima, verificare la coerenza tra i vari siti elaborati separatamente e, successivamente, allineare in termini di velocità tutti i siti elaborati. Sebbene ogni sito corrisponda ad un'elaborazione indipendente, ciascuna con un proprio punto di riferimento, questa procedura di confronto e allineamento permette di selezionare punti di riferimento che minimizzino le differenze di velocità media tra i vari siti. Al completamento di questa procedura i siti possono ritenersi riferiti ad un ipotetico unico punto di riferimento comune. Il campo di velocità complessivo risultante dopo l'allineamento a scala regionale è mostrato in *Figura 12*.



*Fig. 12* - Velocità media annua di movimento verticale del suolo nel periodo 2011-2016 ottenuta con l'allineamento dei siti di elaborazione a scala regionale

### **3. Analisi delle stazioni permanenti GPS**

#### **3.1 Introduzione**

Il GPS è un sistema atto a definire una base temporale e di posizionamento globale all'interno di sistemi di riferimento internazionalmente riconosciuti. Per le sue caratteristiche il GPS trova un largo impiego in campo topografico e l'attuale precisione raggiunta nella determinazione delle coordinate di un punto ne permette, per taluni impieghi, anche l'utilizzo in campo più strettamente geodetico. In tale ambito, l'uso di stazioni permanenti si rivela sempre più di interesse sia dal punto di vista pratico-operativo, a supporto delle attività tecniche topografiche in campo professionale, sia dal punto di vista scientifico, consentendo applicazioni di monitoraggio di alta precisione, essenziali per esempio nello studio della geodinamica e nel controllo delle deformazioni. Secondo alcuni studi (BLEWITT e LAVALLEE, 2002; WILLIAMS et al., 2004)<sup>2</sup> la precisione delle variazioni delle coordinate tridimensionali nel tempo determinate per tali stazioni diviene molto elevata (alcuni decimi di mm/anno) se le acquisizioni sono effettuate per intervalli di tempo lunghi, almeno superiori a 2,5 anni.

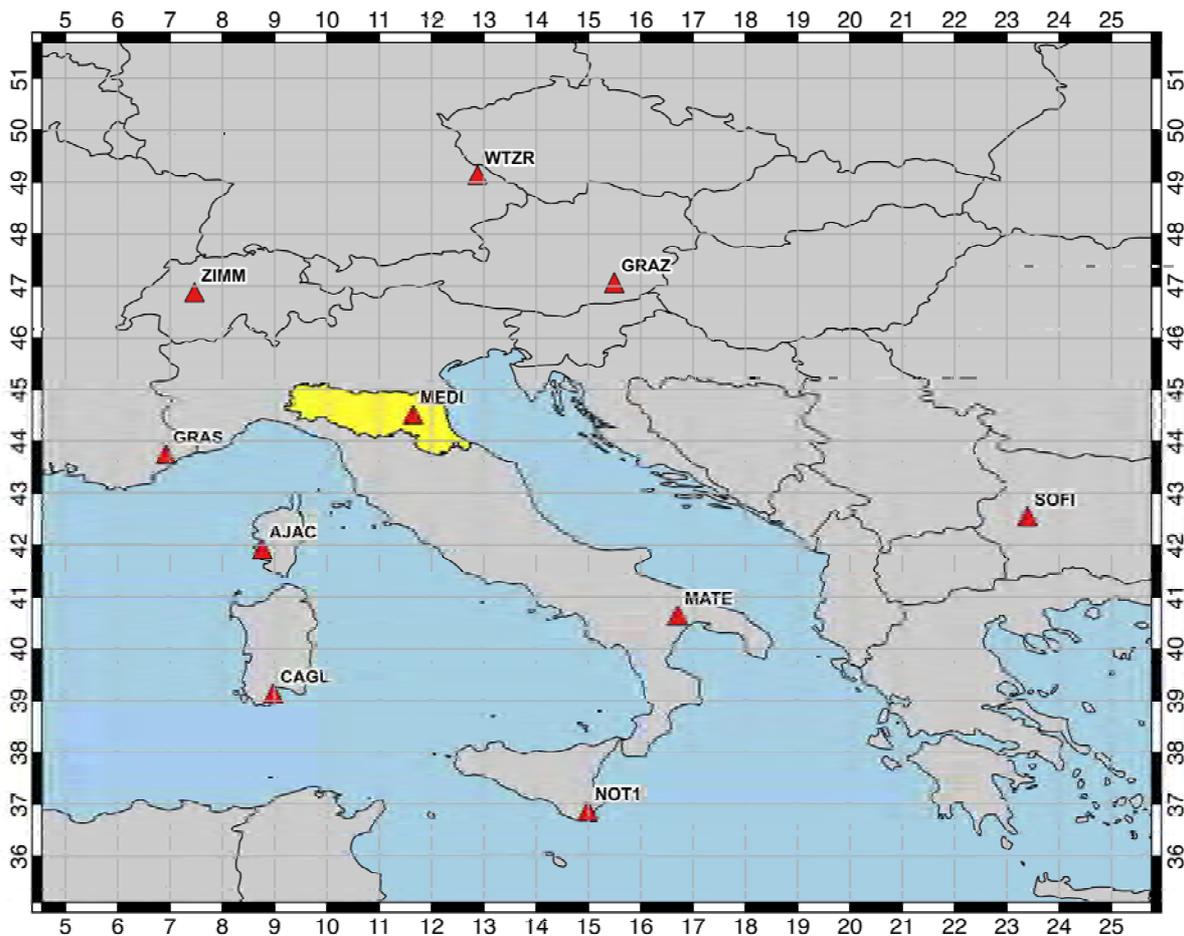
#### **3.2 Definizione della rete di inquadramento**

Per consentire l'inquadramento della rete di stazioni permanenti poste in Emilia-Romagna entro l'International Terrestrial Reference Frame (ITRF) è stato inizialmente individuato un insieme di stazioni permanenti appartenenti alla rete dell'International GNSS Service (IGS) e/o facenti parte del *IAG Reference Frame Sub-Commission for Europe* (EUREF) rispetto alle quali effettuare il calcolo delle posizioni giornaliere delle stazioni incognite. Di tale insieme fanno parte le 11 stazioni geodetiche IGS/EUREF contraddistinte dalle sigle internazionali AJAC, GRAS, GRAZ, IENG, MATE, MEDI, NOT1, SOFI, WTZR, ZIMM (*Figura 13*). Le stazioni GENO, PADO e IENG, non mostrate in figura e appartenenti anch'esse alla rete IGS, sono state utilizzate per densificare la rete.

---

<sup>2</sup> BLEWITT, G., LAVALLEE D., (2002) – *Effect of annual signals on geodetic velocity*. J. Geophys. Res., 107(B7), 2145.

WILLIAMS, S. D. P., BOCK Y., FANG P., JAMASON P., NIKOLAIDIS R., PRAWIRODIRDJO L., MILLER M., AND JOHNSON D., (2004) - *Error analysis of continuous GPS position time series*. J. Geophys. Res., 109, B03412.



**Fig. 13** - Rete di inquadramento costituita da stazioni appartenenti all'International GNSS Service (IGS)

Le acquisizioni giornaliere, effettuate con intervallo di campionamento di 30 secondi, sono state raccolte per le stazioni suddette nell'intervallo 1/6/2012 – 23/5/2016, iniziando l'analisi dopo gli importanti eventi sismici avvenuti in Pianura Padana il 20 e il 29 maggio 2012.

A questo archivio di dati (in formato RINEX) si sono aggiunte le acquisizioni delle effemeridi precise dei satelliti, le correzioni degli orologi, i modelli ionosferici globali IGS, i parametri di orientamento terrestre, le calibrazioni assolute delle antenne dei satelliti e dei ricevitori a terra nonché il modello di marea adattato alle posizioni delle stazioni analizzate. Inoltre, è stato necessario acquisire le coordinate di riferimento e le velocità (IGS2014) delle singole stazioni di riferimento associate alle eventuali discontinuità dovute a cambi nella configurazione strumentale e/o a modifiche dei manufatti di installazione dell'antenna.

### **3.3 Stazioni permanenti analizzate nell'area di pianura della Regione Emilia-Romagna**

Dopo aver effettuato un preliminare censimento delle stazioni permanenti GPS presenti nell'area oggetto d'indagine (confine regionale e quota limite fissata all'isoipsa 100 metri indicata in azzurro in *Figura 14*), sono state individuate le stazioni attive da almeno tre anni per le quali potessero essere disponibili le acquisizioni giornaliere con un intervallo di campionamento di 30 secondi. Sono state così individuate e analizzate 33 stazioni permanenti GPS ubicate all'interno della regione, a queste sono state aggiunte 3 ulteriori stazioni situate oltre il confine amministrativo ma ad esso limitrofe. L'insieme delle 36 stazioni complessivamente analizzate è riportato in *Tabella 3* e *Figura 14* : 22 stazioni sono ubicate nell'area di pianura interessata dall'analisi interferometrica, tra queste ultime, 16 stazioni sono

servite per la definizione del *datum* di velocità dell'analisi interferometrica, mentre le restanti 6 stazioni sono state utilizzate per verifiche locali a posteriori.

Le stazioni analizzate appartengono a diverse infrastrutture geodetiche:

- 5 stazioni fanno parte delle reti globali scientifiche IGS-EUREF;
- 11 stazioni sono appartenenti alla rete RING gestita dall'INGV, materializzata principalmente per studi di geodinamica attuale;
- 12 stazioni sono parte della rete di stazioni permanenti GNSS istituita dalla NetGEO per scopi tecnici dalla società GEOTOP-TOPCON, in particolare per il posizionamento topografico di precisione in tempo reale, che include a sua volta le stazioni del servizio regionale della Fondazione Geometri e Geometri Laureati dell'Emilia Romagna;
- 6 stazioni sono parte della rete di stazioni permanenti GNSS istituita da HEXAGON denominata ItalPoS per i medesimi scopi di cui al punto precedente;
- 2 stazioni sono state rese disponibili ad ARPAE da parte di ENI (FIUN) e STOGIT (MINE).

ID	STAZIONE	RETE	LATITUDINE	LONGITUDINE
1	BGDR	RING	43.889.062	11.894.963
2	BLGN	RING	44.510.996	11.350.575
3	BOBB	NetGEO	44.770.626	9.383.442
4	BOLG	EUREF	44.500.217	11.356.775
5	BOLO	ItalPoS	44.487.619	11.328.837
6	BORR	ItalPoS	44.306.241	10.695.983
7	BRAS	RING	44.122.166	11.113.084
8	BRIS	RING	44.224.817	11.766.047
9	CAST	NetGEO	44.431.633	10.405.270
10	CODI	NetGEO	44.836.676	12.111.974
11	FERA	ItalPoS	44.813.582	11.627.038
12	FERR	NetGEO	44.827.857	11.601.271
13	FIUN	ENI	44.397.258	12.315.941
14	GARI	EUREF	44.676.903	12.249.437
15	GUAS	NetGEO	44.917.759	10.662.288
16	ITIM	NetGEO	44.347.499	11.717.932
17	ITRN	NetGEO	44.048.322	12.582.075
18	MEDI	IGS/EUREF	44.519.958	11.646.817
19	MINE	ENI	44.607.415	11.501.423
20	MODE	RING	44.628.953	10.948.706
21	MOPS	EUREF	44.629.354	10.949.196
22	MSEL	EUREF	44.520.034	11.646.493
23	MTRZ	RING	44.312.758	11.424.984
24	PAMA	ItalPoS	44.799.917	10.361.008
25	PARM	RING	44.764.571	10.312.189
26	PCCC	NetGEO	45.043.151	9.689.740
27	PESR	RING	43.941.033	12.840.526
28	PIAC	ItalPoS	45.043.228	9.689.794
29	PTO1	RING	44.951.520	12.334.053
30	RAMS	ItalPoS	44.411.358	10.278.151
31	RAVE	NetGEO	44.405.296	12.191.882
32	REGG	NetGEO	44.706.372	10.636.853
33	SBPO	RING	45.051.000	10.919.771
34	SGIP	RING	44.635.529	11.182.719
35	TARO	NetGEO	44.487.859	9.765.745
36	VERG	NetGEO	44.287.416	11.110.521

**Tabella 3** - Stazioni, reti di appartenenza e coordinate geografiche (gradi e decimali)



**Fig. 14** - Ubicazione delle stazioni permanenti analizzate (la linea azzurra indica l'area oggetto di indagine)

Tali misure sono state opportunamente organizzate a livello informatico, assieme alle osservazioni contemporanee acquisite dalle 11 stazioni permanenti di inquadramento descritte al paragrafo 3.2.

Il calcolo si è basato su un'analisi alle doppie differenze di fase realizzata mediante il software scientifico Bernese v5.2. L'approccio differenziale è basato sull'acquisizione contemporanea di più ricevitori geodetici in grado di registrare le fasi delle portanti dei segnali GPS. Si tratta di un metodo consolidato che è alla base del posizionamento di alta precisione utilizzato anche per la misura delle reti globali (es. la rete del servizio IGS), che contribuiscono alla definizione del sistema di riferimento terrestre internazionale (ITRF).

In questo caso le antenne GPS di classe geodetica, sono installate in modo permanente sui vertici da monitorare e permettono la memorizzazione dei segnali provenienti dalla costellazione satellitare all'interno dei ricevitori ad esse collegati. Le osservazioni utili sono quelle acquisite contemporaneamente da più ricevitori sia per le componenti di codice, che per quelle di fase, misurate su più portanti. In virtù di questo è possibile, attraverso appropriate combinazioni lineari delle osservazioni, eliminare e/o ridurre fortemente l'effetto di alcuni effetti sistematici che perturbano in modo significativo le soluzioni GPS, permettendo così di raggiungere accuratèzze centimetriche e sub-centimetriche nella stima delle posizioni relative giornaliere.

Attraverso la realizzazione di apposite procedure di calcolo automatizzate è stata analizzata per ciascuna giornata di misura del periodo considerato una rete giornaliera di vettori GPS indipendenti congiungenti le diverse stazioni tra loro. Questo approccio ha quindi permesso di ottenere per ciascuna stazione e per ciascun giorno di misura, il posizionamento di precisione di ciascuna antenna.

La serie di posizioni tridimensionali giornaliere ha poi consentito di effettuare un'analisi statistica delle intere serie temporali al fine di stimare i parametri di velocità di movimento cercati.

### 3.4 Elaborazione delle osservazioni giornaliere

Per il calcolo delle *baseline* tra le diverse stazioni è stato utilizzato il software scientifico *Bernese GPS Post Processing v5.2* (DACH et al., 2015)<sup>3</sup>, automatizzando l'analisi mediante l'uso del Bernese Processing Engine - BPE.

I principali parametri di elaborazione possono essere così sintetizzati:

- analisi tradizionale alle doppie differenze di fase;
- campionamento a 30 secondi mediante l'impiego di orbite precise e parametri di orientamento terrestre (ERP) pubblicati dalle agenzie internazionali IGS;
- angolo di *cut-off* fissato a  $10^\circ$  rispetto all'orizzonte locale per la stima finale dei parametri;
- le stime a priori per i ritardi troposferici sono state calcolate usando la funzione mappante globale GMF *dry* per la parte idrostatica, mentre i parametri lineari troposferici sono stati stimati con intervallo di 1 ora usando la GMF *wet* per la componente umida, in modo da ottenere il ritardo zenitale totale;
- i termini di prim'ordine del ritardo ionosferico sono stimati attraverso combinazioni lineari *iono-free* delle osservabili L1 e L2;
- circa le calibrazioni delle antenne sono stati adottati modelli di calibrazione assoluta per la definizione della variazione delle posizioni dei centri di fase delle antenne dei ricevitori e dei satelliti al variare dell'elevazione e dell'azimut delle acquisizioni (*Absolute Antenna Phase Center Variation Model definiti in ambito IGS*);
- la risoluzione delle ambiguità di fase è stata realizzata adottando l'approccio *Quasi-Ionosphere Free (QIF) strategy*, utilizzando come valori a priori i valori forniti dai modelli ionosferici globali distribuiti dall'Università di Berna (CODE);
- il *datum* è stato fissato a minimi vincoli imponendo la condizione di *No-Net Rotation* (NNR), fissando debolmente le coordinate a priori definite nel sistema ITRF2014 delle stazioni permanenti IGS incluse nella rete di inquadramento.

Nel corso dell'analisi i dati di *output* giornalieri sono stati archiviati in appositi cartelle, utilizzando un formato standard per le soluzioni (SINEX). Terminata l'elaborazione dell'intero periodo di acquisizione sono state estratte dai SINEX le coordinate geocentriche (XYZ) di ciascuna stazione ed i parametri di precisione associati.

L'analisi di serie temporali di coordinate secondo le direzioni della terna di riferimento geocentrica sarebbe però poco utile al fine di una scomposizione dei movimenti secondo le direzioni verticale e orizzontale, pertanto le coordinate cartesiane geocentriche sono state preventivamente trasformate in un sistema geodetico locale, secondo le direzioni N (Nord), E (Est), U (Up), utilizzando come polo di emanazione la posizione iniziale di ciascuna stazione. Al fine di ottenere un'analisi statistica consistente dell'intera serie di soluzioni giornaliere è stata trasformata nel sistema geodetico locale anche la matrice di varianza e covarianza associata alle soluzioni stesse.

---

<sup>3</sup>DACH R., LUTZ S., WALSER P., FRIDEZ P., (2015) – *Bernese GNSS Software Version 5.2*. AIUB, Astronomical Institute, University of Bern, 2015.

### 3.5 Stima delle velocità di movimento (ITRF2014)

Le serie temporali ottenute sono state trattate con un software specifico (HERRING, 2003)<sup>4</sup>, mediante il quale sono stati realizzati il filtraggio degli *outlier*, il calcolo delle velocità (data dalla pendenza delle rette di regressione delle serie) e l'*output* grafico della serie temporale per le tre coordinate N, E, U, nonché il calcolo delle componenti periodiche con frequenza annuale e semi-annuale.

Nella sezione dedicata alle monografie delle stazioni GPS (*Appendice I*) si riportano per ciascuna stazione le analisi di dettaglio effettuate dei residui *detrended* delle serie temporali, secondo le componenti N, E, U. Inoltre, vengono evidenziate le velocità orizzontali e verticali ottenute dall'analisi delle serie temporali calcolate nel sistema geocentrico ITRF2014 e trasformate nel sistema geodetico locale. Le velocità planimetriche stimate sono in gran parte espressione delle velocità di deriva continentale della placca euroasiatica. In *Tabella 4* si riporta la velocità, secondo la componente verticale, stimata per ciascuna stazione di pianura compresa nell'area di indagine.

### 3.6 Stima delle velocità relative

Per il Teorema di Eulero ogni movimento di traslazione su una superficie di riferimento sferica, per quanto complicato sia, è sempre esprimibile con una sequenza di rotazioni. Una relazione fondamentale del moto rigido stabilisce che la velocità di un punto su di una placca è sempre descritto sul piano tangente alla sfera, perché il prodotto scalare della velocità per il raggio vettore risulta nullo. Pertanto, punti appartenenti ad una stessa placca avente velocità angolare costante hanno una velocità lineare che cresce all'aumentare della loro distanza dall'asse di rotazione.

Attraverso la conoscenza delle velocità di movimento desunte dal GPS, per un certo numero di stazioni ben distribuite in un'area, è possibile stimare la posizione di un polo di rotazione (polo euleriano) e la velocità di rotazione rigida seguita da tali punti.

Se alle velocità osservate nel sistema di riferimento globale vengono sottratte le velocità di rotazione rigida desunte dalla stima di un polo euleriano è pertanto possibile ottenere una valutazione delle velocità di movimento relativo tra le stazioni stesse (movimenti residui intra-placca).

Al fine di ottenere una stima approssimata dei movimenti orizzontali relativi entro il territorio regionale (*Tabella 4*) è stato pertanto sottratto il moto di rotazione di un polo euleriano desunto per la Regione Emilia-Romagna a partire dalle velocità planimetriche calcolate per tutte le 36 stazioni permanenti elencate in *Tabella 3*

Nella *Tabella 4* per ciascuna stazione ricadente nell'area oggetto d'indagine, vengono riportate le velocità orizzontali nord e est con gli scarti quadratici medi associati ( $V_N \pm sV_N$ ,  $V_E \pm sV_E$ , in mm/anno) stimate nel sistema di riferimento globale; le velocità orizzontali nord e est relative al solo territorio regionale ( $dV_N$ ,  $dV_E$ ). Nelle ultime 2 colonne sono riportate le velocità verticali con gli scarti quadratici medi associati ( $V_U$ ,  $sV_U$ ): in rosso sono evidenziate le velocità verticali delle 16 stazioni utilizzate per la calibrazione dei dati interferometrici, in nero le velocità verticali delle 6 stazioni utilizzate per verifica.

---

<sup>4</sup> Herring T., (2003) – *MATLAB Tools for viewing GPS velocities and time series*. GPS Solutions, 7, 194-199.

ID	STAZIONE	V_N	sV_N	dV_N	V_E	sV_E	dV_E	V_U	sV_U
1	BOLG	18.78	0.42	1.368	22.08	0.17	0.435	1.53	0.40
2	BOLO	18.72	0.29	1.277	22.09	0.13	0.431	-1.18	0.29
3	CODI	17.27	0.11	-0.355	21.18	0.09	-0.362	-3.20	0.18
4	FERA	17.48	0.05	-0.012	21.52	0.06	0.025	-1.31	0.26
5	FERR	17.49	0.30	-0.004	20.99	0.16	-0.458	-1.04	1.10
6	FIUN	15.84	0.04	-1.915	27.92	0.17	5.948	-12.40	0.14
7	GARI	17.32	0.07	-0.395	21.11	0.08	-0.617	-2.81	0.40
8	GUAS	17.02	0.11	-0.224	20.34	0.04	-0.886	-1.52	0.39
9	ITIM	18.25	0.05	0.661	22.07	0.07	0.238	-3.39	0.59
10	ITRN	18.97	0.05	1.207	22.34	0.08	0.018	0.00	0.84
11	MEDI	18.68	0.19	1.182	21.41	0.36	-0.311	-2.74	0.52
12	MINE	20.53	1.47	3.025	22.17	0.33	0.589	-1.47	0.70
13	MODE	19.67	0.28	2.390	22.31	0.03	0.824	-1.68	0.51
14	MOPS	19.29	0.19	1.990	22.23	0.06	0.724	-1.69	1.14
15	MSEL	18.34	0.16	0.782	22.32	0.17	0.589	-0.44	0.72
16	PAMA	16.91	0.04	-0.232	20.83	0.14	-0.416	-1.25	0.30
17	PARM	17.52	0.08	0.382	21.81	0.07	0.566	0.46	0.80
18	PCCC	16.71	0.29	-0.228	20.70	0.05	-0.181	-0.84	0.20
19	PIAC	17.28	0.13	0.372	20.59	0.08	-0.281	0.55	0.55
20	RAVE	18.54	0.10	0.822	22.75	0.07	0.782	-5.22	0.97
21	REGG	17.33	0.16	0.084	23.18	0.21	1.851	1.32	1.20
22	SGIP	19.62	0.36	2.220	20.13	0.46	-1.421	-3.04	0.47

**Tabella 4** - Velocità orizzontali stimate nel sistema di riferimento globale e scarti quadratici medi associati ( $V_N \pm sV_N$ ,  $V_E \pm sV_E$ , in mm/anno); velocità orizzontali relative ( $dV_N$ ,  $dV_E$ ) per tutte le stazioni analizzate nell'area oggetto di indagine. Velocità verticali delle stazioni utilizzate per la calibrazione dei dati interferometrici e scarti quadratici medi associati ( $V_U$ ,  $sV_U$ ): in rosso le velocità verticali delle stazioni utilizzate per la calibrazione dei dati interferometrici, in nero le velocità verticali di ulteriori stazioni utilizzate per verifica

Le discontinuità riconosciute nell'ambito delle serie temporali di ciascuna componente (linea magenta nel grafico delle serie temporali N, E, U, vedi monografie) sono dovute essenzialmente alla sostituzione parziale o totale della strumentazione (ricevitore e/o antenna), riportata nei *logfile* di ogni stazione. Nell'Appendice I sono riportate le monografie di ciascuna stazione calcolata.

## **4. Calibrazione e verifiche**

### **4.1 Introduzione**

L'attività di seguito descritta è costituita dal complesso di operazioni finalizzate alla calibrazione e alle verifiche alle quali sono stati sottoposti i risultati dell'analisi interferometrica, secondo un approccio già collaudato nella precedente campagna di rilievo relativa al periodo 2006-11.

La calibrazione è stata realizzata tramite l'utilizzo di stazioni permanenti GPS, le cui velocità sono state calcolate nel periodo successivo agli importanti eventi sismici che hanno colpito il territorio della Regione Emilia-Romagna nel maggio del 2012. In particolare, al fine di stimare le velocità di riferimento desunte dal GPS in modo congruente con le velocità presenti a valle degli effetti indotti dal sisma, si è fatto riferimento alle acquisizioni GPS registrate tra il giugno 2012 e il giugno 2016.

L'area oggetto d'indagine (AOI) analizzata corrisponde al territorio di pianura regionale, con una fascia di qualche chilometro oltre l'isoipsa di quota 100 m. L'estensione totale dell'AOI è di circa 13.300 km<sup>2</sup>.

I dati utilizzati nell'ambito del lavoro sono stati:

- i risultati dell'analisi delle serie temporali delle stazioni permanenti GPS, elaborati grazie alla contemporaneità delle osservazioni con quelle acquisite da alcune stazioni GPS permanenti appartenenti alla rete dell'International GNSS Service (IGS) e/o facenti parte del IAG Reference Frame Sub-Commission for Europe (EUREF);
- i risultati dell'analisi interferometrica SqueeSAR<sup>TM</sup>;
- i dati cartografici di base e database di immagini satellitari ad alta risoluzione.

I principali aspetti trattati sono stati:

- definizione di un *datum* di velocità per l'asservimento all'analisi interferometrica e verifica a posteriori sull'efficacia del suo utilizzo nella fase di calibrazione del dato interferometrico;
- analisi statistiche sulla distribuzione spaziale e sulla tipologia dei punti di misura, impiego di procedure di screening e validazione del *dataset* complessivo per l'individuazione e la rimozione di eventuali *outlier*;
- interpolazione delle velocità desunte dall'analisi interferometrica al fine di produrre sia un modello *raster* delle velocità di movimento verticale del suolo per l'area di pianura della Regione sia la cartografia a curve isocinetiche.

### **4.2 I dati disponibili**

L'elaborazione dei dati radar acquisiti sull'area d'interesse, condotta con la tecnica SqueeSAR<sup>TM</sup>, ha permesso di individuare e localizzare i punti di misura presenti, stimarne le velocità medie annue di spostamento lungo la linea di vista del satellite e le relative serie storiche di spostamento. I dati radar di base sono costituiti da immagini RADARSAT-2 (RSAT) e COSMO-SkyMed (CSK) in geometria ascendente con risoluzione di 20x5 m e 3x3 m rispettivamente.

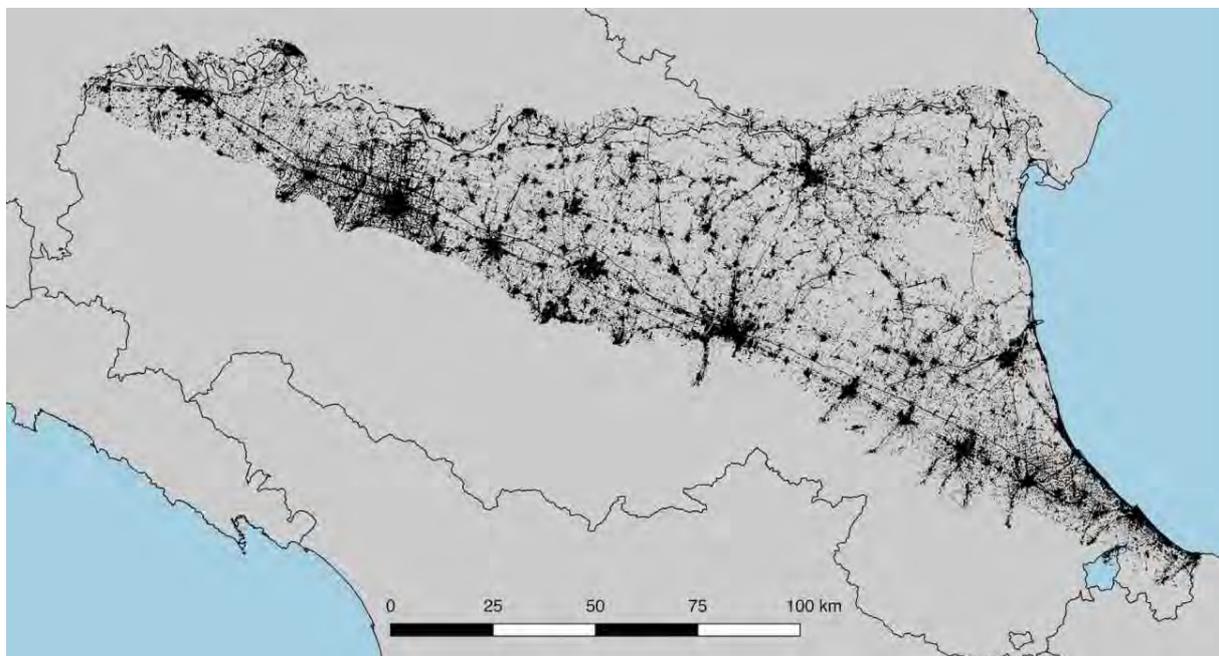
Le elaborazioni sono state condotte per 6 *track*, successivamente allineate tra loro e portate entro il sistema geodetico-cartografico UTM-WGS84 (fuso 32).

I punti di misura, risultanti dall'analisi SqueeSAR™, sono accompagnati da una serie di attributi tra cui la velocità media di spostamento (mm/anno) nel periodo monitorato e la serie storica di spostamento (in mm) lungo la linea di vista del satellite.

Il database complessivo consta di 1.974.150 punti (*Figura 15*) suddivisi in 6 *track*; la *Tabella 5* riporta alcuni dati significativi sulle 6 *track* processate.

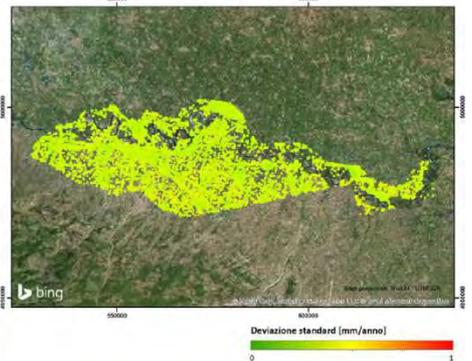
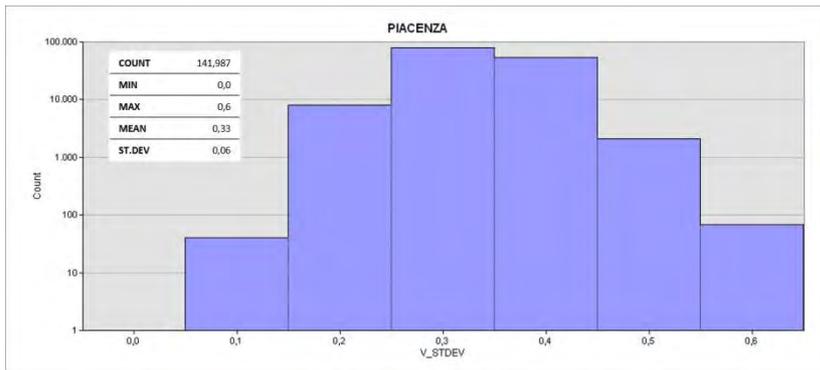
ID	Track	Satellite	Totali	Area (km <sup>2</sup> )	Densità (punti/km <sup>2</sup> )	Inizio	Fine	N° immagini
1	Piacenza	RST	141.987	4.715	62	24/05/2011	09/05/2016	73
2	Parma	CSK	1.285.490	573	1.456	03/05/2011	14/04/2016	66
3	Bologna	RST	166.358	4.715	40	07/05/2011	16/05/2016	69
4	Mirandola	RST	34.262	3.726	23	06/06/2012	16/05/2016	55
5	Ravenna	RST	325.871	9.738	48	14/05/2011	23/05/2016	75
6	Rimini	RST	20.182	269	50	02/05/2011	23/05/2016	70

**Tabella 5** - Dati caratteristici relativi alle 6 *track* processate

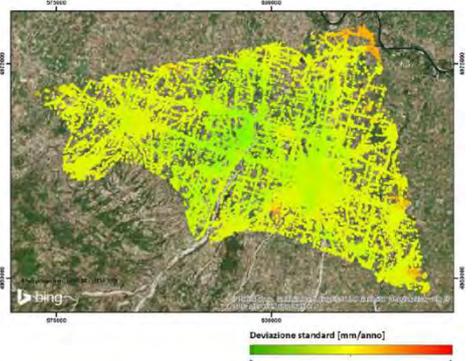
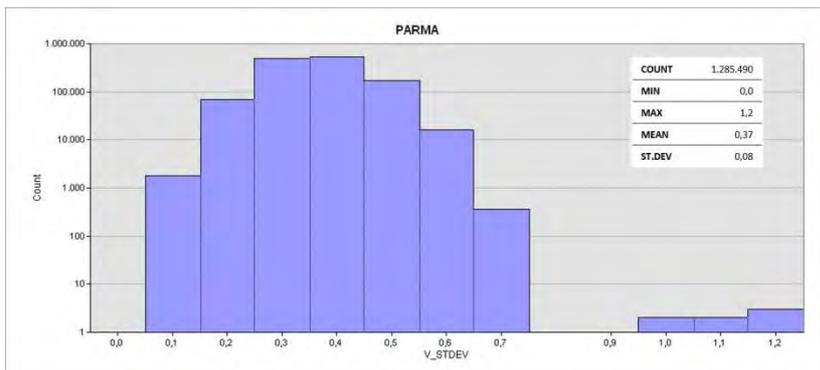


**Fig. 15** - Distribuzione dei punti risultanti dall'analisi interferometrica

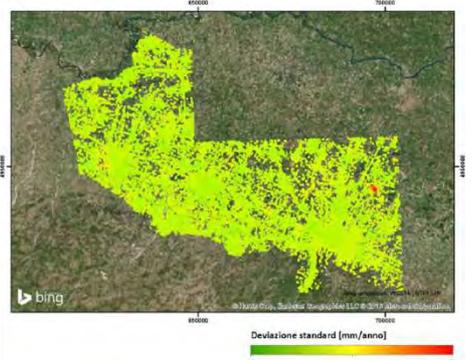
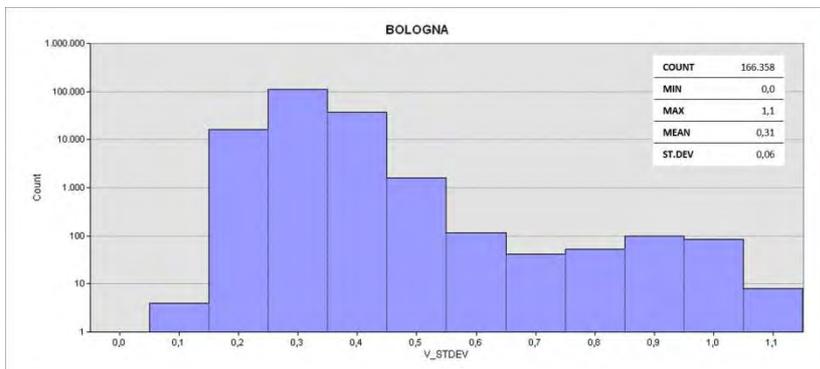
Ogni punto è corredato da un valore di deviazione standard da associare alla velocità calcolata. Nelle *Figure 16, 17, 18, 19, 20 e 21* viene presentata questa informazione per ogni sito sia in forma di istogramma sia in forma di distribuzione planimetrica su base GIS, mediante classificazione in scala di colori dei valori di deviazione standard associati ai bersagli radar. Si ricorda che la deviazione standard associata alla velocità di movimento di un bersaglio radar è legata alla distanza fisica tra il punto considerato ed il riferimento scelto per la *track*, alla qualità del punto di misura (coerenza di fase) e alla qualità della stima della componente atmosferica.



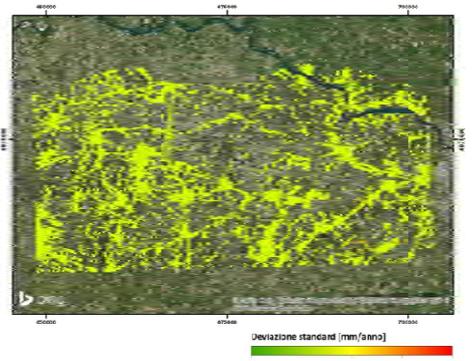
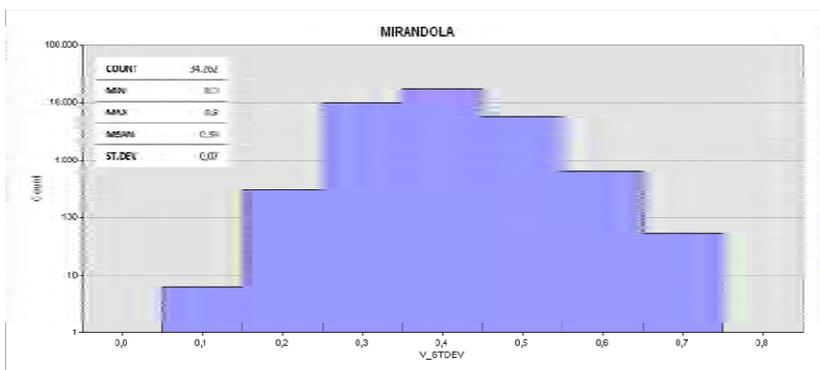
**Fig. 16** - Deviazione standard associata al dato di velocità derivato dall'analisi interferometrica: Sito Piacenza



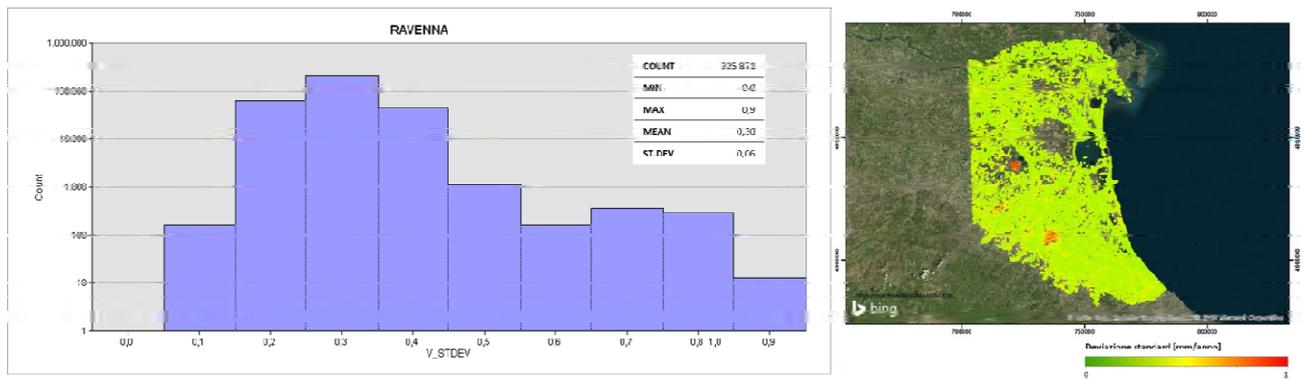
**Fig. 17** - Deviazione standard associata al dato di velocità derivato dall'analisi interferometrica: Sito Parma



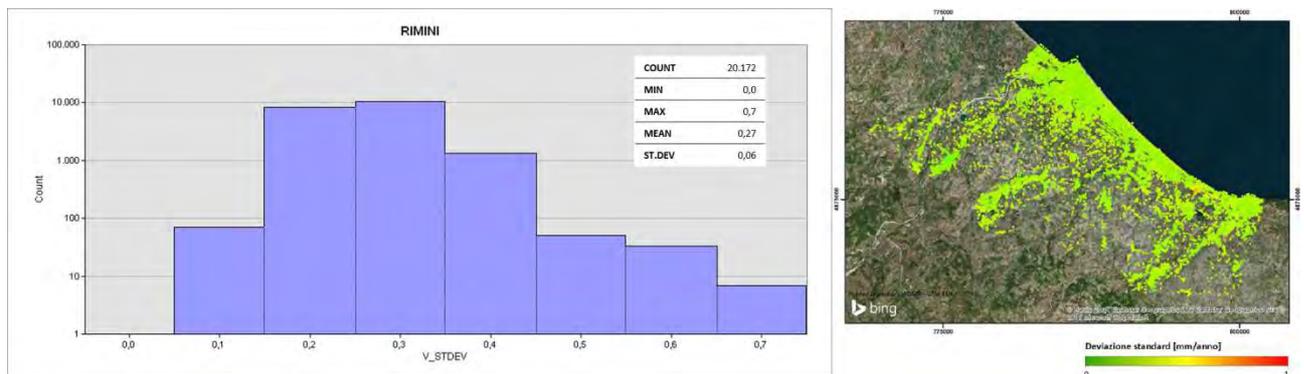
**Fig. 18** - Deviazione standard associata al dato di velocità derivato dall'analisi interferometrica: Sito Bologna



**Fig. 19** - Deviazione standard associata al dato di velocità derivato dall'analisi interferometrica: Sito Mirandola



**Fig. 20** - Deviazione standard associata al dato di velocità derivato dall'analisi interferometrica: Sito Ravenna



**Fig. 21** - Deviazione standard associata al dato di velocità derivato dall'analisi interferometrica: Sito Rimini

In ogni *track* è presente un unico PS di riferimento, con deviazione standard nulla e coerenza pari ad 1. In tutti gli altri punti della *track* la deviazione standard è calcolata rispetto al punto di riferimento ed aumenta proporzionalmente alla distanza fisica tra il punto di riferimento ed il punto in analisi. Sull'intero *dataset* il valore massimo raggiunto dalla deviazione standard è risultato di 1,2 mm/anno. Rispetto alle precedenti esperienze condotte con analisi interferometrica sul territorio regionale, i valori massimi di deviazione standard sono dello stesso ordine di quelli ottenuti con dati RADARSAT-1 per il periodo 2006-2011 (massima deviazione standard pari a 1,4 mm/anno) e ERS per il periodo 1992-2000; i dati risultano invece migliori di quelli ottenuti mediante l'impiego dei sensori Envisat e RADARSAT-1 per il periodo 2002-2006 (per il quale il numero di immagini disponibili era più ridotta).

### 4.3 Calibrazione dell'analisi interferometrica SqueeSAR™

La sequenza delle operazioni finalizzate alla calibrazione dell'analisi interferometrica sulla base delle velocità desunte dalle serie temporali GPS è stata la seguente:

1. definizione del periodo di riferimento: dati gli eventi sismici che hanno coinvolto l'area d'indagine nel Maggio 2012, per la calibrazione è stato utilizzato come periodo di riferimento, sia per il dato interferometrico sia per il dato GPS, il periodo post-sisma Giugno 2012 – Giugno 2016.
2. Proiezione dati GPS lungo la direzione di LOS (Line Of Sight): per poter fare un confronto rigoroso tra i dati di spostamento forniti dalle due tecniche è necessario riportarli lungo la stessa direzione. A tal fine, i parametri relativi alla geometria di vista dei satelliti, conosciuti per ogni sito elaborato, sono stati utilizzati per proiettare i valori di spostamento forniti dai GPS nelle tre direzioni, lungo le specifiche LOS. Questa operazione permette di

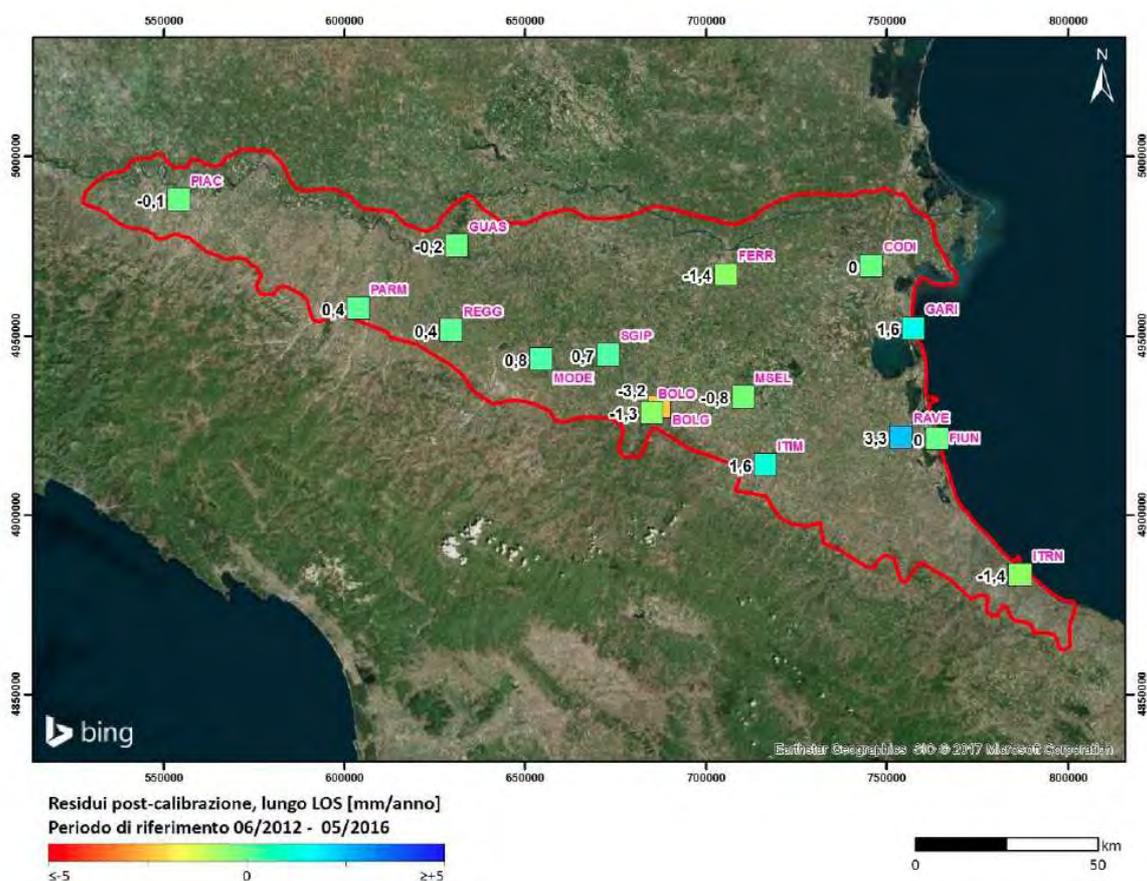
effettuare confronti rigorosi senza dover fare alcuna assunzione di base sui moti presenti nell'area.

3. Definizione della corrispondenza tra le stazioni GPS e i punti di misura SqueeSAR™. Per effettuare la stima delle differenze tra le due misure, è necessario definire una corrispondenza spaziale tra le stazioni GPS ed i bersagli radar individuati nel loro intorno. Date le differenze tra le due tecniche, non è infatti possibile stabilire una corrispondenza biunivoca tra i punti di misura. Al fine di rendere quanto più oggettiva la selezione dei bersagli radar nell'intorno della stazione GPS e minimizzare l'effetto di eventuali *outlier*, si è scelto di considerare unicamente i punti localizzati in un intorno di 100 metri dalla stazione, considerando al massimo i dieci bersagli a più alta qualità radar.

4. Confronto tra le misure di spostamento lungo LOS. Una volta definita la corrispondenza tra stazioni GPS e bersagli radar, le velocità medie di quest'ultimi sono state mediate, per stimare una velocità media di riferimento da confrontare con quella fornita dal GPS, lungo la direzione di LOS.

5. Calibrazione dati interferometrici. Dalle differenze ottenute dal confronto è stata stimata e rimossa dai dati SqueeSAR™ una componente di velocità a bassa frequenza (un piano), generalmente dovuta a componenti atmosferiche non compensate o parametri orbitali non accurati. Il risultato consiste quindi nei dati SqueeSAR™ calibrati, vincolati allo stesso sistema di riferimento della rete GPS.

La *Figura 22* e la *Tabella 6* mostrano, per le 16 stazioni utilizzate, l'entità dei residui post-calibrazione calcolati tra le velocità dedotte dall'analisi interferometrica e le velocità derivanti dalle serie storiche GPS.



**Fig. 22** - Residui post-calibrazione (mm/anno) ottenuti secondo la direzione LOS, in corrispondenza delle 16 stazioni permanenti GPS rispetto alle velocità ottenute dall'analisi interferometrica.

Nome	GPS vel	SqueeSAR vel post-calibrazione	Residui post-calibrazione
BOLG	0.9	-2.3	-3.2
BOLO	-1.4	-2.6	-1.3
CODI	-2.4	-2.4	0.0
FERR	-0.6	-2.0	-1.4
FIUN	-13.3	-13.3	0.0
GARI	-2.0	-0.4	1.6
GUAS	-0.8	-1.0	-0.2
ITIM	-3.1	-1.5	1.6
ITRN	-0.2	-1.6	-1.4
MODE	-2.1	-1.4	0.8
MSEL	-0.8	-1.6	-0.8
PARM	0.0	0.4	0.4
PIAC	0.6	0.5	-0.1
RAVE	-4.9	-1.6	3.3
REGG	0.1	0.5	0.4
SGIP	-2.1	-1.4	0.7

**Tabella 6** - Valori di velocità SqueeSAR™ post-calibrazione e relativi residui (mm/anno). Le velocità medie sono riferite alla direzione LOS. Lo scarto quadratico medio sui residui post-calibrazione risulta pari a 1,51 mm/anno

In questo modo le velocità medie di deformazione dei dati SqueeSAR™ sono state riferite al sistema di riferimento globale realizzato dalle stazioni GPS.

Successivamente, sono stati computati i valori della velocità di movimento verticale per ulteriori 6 stazioni GPS con la funzione di *check points* per un controllo cieco rispetto al risultato della calibrazione. La verifica è stata effettuata anche in questo caso sui dati a piena risoluzione e considerando le velocità ricalcolate sul periodo di misura GPS. Il dato è illustrato nella tabella *Tabella 7* nella quale, per ogni stazione, è riportata la velocità di movimento dedotta con GPS, la velocità derivata dall'analisi dei dati SqueeSAR™ sul grigliato finale e l'entità dei residui (alla velocità del GPS nel periodo è stata sottratta la velocità dei bersagli radar interpolati mediante *Kriging* e grigliati a passo regolare).

NOME	LATITUDINE	LONGITUDINE	VEL GPS (mm/anno)	VEL SAR (mm/anno)	RESIDUI
FERA	44,813582	11,627038	-1,31	-3,11	1,80
MEDI	44,519958	11,646817	-2,74	-1,92	-0,82
MINE	44,607415	11,501423	-1,47	-2,68	1,21
MOPS	44,629354	10,949196	-1,69	-1,74	0,05
PAMA	44,799917	10,361008	-1,25	-1,25	0,00

PCCC	45,043151	9,68974	-0,84	0,88	-1,72
------	-----------	---------	-------	------	-------

**Tabella 7** - Risultati del confronto tra le velocità di movimento verticale determinate con analisi interferometrica e con misure GPS per le 6 stazioni permanenti GPS considerate come check points

Il residuo medio sui 6 punti di controllo cieco è risultato pari a 0.09 mm/anno, con una deviazione standard di 1.29 mm/anno.

Il campione esaminato, seppur ristretto, consiste complessivamente in 22 stazioni permanenti GPS distribuite sul territorio di analisi. I valori ottenuti possono essere considerati del tutto soddisfacenti in una procedura di validazione della metodologia. Pertanto, volendo attribuire una soglia d'incertezza complessiva dell'intera analisi di velocità di spostamento effettuata, si ritiene che possa essere considerato il valore di circa  $\pm 2$  mm/anno, già evidenziato anche nella precedente analisi 2006-2011. Per tale motivo, come più avanti descritto, si è scelto di tracciare le curve isocinetiche nella cartografia finale con passo di 2.5 mm/anno.

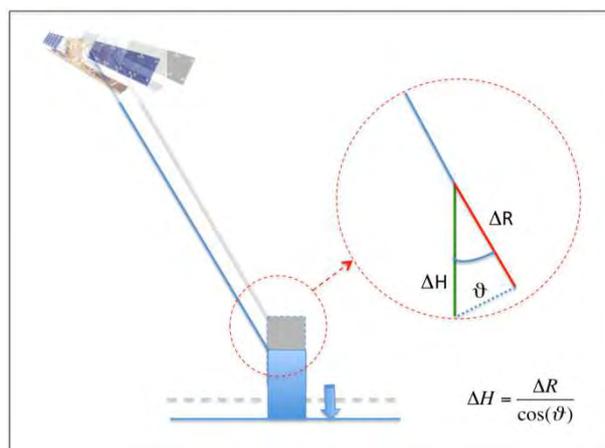
Secondo questi criteri, il *dataset* prodotto dall'analisi interferometrica può dunque ritenersi di precisione analoga a quella della precedente analisi condotta nel periodo 2006-2011.

Va infine osservato che ai fini di un utilizzo diretto delle velocità per l'analisi di subsidenza, e seguendo peraltro un approccio già verificato sperimentalmente nell'elaborazione compiuta nell'ambito della precedente analisi<sup>5</sup>, si sono ipotizzati per l'area di indagine movimenti puramente verticali, e dunque i dati sono stati riproiettati dalla LOS alla verticale (*Figura 23*). La scelta è suffragata dall'analisi dei valori di spostamento ottenuti sulle stazioni GPS considerate, che forniscono movimenti orizzontali intra-placca di entità molto modesta, ad esclusione della stazione permanente FIUN che mostra un movimento orizzontale di 5.95 mm/anno. Tale ipotesi potrebbe evidentemente non essere valida ovunque; d'altra parte è l'unica scelta consentita dal tipo di analisi SAR a disposizione, caratterizzata da una sola geometria<sup>6</sup>.

<sup>5</sup> Nell'ambito della elaborazione che fu effettuata per il periodo 2002-2006 si ebbe la disponibilità, anche se limitata all'area centrale della regione, di un *dataset* Envisat a doppia geometria (ascendente e discendente) che consentì di valutare come trascurabile, ai fini dello scopo del lavoro, l'entità delle componenti orizzontali Est-Ovest degli spostamenti misurati dai PS. Si ricorda che la tecnica SAR non consente di ottenere informazioni nella direzione Nord-Sud.

<sup>6</sup> Per avere un'idea dell'ordine di misura dell'errore che si può commettere, si prenda come esempio il sito di Ravenna. In questo caso il valore dei coseni direttori risulta il seguente: H=0.84, E=-0.53. La stazione FIUN riporta un valore di velocità verticale pari a -12.4 mm/anno e una velocità verso Est pari a 5.95 mm/anno, poco meno della metà della componente verticale. Immaginiamo quindi il caso in cui la componente orizzontale abbia un valore che corrisponde alla metà della componente verticale (cioè VVERT=1, VEW=0.5). La velocità lungo LOS risulta  $VLOS = 1*(0.84) + 0.5*(-0.53) = 0.57$  Questo vuol dire che la velocità misurata lungo la LOS corrisponde al 57% della velocità verticale.

Proiettare il valore di VLOS lungo la verticale così come operato nel presente progetto, equivale a dividere il valore lungo la LOS per il solo coseno direttore H= 0.84  $VLOS = VVERT*H$  cioè  $VVERT = VLOS/H$  cioè  $VVERT = 0.57/0.84 = 0.67$ . In questo caso staremmo quindi commettendo un errore del 33% ( $1 - 0.67 = 0.33$ ) perché sappiamo che in realtà VVERT = 1. Resta inteso che solo conoscendo il campo di velocità orizzontale sull'intero sito sarebbe possibile stimare esattamente la componente verticale.



**Fig. 23** - La velocità di movimento riportata dalla LOS( $\Delta R$ ) alla verticale ( $\Delta H$ )

#### 4.4 Verifica e validazione dei bersagli radar

Un primo obiettivo di questa fase di lavoro, preliminare alla generazione della mappa di subsidenza, è stata la ricerca dei cosiddetti *outlier* nel database dei punti SqueeSAR™, ovvero dati da considerarsi anomali che potessero portare ad un degrado nella mappatura del fenomeno globale; il comportamento “anomalo” di un punto viene qui inteso come una correlazione spaziale nulla o pressoché nulla rispetto ai bersagli radar nell’intorno geografico, con un valore che palesemente non è associabile al fenomeno che viene studiato, ma è imputabile alla situazione fisica del bersaglio (es. deformazione termica) o a problemi legati al metodo interferometrico.

Si tratta di un processo importante e al tempo stesso delicato, che deve essere condotto con metodi oggettivi su base statistica, vista l’entità dei dati da trattare, ma che deve essere anche accompagnato e suffragato da valutazioni specifiche supportate da un’analisi visiva dell’operatore.

I dati elaborati da TRE ALTAMIRA consistono in 1.974.150 punti suddivisi in 6 *track* (Tabella 8), tutti acquisiti in orbita ascendente (ASCE).

Di ogni *track* elaborata è stato fornito uno *Shapefile* contenente le informazioni di velocità (VEL: mm/anno), quota (HEIGHT: m), serie storiche e parametri di qualità di tutti i PS e DS individuati nell’analisi: tra questi la deviazione standard è calcolata rispetto al punto di riferimento locale (REF) ed aumenta con la distanza fisica tra il punto di riferimento e il PS o DS considerato. La deviazione standard raggiunge tra tutti i siti il valore massimo di 1,2 mm/anno.

La caratterizzazione dei bersagli a seguito di un’analisi SqueeSAR™ avviene secondo due categorie:

- *Permanent Scatterers* (PS): singoli punti riflettori normalmente posti su strutture stabili come edifici, rocce esposte e altri rilevati.
- *Distributed Scatterers* (DS): bersagli radar distribuiti, ovvero aree irregolari come campi non coltivati, aree detritiche o desertiche non sabbiose rilevate tramite la tecnica SqueeSAR™; in questo caso la posizione del bersaglio è associata al baricentro elettromagnetico dell’area stessa. Il dato è dunque in apparenza puntuale ma la sua natura è areale, differendo così dai dati finora comunemente usati nel monitoraggio della subsidenza (capisaldi di livellazione o vertici GPS). Si tratta però di un dato importante e prezioso in quanto sovente viene a portare indicazione in aree nelle quali

non sarebbe stata rilevata la presenza di PS e dunque sarebbero rimaste prive di informazione.

All'interno della tabella attributi di ogni file il parametro EFF\_AREA permette di distinguere PS e DS: per i primi, il valore di tale attributo è pari a 0 mentre per i secondi il valore del parametro indica l'estensione dell'area associata a ciascun punto, in metri quadrati.

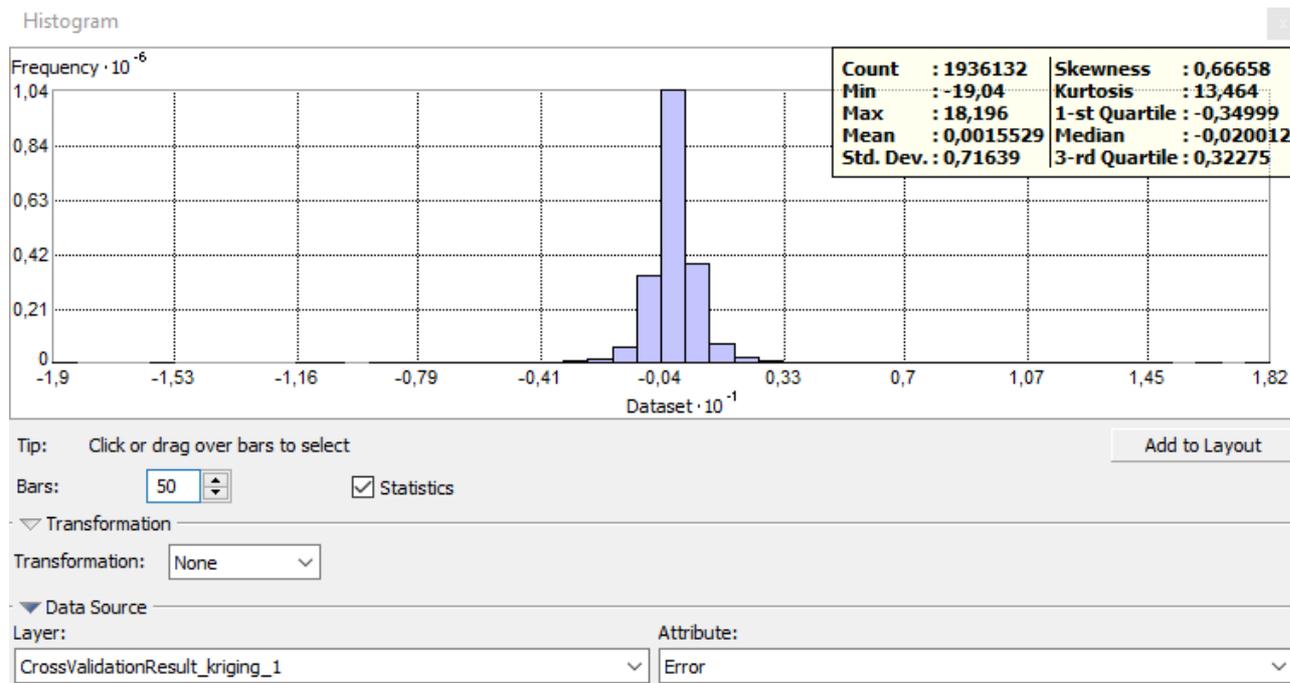
Ulteriore attributo che caratterizza la qualità del dato, come già detto, è la coerenza (COHERENCE): indice espresso tra un minimo pari a 0 ed un massimo pari ad 1, funzione dell'adattamento tra il modello di spostamento e la serie storica misurata sul punto. E' prassi consolidata (Mora et al, 2003) quella di scegliere di elaborare i dati con indice di qualità pari o maggiore di 0,70. Nel caso in oggetto questa selezione porta a considerare un totale di 1.936.132 punti (Tabella 8).

ID	TRACK	PS/DS iniziali	Coherence $\geq 0,70$
1	PIACENZA	141.987	140.894
2	PARMA	1.285.490	1.252.127
3	BOLOGNA	166.358	166.295
4	MIRANDOLA	34.262	34.262
5	RAVENNA	325.871	322.400
6	RIMINI	20.182	20.154
	<b>TOTALE</b>	<b>1.974.150</b>	<b>1.936.132</b>

*Tabella 8 - Bersagli radar iniziali e bersagli con coerenza superiore a 0,7.*

Per isolare gli *outlier* nel *dataset* analizzato, è stata seguita una procedura automatica che ha consentito di confrontare la velocità di spostamento predetta del punto, stimata utilizzando i dati nel suo intorno, con la velocità di spostamento misurata.

L'analisi è stata effettuata tramite *Kriging*, un interpolatore esatto per la stima ottimale di una grandezza distribuita nello spazio. Sulla base delle osservazioni disponibili vengono stimati tutti i valori desiderati, disponendo inoltre di un'informazione sull'affidabilità per ogni valore noto. I risultati ottenuti dall'interpolazione derivante dal *Kriging* vengono dati in input alla fase di *Cross Validation*: procedura che rimuove uno ad uno i punti misurati e ne calcola il valore sfruttando i dati adiacenti. Si ottiene così un nuovo dato, definito "Error", pari alla differenza tra il valore predetto e il valore misurato (VEL) della velocità di spostamento. E' stato verificato che il valore atteso di "Error" sia nullo al fine di confermare l'ipotesi di stazionarietà, necessaria per l'analisi tramite *Kriging* (Figura 24).



**Fig. 24** - Distribuzione in forma di istogramma della variabile "Error"

Al fine di mantenere la procedura di analisi in corso coerente con quanto eseguito per la produzione della precedente cartografia, anche in questa circostanza si è optato per elaborare congiuntamente PS e DS. Infatti, è stata confermata l'analogia nei prodotti derivati trattando separatamente o congiuntamente PS e DS.

Allo stesso modo si è proceduto con l'analisi in blocco di tutte le 6 *track* a disposizione, creando così un'unica mappa unita e coerente dell'intera regione, verificando a priori che non sussistessero problematiche o criticità in corrispondenza dei bordi delle *track* analizzate.

Il *dataset* così formato è stato quindi sottoposto a procedura di *Ordinary Kriging* tramite *Geostatistical Analyst*. La procedura è stata eseguita in passaggi iterativamente, selezionando in fasi successive i punti presso i quali la deviazione standard del parametro "Error" ("Stdd Error" superava la soglia di  $5\sigma$ . I punti così individuati sono stati etichettati come "outlier", mentre i restanti punti, che si trovano al di sotto della soglia impostata, sono stati conservati per la successiva iterazione (*step*).

L'analisi tramite *Kriging* richiede l'elaborazione del Variogramma sperimentale sul quale scegliere il modello del Variogramma necessario per assegnare i pesi ai punti misurati. Tale procedura viene eseguita in automatico dal software lasciando all'utente la possibilità di inserire manualmente i parametri principali. Nello specifico il modello scelto è "Stable", corrispondente ad un modello Gaussiano. Si è impostato a 200 m il "Lag Size" e pari a 12 il numero di Lag, al fine di ottenere un "Major Range" pari a 2.400 m, distanza oltre la quale le osservazioni non vengono più considerate correlate. I valori di "Nugget" e "Partial Sill" invece sono stati automaticamente calcolati dal software (*Figure 25 e 26*).

Il raggio di cattura è impostato pari al valore del "Major Range", definito nel modello del Variogramma, risultando essere un valore congruente con gli obiettivi dell'individuazione degli *outlier* locali. Sono stati impostati 4 settori di ricerca, inclinati di  $45^\circ$ , all'interno dei quali individuare un minimo di 2 e un massimo di 5 punti. In zone a bassa densità di punti, ove non sia possibile raggiungere i requisiti minimi richiesti, l'algoritmo si spinge anche all'esterno dei settori di cattura. Ai punti più vicini viene assegnato un peso maggiore rispetto ai punti più lontani (*Tabella 9*).

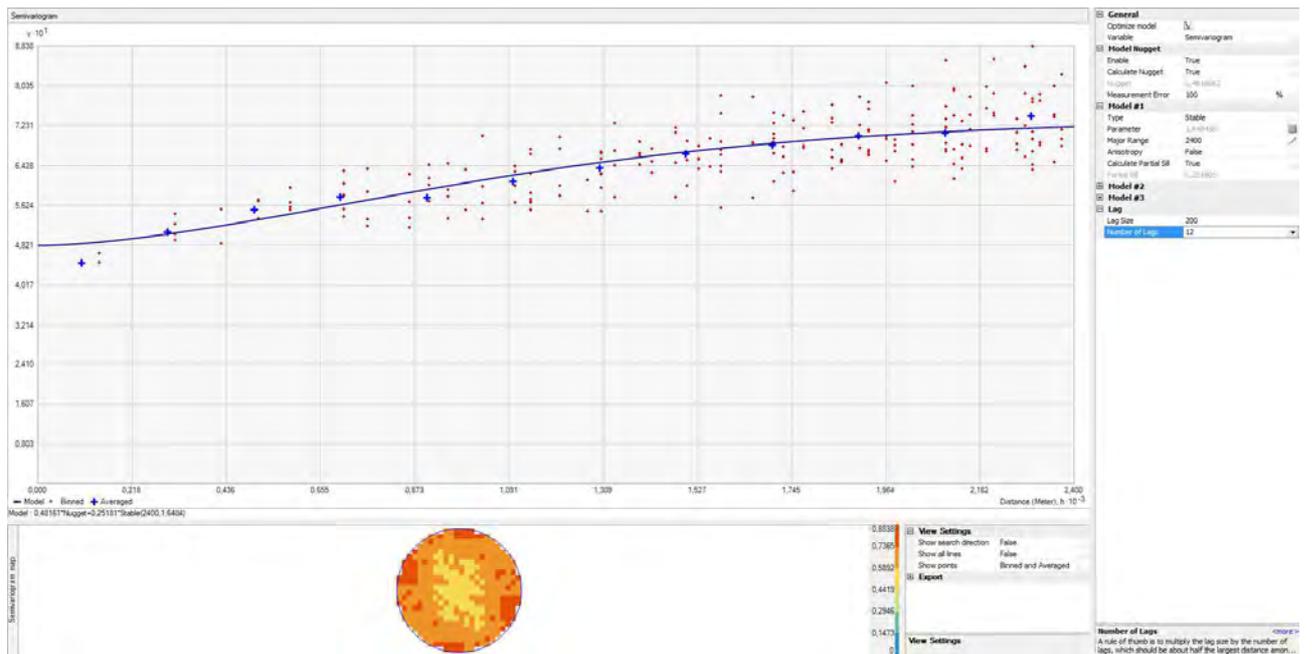


Fig. 25 - Variogramma step 1

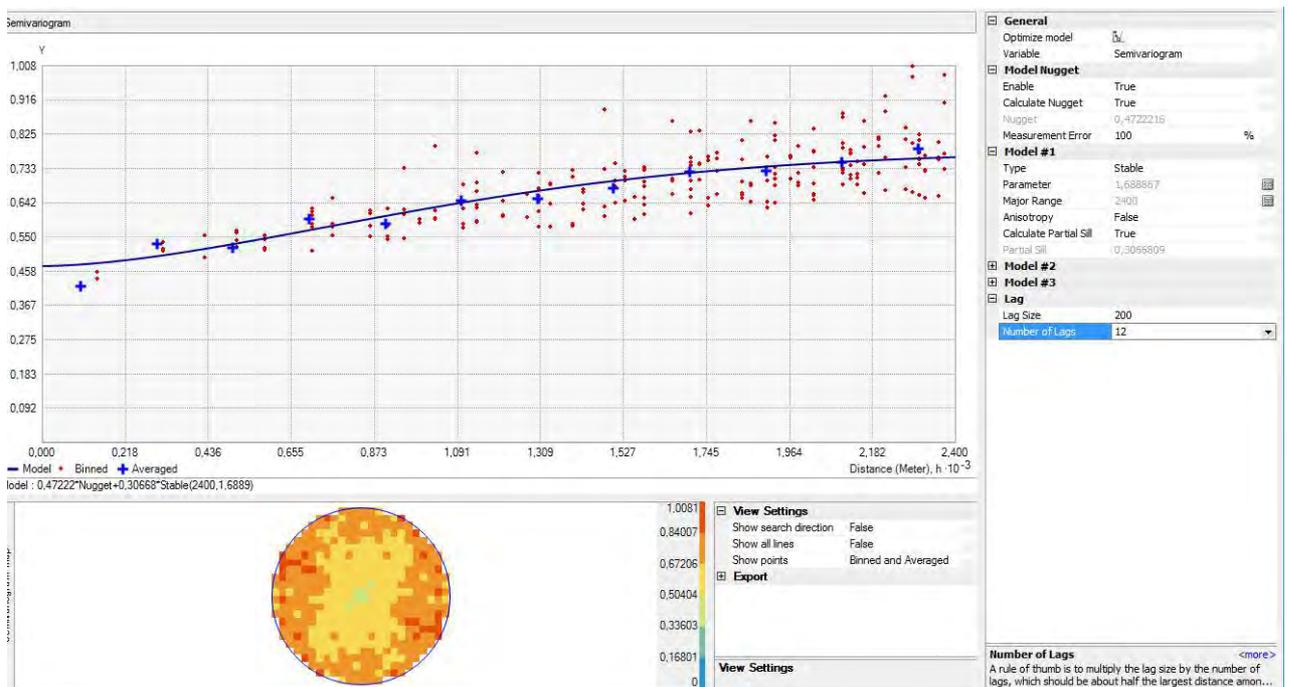


Fig. 26 - Variogramma step 2

<b>Neighborhood type</b>	Standard
<b>Maximum neighbors</b>	5
<b>Minimum neighbors</b>	2
<b>Sector type</b>	4 Sectors, 45°
<b>Angle</b>	0
<b>Major semiaxis</b>	2400
<b>Minor semiaxis</b>	2400
<b>Anisotropy factor</b>	1

**Tabella 9** - Parametri di ricerca dei punti vicini (*Search Neighborhood*)

Mediante i successivi *step* di analisi, il *dataset* viene quindi ripulito dagli *outlier* individuati: il dato modellato risulta sempre più aderente al dato misurato, garantendo la produzione di una mappa finale di migliore qualità.

Coerentemente con gli obiettivi dell'analisi, avendo elaborato un *dataset* già epurato in partenza da dati con bassa coerenza, è stato valutato idoneo terminare l'analisi allo *step* 2. Infatti, già nella seconda iterazione il numero di punti considerati come *outlier* è significativamente ridotto rispetto alla prima iterazione. Di conseguenza successive iterazioni non avrebbero comportato ulteriori miglioramenti alla qualità del *dataset* (*Figure* 27 e 28).

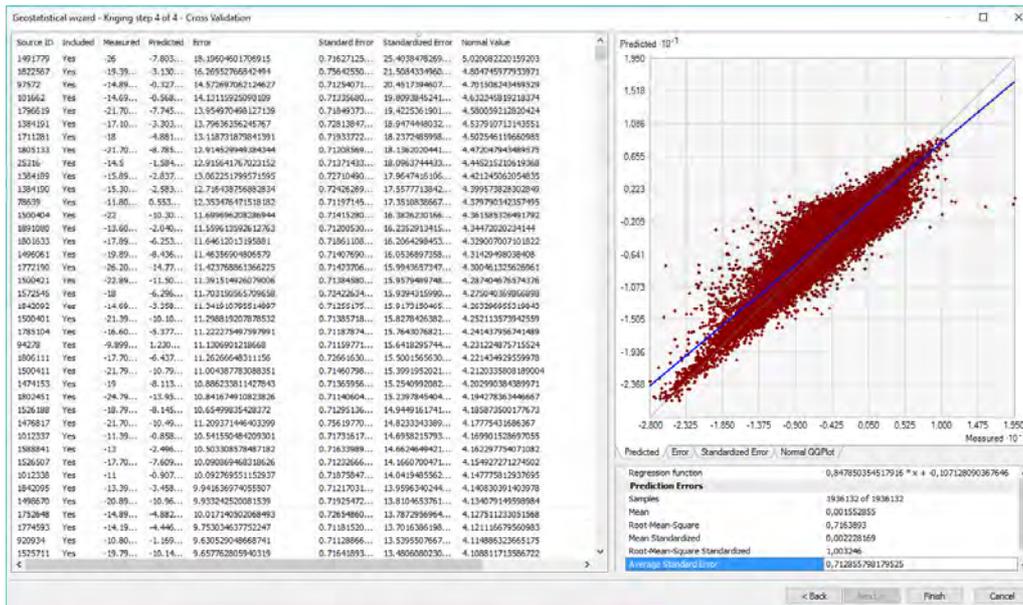


Fig. 27 - Cross-Validation step 1

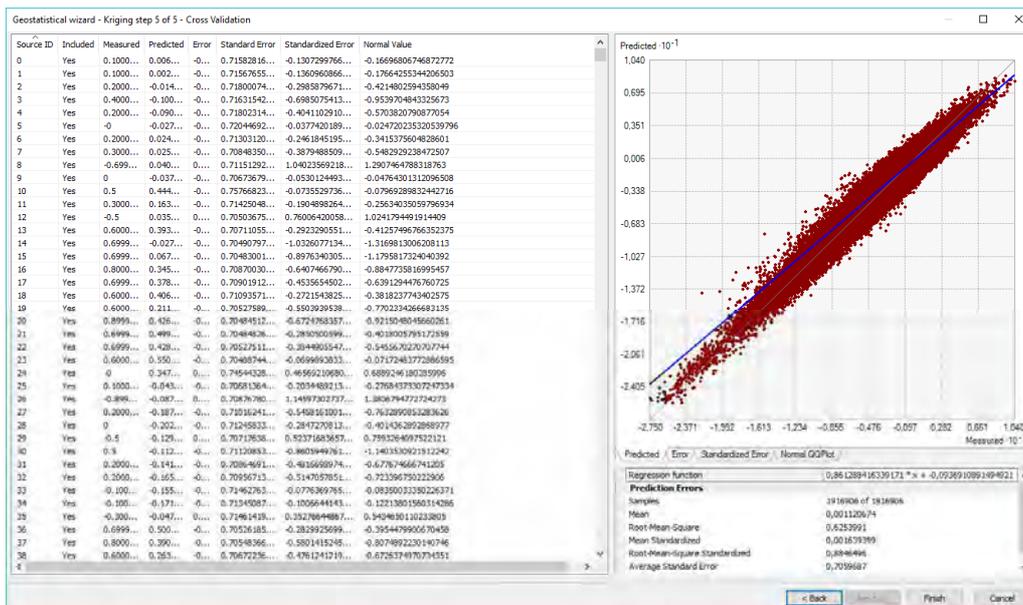


Fig. 28 - Cross-Validation step 2

L'analisi ha quindi identificato 21.638 *outlier* isolati, pari all'1,1% del *dataset* già depurato dai punti con indice di qualità inferiore a 0.70. In *Tabella 10*, sono riportati per ogni *step* i seguenti parametri:

- RANGE: soglia di selezione dei punti da etichettare come *outlier*, sempre pari a  $5\sigma$  per tutti gli *step*
- ERROR: residuo corrispondente in ogni *step* alla soglia  $\pm 5\sigma$
- PS/DS: i punti analizzati nell'iterazione corrente
- OUT: i punti oltre la soglia  $\pm 5\sigma$  etichettati *outlier*
- %: percentuale di *outlier* rispetto ai punti analizzati

	RANGE	ERROR	PS/DS	OUT	%
STEP1	$\pm 5\sigma$	$\pm 2,5$	1.936.132	19.226	1,00%
STEP2	$\pm 5\sigma$	$\pm 2,5$	1.916.906	2.412	0,10%
			<b>1.914.494</b>	<b>21.638</b>	<b>1,10%</b>

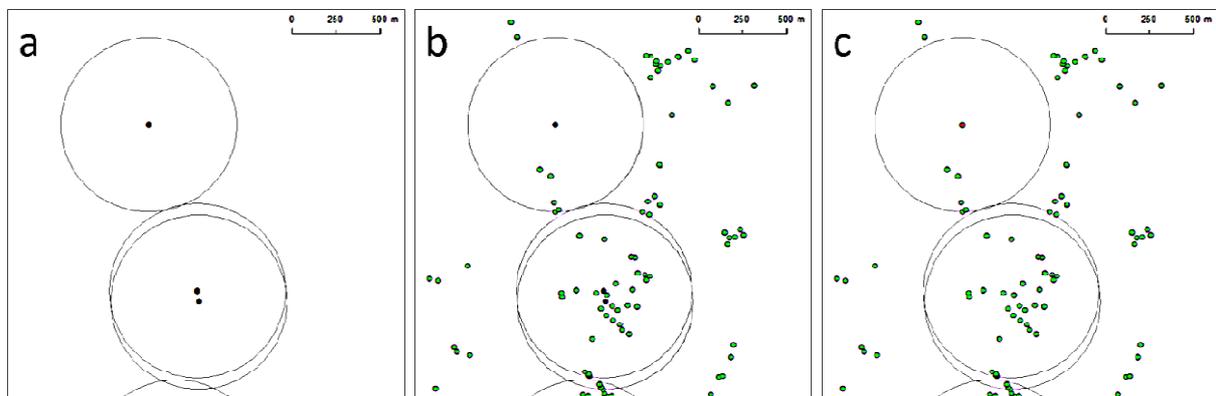
**Tabella 10** - Parametri statistici associati ad ogni fase dell'analisi di cross-validation

Terminata la ricerca automatica degli *outlier*, tali punti sono stati sottoposti ad ulteriori verifiche al fine di risolvere alcuni problemi a livello locale tra cui la perdita di informazione in zone a bassa densità di dati o la presenza di raggruppamenti di *outlier* che evidenziano particolari fenomeni circoscritti.

Intorno a ciascun *outlier* è stato generato un buffer di raggio 500 m, all'interno del quale sono stati contati i punti "passed" (output del secondo *step* di *kriging*) al fine di evidenziare eventuali *outlier* isolati. In particolare, vengono definiti *outlier* "isolati" quei punti che, nell'intorno di 500 m, presentano meno di 5 punti "passed" (*Figura 29*).

La procedura eseguita ha evidenziato, all'interno dei 21.638 *outlier*, 338 *outlier* "isolati" (265 PS e 73 DS). Tali punti sono stati controllati visivamente e 24 punti sono stati reinseriti nel *dataset* al fine di ridurre la perdita di informazioni in zone con bassa densità di misure.

Nella *Figura 30* si evidenzia la distribuzione spaziale degli *outlier* "isolati" nell'area oggetto d'indagine. Nella *Figura 31* si evidenzia un esempio di *outlier* isolato.



**Fig. 29** - a) buffer di 500 metri intorno agli outlier individuati mediante ricerca automatica; b) conteggio dei PS/DS "passed" all'interno di ciascun buffer; c) identificazione degli outlier "isolati" ovvero quei punti che presentano meno di 5 PS/DS "passed" nell'intorno considerato

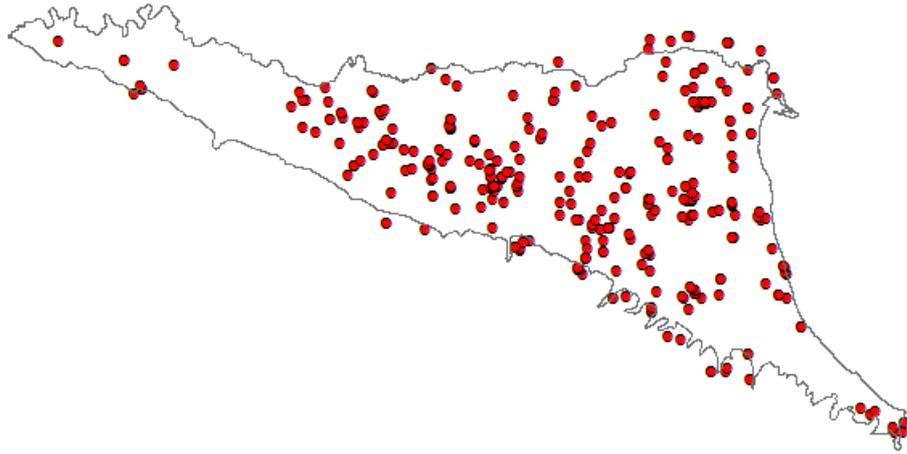
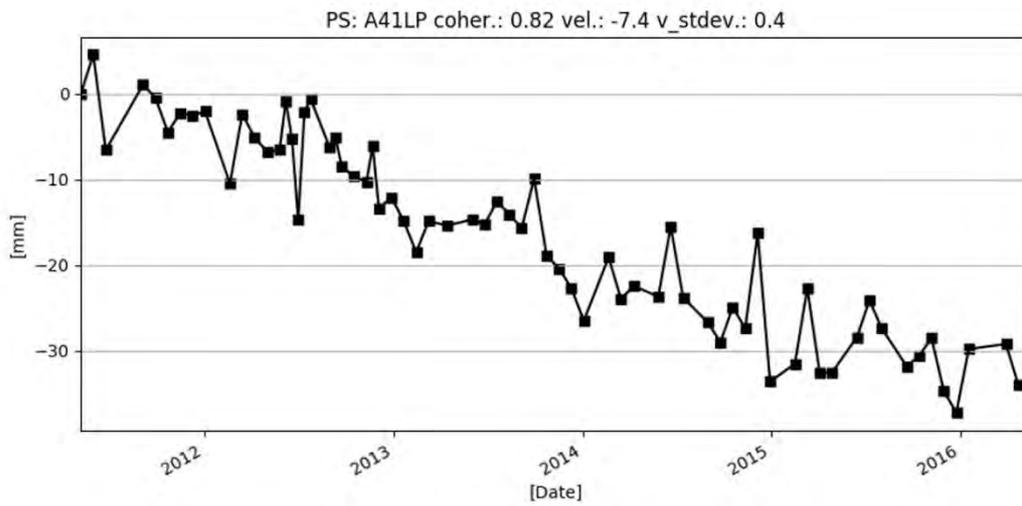


Fig. 30- Distribuzione spaziale degli outliers “isolati”

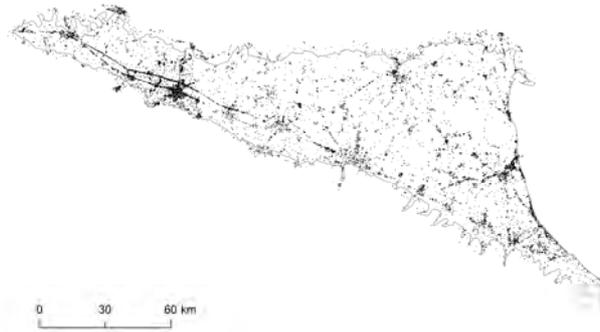


Zona: Bologna  
 Tipo: PS  
 Codice: A41LP  
 Velocità: -7.4 mm/anno

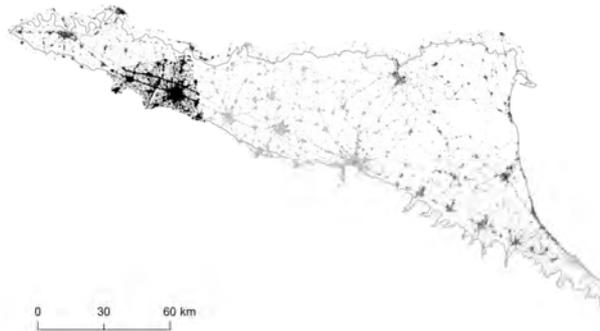
Fig. 31- Esempio di outlier isolato

L’identificazione di gruppi di outlier (cluster), sintomo di fenomeni locali non trascurabili, è stata condotta mediante un’analisi automatica che ha previsto l’impiego di mappe di densità. Gli outlier (21.638) decurtati degli outlier isolati (338) - rappresentati in Figura 32 - e i

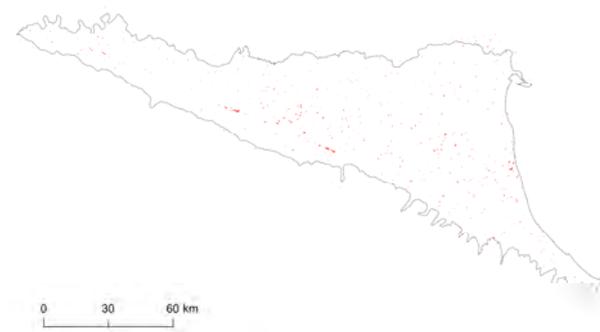
“passed” (1.914.494) - rappresentati in *Figura 33* - sono stati utilizzati per generare le rispettive mappe di densità, con raggio di ricerca e dimensione pixel pari a 200 m ed allineamento delle mappe *raster* in *output*; le mappe delle densità presentano quindi stessa dimensione del raster, stessa dimensione della cella e pixel perfettamente allineati, caratteristiche fondamentali per procedere alla successiva operazione di *overlay*. Il rapporto tra la densità *outlier* / “passed” maggiore di 1 è stato scelto come soglia per selezionare le zone di interesse (*Figura 34*) mirate all’identificazione dei *cluster*.



**Fig. 32** - Densità degli outlier decurtati degli outlier “isolati” (21.300)

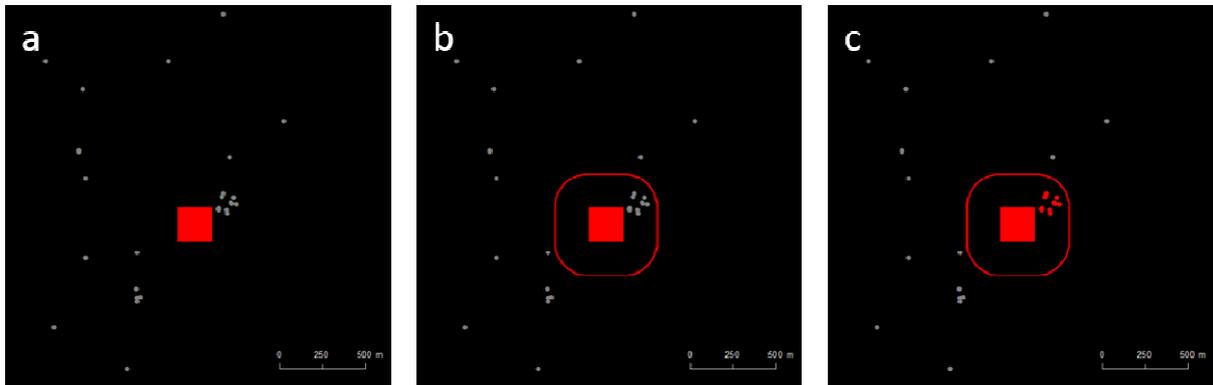


**Fig. 33** - Densità dei “passed” (1.914.494)



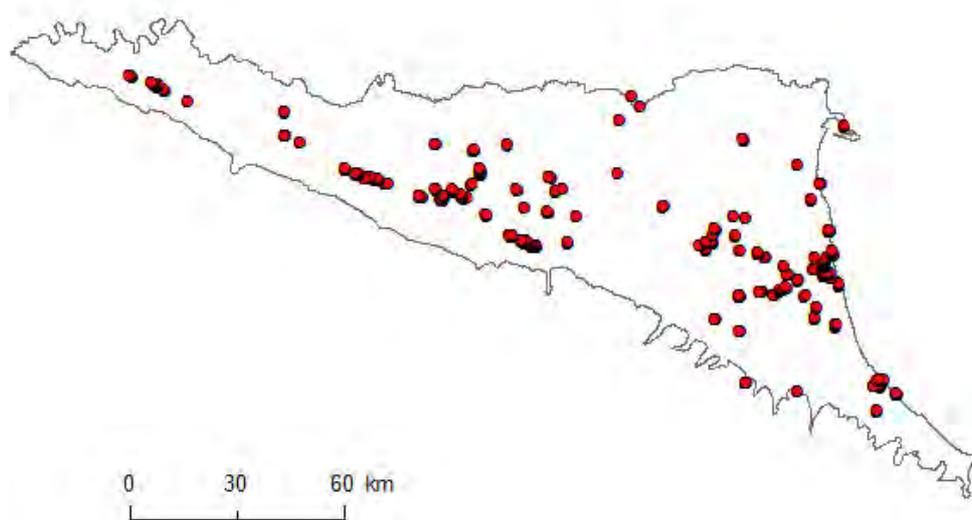
**Fig. 34** - Rapporto densità outliers/”passed” >1 (zone d’interesse)

Attorno a tali zone di interesse è stato creato un buffer di 200 m all'interno del quale sono stati successivamente conteggiati gli *outlier*, al fine di identificare i cluster ovvero quelle aree contenenti un numero di *outlier* superiore a 5. Nella *Figura 35* si riporta un esempio di tale procedura.



**Fig. 35** - a) zona di interesse; b) buffer 200 m intorno alla zona di interesse; c) conteggio degli outlier all'interno del buffer di 200 m per l'identificazione dei cluster

La procedura eseguita ha permesso di identificare 116 cluster (*Figura 36*) contenenti un totale di 1.784 outlier (1.269 PS e 515 DS). Tali cluster sono stati sottoposti ad ulteriori verifiche e 600 outlier, afferenti a 25 cluster, sono stati reinseriti nel dataset.



**Fig. 36** - Distribuzione spaziale degli outlier raggruppati in cluster

Nelle *Figure 37* e *38* si riportano due esempi di cluster di punti che evidenziano movimenti relativi ad opere di recente costruzione.



*Fig. 37 - Esempio di un cluster che evidenzia il movimento anomalo di una infrastruttura*



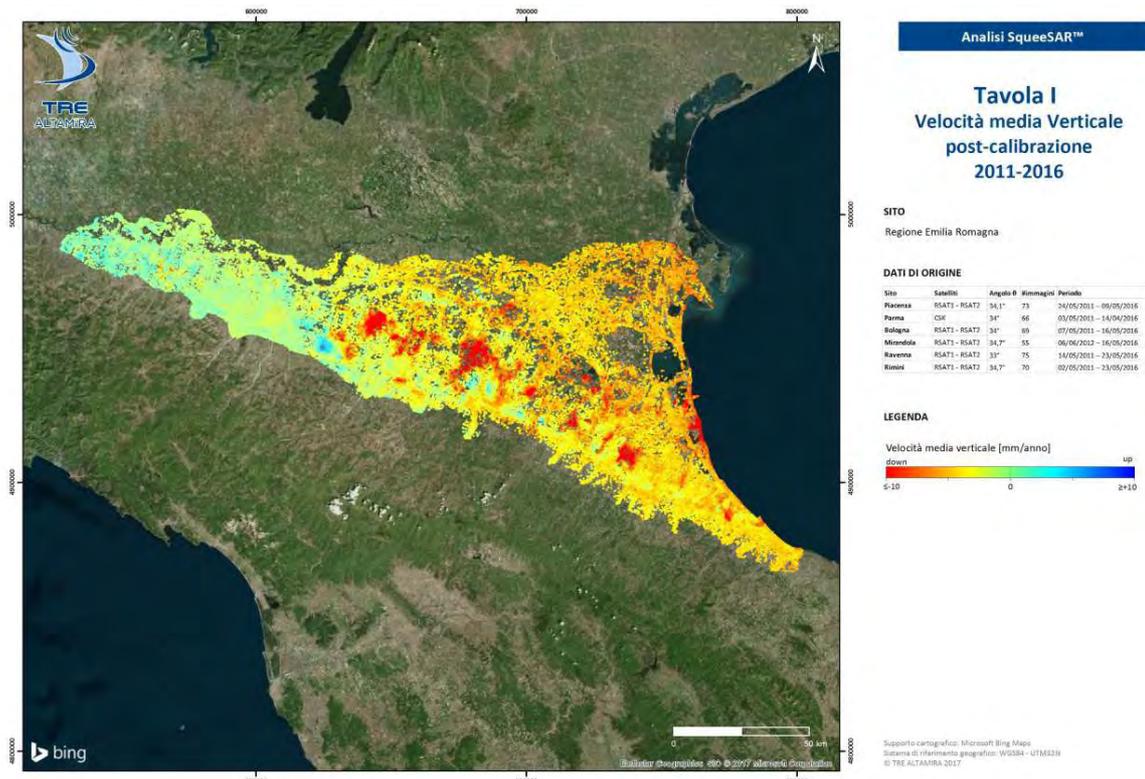
*Fig. 38 - Esempio di un cluster che evidenzia il movimento anomalo di una nuova urbanizzazione*

Il *dataset* così ottenuto, consistente in 1.915.122, è stato infine epurato di ulteriori 2.341 punti eliminati in seguito ad un attento controllo a posteriori che ha evidenziato come tali punti rappresentassero fenomeni a carattere locale, legati ad assestamenti strutturali. Il *dataset* finale, con il quale è stato successivamente elaborato il grigliato, consiste quindi di **1.912.781** punti: sono stati complessivamente eliminati 61.369 punti, circa il 3.1% dell'intero *dataset* iniziale.

#### 4.5 Realizzazione della mappa dei movimenti verticali del suolo

Come noto, esistono due modalità principali per descrivere su una mappa il fenomeno dei movimenti verticali del suolo su una vasta area a partire da un *dataset* di bersagli radar: una rappresentazione per punti, nella quale si associa ad ogni bersaglio un colore in funzione della velocità di movimento, ed una rappresentazione continua espressa da un grigliato ottenuto per interpolazione dal *dataset* di punti.

Un esempio della prima realizzazione è quanto prodotto da TRE ALTAMIRA, al termine delle operazioni di calibrazione e riportato in *Figura 39*: ogni bersaglio è rappresentato con un colore secondo una specifica *palette* in funzione della velocità di movimento ad esso associata.



**Fig. 39** - Rappresentazione in colore delle velocità di movimento sui singoli bersagli radar, con saturazione a -10/+10 mm/anno

Nell'ambito del presente lavoro si è preferito adottare la seconda strategia, sia per favorire una migliore leggibilità ed espressività del dato sia per coerenza con la cartografia precedente. Sul *dataset* finale di **1.912.781** punti, depurati dagli *outlier* come sopra descritto, è stata eseguita un'interpolazione con la tecnica del *Kriging* producendo un grigliato con passo pari a 100x100 m. Tale grigliato, ritagliato secondo il confine regionale e la linea di quota 100 m s.l.m., è poi stato utilizzato per la elaborazione della cartografia finale a curve isocinetiche.

## **5. Analisi dei movimenti verticali del suolo**

### **5.1 Introduzione**

Il territorio cartografato, tramite una rappresentazione a curve isocinetiche, comprende tutta l'area di pianura della regione Emilia-Romagna compresa tra il confine regionale a nord, la linea di costa ad est e la isolina 100 m s.l.m., per un totale di circa 11.300 km<sup>2</sup>. L'analisi dei movimenti che segue fa riferimento sia alla cartografia a curve isocinetiche sia ai singoli punti PS/DS. In particolare, questi ultimi, sono stati utilizzati al fine di evidenziare quei valori massimi di velocità che nella cartografia non sempre riescono ad essere rappresentati tramite le isolinee. Rispetto alla precedente cartografia si è potuto contare su 1.912.781 punti di misura rispetto ai precedenti 315.371; si sottolinea, tuttavia che 1.285.490 punti sono relativi al solo sito di Parma, elaborato utilizzando le immagini del satellite COSMO-SkyMed ad alta risoluzione, poiché tale sito non risultava coperto da acquisizioni storiche RADARSAT-2. In ogni caso, anche senza contare il sito di Parma, il numero di punti complessivo risulta oltre il doppio rispetto ai punti del precedente rilievo.

Al fine di agevolare il confronto con la cartografia relativa al precedente rilievo, è stata prodotta una cartografia analoga (in allegato):

1. Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2011-2016. Scala 1:250.000;
2. Carta delle variazioni delle velocità di movimento verticale del suolo dal periodo 2006-201 al periodo 2011-2016. Scala 1:250.000.
3. Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2011-2016. Provincia di Bologna. Scala 1:100.000;
4. Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2011-2016. Zona costiera. Scala 1:100.000.

Le stesse carte sono riprodotte in formato A4 rispettivamente in *Figura 40*, *Figura 41*, *Figura 61* e *Figura 69*

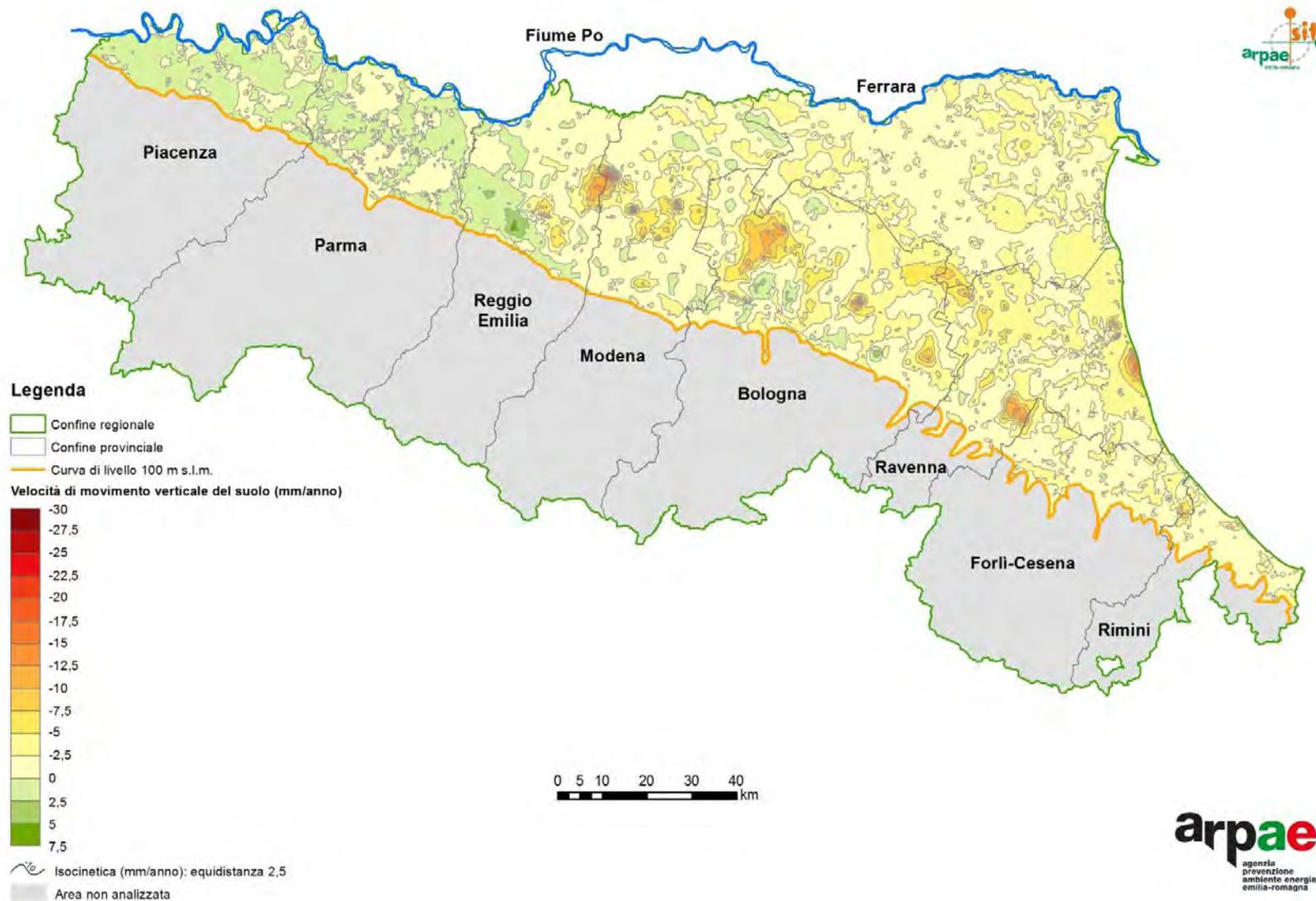


Fig. 40 - Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2011-2016

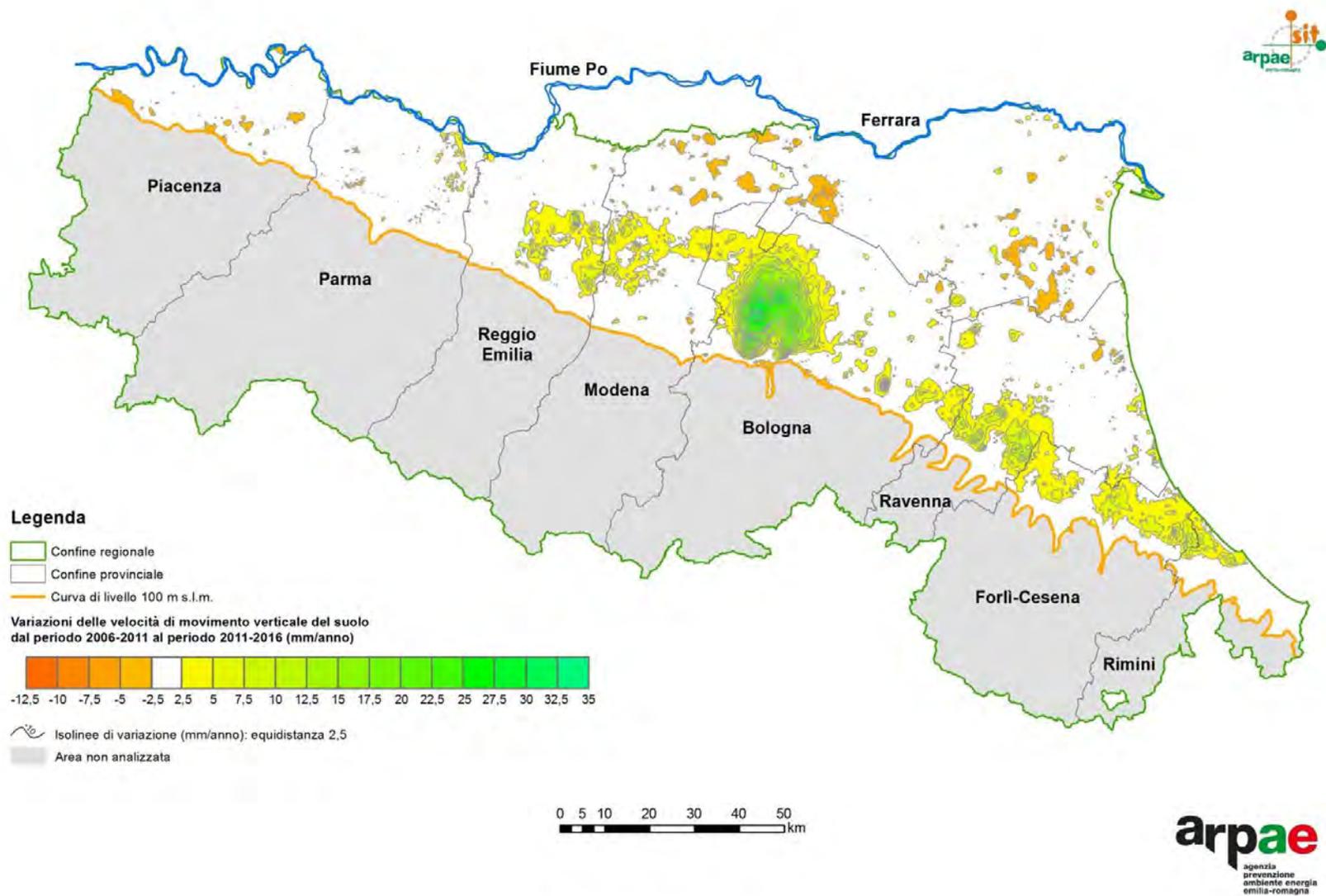


Fig. 41 - Carta delle variazioni delle velocità di movimento verticale del suolo dal periodo 2006-2011 al periodo 2011-2016

Rispetto al rilievo precedente (2006-2011), il 79% del territorio analizzato non presenta variazioni di tendenza significative, mentre una tendenza alla riduzione degli abbassamenti si evidenzia per il 18 % della superficie.

Nella *Tabella 11*, per ciascuna provincia, sono riportate le superfici (km<sup>2</sup> e %) relative alle variazioni di velocità di movimento tra il periodo 2006-2011 ed il periodo 2011-2016 raggruppate in 3 classi principali: la prima è relativa alle superfici interessate da variazioni con tendenza negativa (incremento dell'abbassamento), la seconda è relativa alle superfici interessate da variazioni comprese tra 0 e ± 2.5 mm/anno (indice di una sostanziale continuità tra i due periodi) e la terza è relativa alle superfici interessate da variazioni con tendenza positiva (riduzione dell'abbassamento).

Classi di variazione di velocità (mm/anno)	SUPERFICI (km <sup>2</sup> )																	
	PC	%	PR	%	RE	%	MO	%	BO	%	FE	%	RA	%	FC	%	RN	%
< -2,5	40	5	8	1	4	1	62	5	19	1	165	6	16	1				
da -2,5 a 2,5	753	95	894	96	829	81	1044	80	1118	60	2404	91	1237	81	288	49	63	20
> 2,5	2		24	3	189	18	195	15	714	39	62	3	280	18	297	51	257	80
<b>TOTALE</b>	795		926		1022		1301		1851		2631		1533		585		320	

*Tabella 11 - Superfici provinciali suddivise per classi di variazione di velocità di movimento e relative percentuali (per convenzione il segno [-] indica una variazione con tendenza negativa ovvero un incremento dell'abbassamento)*

Nelle *Tablelle 12 e 13* sono riportate, per ogni provincia, le superfici, e relative percentuali, suddivise per classi di velocità di movimento del suolo relative, rispettivamente, al periodo 2006-2011 e 2011-2016.

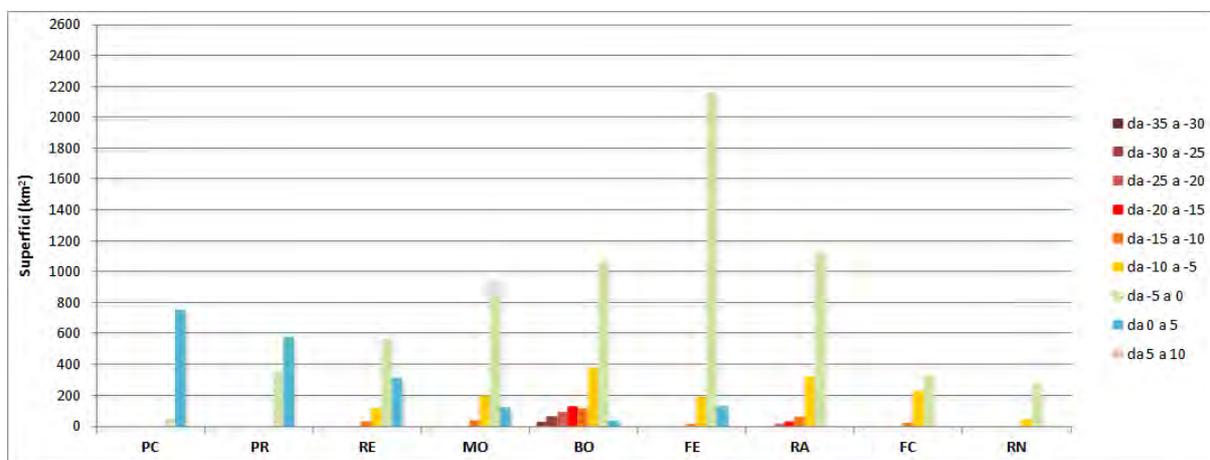
Classi di movimento (mm/anno)	SUPERFICI (km <sup>2</sup> )																	
	PC	%	PR	%	RE	%	MO	%	BO	%	FE	%	RA	%	FC	%	RN	%
da -35 a -30									22	1								
da -30 a -25									55	3								
da -25 a -20							1		84	5			11	1				
da -20 a -15					5		5		121	7			25	2	4	1	1	
da -15 a -10					27	3	36	3	111	6	11		53	3	20	4	7	2
da -10 a -5					116	11	191	15	366	20	188	8	317	21	224	38	45	14
da -5 a 0	46	6	354	38	567	55	949	73	1062	57	2150	87	1123	73	335	57	272	84
da 0 a 5	747	94	572	62	307	30	119	9	32	2	129	5	2					
da 5 a 10																		

*Tabella 12 - Periodo 2006-2011: Superfici provinciali suddivise per classi di movimento e relative percentuali*

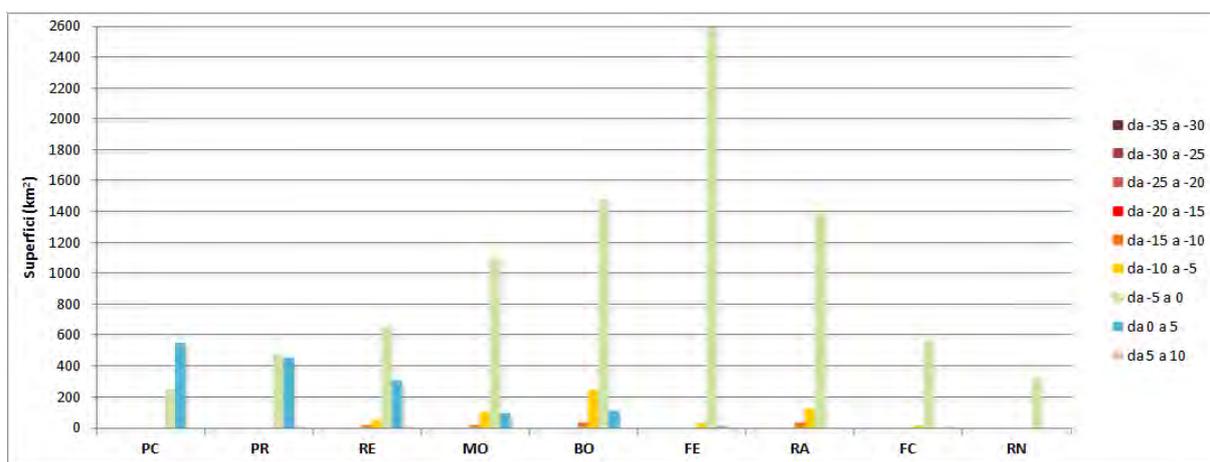
Classi di movimento (mm/anno)	SUPERFICI (km <sup>2</sup> )																	
	PC	%	PR	%	RE	%	MO	%	BO	%	FE	%	RA	%	FC	%	RN	%
da -35 a -30																		
da -30 a -25																		
da -25 a -20							1											
da -20 a -15							4		1			2						
da -15 a -10					15	1	11	1	24	1		27	2	1				
da -10 a -5					46	4	99	8	238	13	31	1	120	8	16	3	4	1
da -5 a 0	252	32	476	51	657	64	1093	84	1479	80	2588	98	1379	90	564	96	316	99
da 0 a 5	543	68	451	49	302	30	93	7	111	6	11		5		6	1	1	
da 5 a 10					2													

**Tabella 13** - Periodo 2011-2016: Superfici provinciali suddivise per classi di movimento e relative percentuali

In *Figura 42* e *Figura 43*, per ogni provincia, sono visualizzate tramite istogrammi le superfici suddivise per classi di velocità di movimento del suolo relative, rispettivamente, al periodo 2006-2011 e 2011-2016.



**Fig. 42** - Periodo 2006-2011: Istogrammi delle superfici suddivise per classi di movimento (mm/anno)



**Fig. 43** - Periodo 2011-2016: Istogrammi delle superfici suddivise per classi di movimento (mm/anno)

Nei paragrafi successivi verranno analizzati i movimenti osservati per ogni territorio provinciale.

## 5.2 Piacenza e Parma

Nelle province di Piacenza e Parma si conferma la situazione di sostanziale stabilità, con una leggera tendenza diffusa al sollevamento, già evidenziata nel periodo precedente. I valori di velocità oscillano di circa  $\pm 2$  mm/anno intorno allo zero, con una netta prevalenza dei valori positivi.

## 5.3 Reggio nell'Emilia

Nella provincia di Reggio si nota, rispetto al periodo precedente, una riduzione generalizzata degli abbassamenti ed un aumento delle superfici interessate da sollevamenti, in particolare ad ovest del capoluogo, con massimi di circa 5 mm/anno. Permangono, tuttavia, due aree in abbassamento che continuano a presentare valori simili al passato: una è l'area industriale a nord del capoluogo con valori massimi di circa 10 mm/anno e, l'altra, è l'area industriale ad est di Correggio con valori massimi di circa 15 mm/anno (*Figura 44*) che vanno riducendosi in corrispondenza dell'abitato stesso di Correggio a circa 10 mm/anno. Il capoluogo in particolare è sostanzialmente stabile.



*Fig.44 - Area di Correggio con evidenziati i PS/DS analizzati (a sinistra) e serie temporale del punto A4QF0 (a destra)*

## 5.4 Modena

Nella provincia di Modena si osserva, in generale, una riduzione degli abbassamenti rispetto al periodo precedente: é ancora il territorio di media pianura ad essere più interessato dalla subsidenza, in particolare, in corrispondenza delle aree artigianali ad ovest di Carpi, con massimi di circa 20 mm/anno, e a sud di Soliera (*Figura 45*), con massimi di circa 25 mm/anno, entrambe in decremento rispetto ai valori massimi precedenti. L'area artigianale a nord di Bomporto presenta ancora valori di oltre 15 mm/anno. La città di Modena è sostanzialmente stabile.



*Fig. 45 - Area di Soliera con evidenziati i PS/DS analizzati (a sinistra) e serie temporale del punto A3WNY (a destra)*

## 5.5 Bologna

### 5.5.1 Introduzione

La provincia di Bologna ha presentato in passato un fenomeno subsidenziale il più elevato rispetto all'intera pianura regionale, sia per le velocità raggiunte sia per la vastità dell'area coinvolta. Gli abbassamenti massimi si sono manifestati negli anni '70 e '80 del '900, successivamente si è assistito ad un decremento progressivo del fenomeno che, tuttavia, sino al rilievo del 2006-2011, continuava a presentare ancora i valori più elevati a livello regionale. Il presente rilievo ha invece messo in luce un deciso cambiamento di tendenza, presentando ampie zone di sostanziale stabilità ed anche zone di leggero sollevamento.

Al fine di comprendere le ragioni di tale profondo cambiamento, pur esulando dagli scopi specifici del presente lavoro, è stato effettuato un approfondimento d'indagine in cui l'evoluzione dei fenomeni di subsidenza è stata correlata con il regime degli emungimenti dalle falde. Ciò, si è reso possibile anche in relazione alla circostanza che, per tale territorio, i dati e le informazioni disponibili riguardo agli emungimenti di acque di falda e ai fenomeni di abbassamento del suolo, sono particolarmente dettagliati e affidabili. Nella stessa ottica, inoltre, è stato realizzato anche un *focus* specifico sull'andamento della coppia di assestimetri e adiacente piezometro ubicati nei pressi di Castelmaggiore.

Riguardo ai fenomeni di abbassamento del suolo si sono presi in esame:

- i valori di abbassamento del suolo nel periodo 1972/73-1983 deducibili dalle livellazioni effettuate da IGM e Comune di Bologna sulle linee IGM 5, 6, 15 e 17 (circa 65 capisaldi complessivamente);
- i valori di abbassamento del suolo 1983-1992 deducibili dalle livellazioni effettuate dal Comune di Bologna sulla propria rete (circa 950 capisaldi complessivamente);
- la cartografia a curve isocinetiche con riferimento ai periodi: 1983-1992, 1992-2000, 2002-2006, 2006-2011 e 2011-2016;
- i valori di abbassamento valutati sui singoli scatterer point nelle diverse acquisizioni satellitari per gli anni: 2006-2011 (circa 70 acquisizioni) e 2011-2016 (circa 70 acquisizioni).

Riguardo al regime degli approvvigionamenti di acque di falda si sono presi in esame:

- i dati e le informazioni contenute nel Piano acque del 1978, con un quadro degli emungimenti sostanzialmente riferibile al 1975<sup>7</sup>;
- i dati e le informazioni contenute nel Piano di tutela delle acque del 2005 con un quadro degli emungimenti sostanzialmente riferibile al 2000<sup>8</sup>;
- i dati e le informazioni contenute nell'Aggiornamento dei bilanci idrici propedeutico all'aggiornamento dei Piani di Gestione del 2015, con un quadro degli emungimenti sostanzialmente riferibile al 2010<sup>9</sup>;
- i dati di approvvigionamento idropotabile forniti da HERA/SEABO e ATERSIR con riferimento all'arco temporale 1992-2016 (per gli anni 2002-2016 sono disponibili i valori mensili);
- dati di approvvigionamento idrico da pozzi relativi ad alcuni siti produttivi particolarmente significativi.

---

<sup>7</sup> Progetto di piano per la salvaguardia e l'utilizzo ottimale delle risorse idriche in Emilia-Romagna, Idroser, 1978.

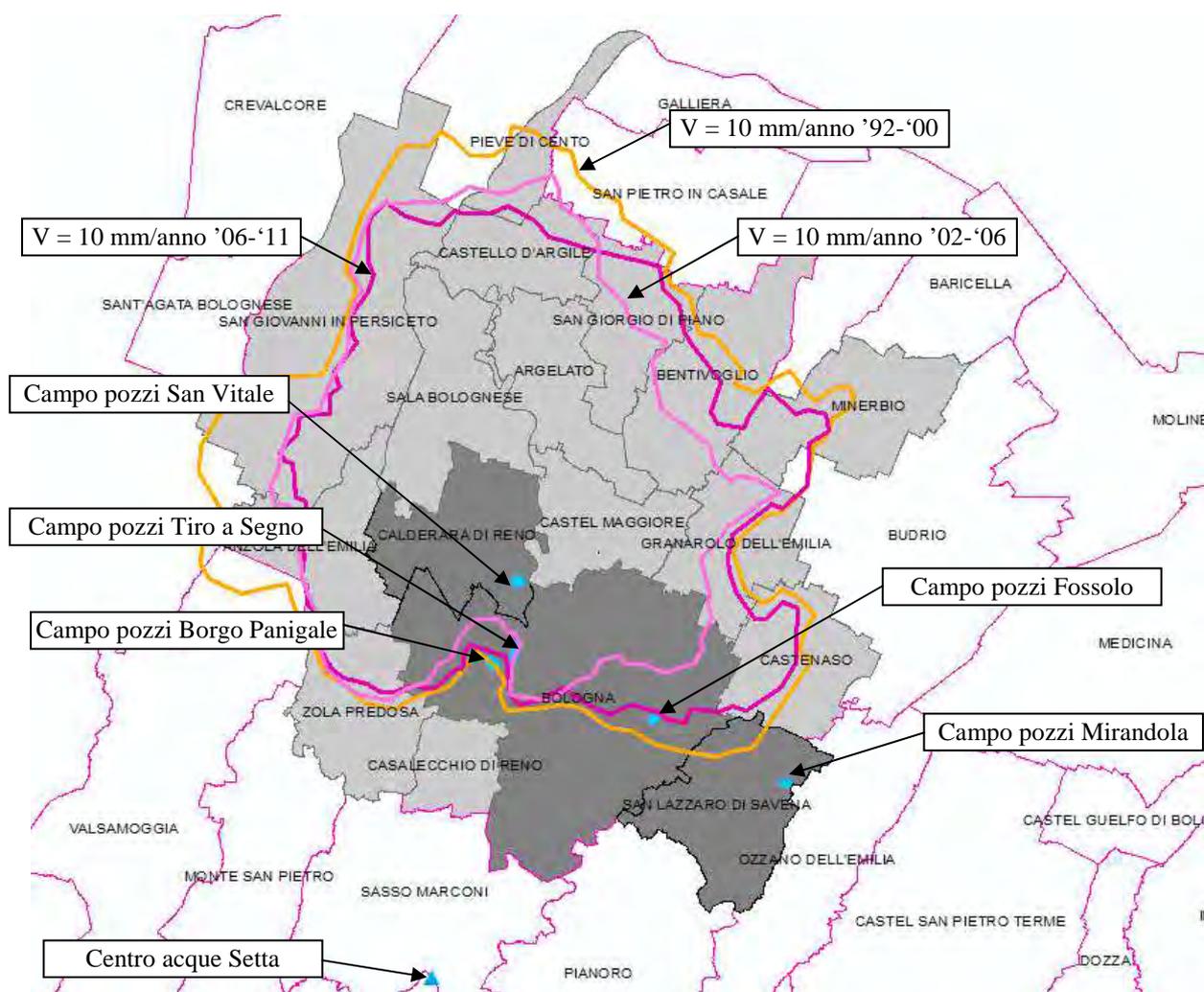
<sup>8</sup> Piano di tutela delle acque, Regione Emilia-Romagna, 2005.

<sup>9</sup> Aggiornamento del quadro conoscitivo di riferimento (carichi inquinanti, bilanci idrici e stato delle acque) ai fini del riesame dei Piani di Gestione Distrettuali 2015-2021: All. 2 Bilanci idrici.

## 5.5.2 Il dominio territoriale di riferimento

La definizione del dominio territoriale di riferimento per le elaborazioni non è, in effetti, banale: i fenomeni di subsidenza rilevati nel corso degli anni hanno visto una progressiva diminuzione delle velocità di abbassamento del suolo e, quindi, una forte riduzione dell'estensione dell'areale definibile in condizioni di criticità. Si è scelto di considerare come dominio territoriale di riferimento la superficie di circa 780 kmq (dei quali circa 720 di pianura) delimitati dalla perimetrazione dei 17 comuni (Fig. 46) che contengono, indicativamente, l'intero areale che risultava presentare una velocità di abbassamento superiore a 10 mm/anno nelle campagne 1992-2000 e 2002-2006.

Viene proposto anche un confronto a scala più locale, relativo ai territori comunali di San Lazzaro di Savena, Castenaso e Ozzano dell'Emilia, che già nella campagna 2002-2006 non presentavano più significativi fenomeni di abbassamento del suolo, ma che precedentemente evidenziavano criticità rilevanti.



**Fig. 46** - Dominio territoriale di riferimento per le elaborazioni (in grigio scuro i comuni con i maggiori prelievi di acque di falda, in arancione, fucsia, viola le isocinetiche -10 mm/anno per i periodi 1992-2000, 2002-2006, 2006-2011)

## 5.5.3 Il regime di emungimenti idrici nel breve e medio lungo periodo

In generale, l'evoluzione del regime di emungimenti di acqua di falda nel dominio di interesse è fortemente condizionata dall'andamento degli approvvigionamenti idropotabili, risultando comunque significativi, soprattutto in passato, gli usi industriali e, invece, modesti quelli irrigui, se raffrontati alla situazione media regionale.

Come già accennato, le informazioni relative agli approvvigionamenti di acque di falda sono consistenti, e permettono di ricostruire con una buona affidabilità il regime degli emungimenti dalla metà degli anni '70 del secolo scorso fino al 2016; tale affidabilità è anche connessa alla circostanza che gli approvvigionamenti idropotabili, generalmente ben documentati, sono sempre stati preponderanti rispetto agli altri usi (rappresentando il 70-80% degli emungimenti complessivi). Nel dominio territoriale di riferimento è peraltro evidenziabile un gruppo di tre comuni (Calderara di Reno, Bologna e San Lazzaro di Savena), ove sono localizzati i cinque campi pozzi che alimentano l' "acquedotto primario" bolognese.

L'acquedotto primario è il maggiore schema acquedottistico emiliano, serve, infatti, pressoché tutti i comuni di pianura e prima collina del circondario bolognese, con volumi immessi in rete dell'ordine degli 80 Mmc/anno e erogati alle utenze dell'ordine dei 60 Mmc/anno (oltre 600'000 sono i residenti serviti). Le fonti di approvvigionamento sono costituite da cinque campi pozzi (San Vitale, Tiro a Segno, Borgo Panigale, Fossolo e Mirandola) e dall'impianto di potabilizzazione di acque superficiali Centro acque Setta (in comune di Sasso Marconi); il sistema di adduzioni permette di modulare gli approvvigionamenti dalle diverse fonti. L'evoluzione infrastrutturale dell'acquedotto primario ha visto negli anni '70 e '80 del secolo scorso un progressivo ampliamento dei comuni serviti, congiuntamente con l'abbandono delle fonti locali minori<sup>10</sup>, fino a raggiungere la configurazione attuale già negli anni '90. La realizzazione del Centro acque Setta, entrato in servizio nel 1984, ha reso disponibili consistenti approvvigionamenti di acque superficiali. Successivi interventi sul sistema di adduzioni, effettuati nel primo decennio del 2000, hanno migliorato le potenzialità di vettoriamento di acque nella direttrice ovest-est, consentendo di sfruttare maggiormente la producibilità del Centro acque Setta e, congiuntamente, di ridurre gli emungimenti dai campi pozzi più a est; infine, nel 2010, è stato attivato, in via sperimentale, il derivatore Reno - Setta, che permette un utilizzo più razionale delle acque stoccate nel bacino di Suviana e un più sicuro approvvigionamento del Centro acque Setta, incrementandone significativamente la produzione di acqua potabilizzata.

Il Piano acque del 1978 forniva un quadro degli approvvigionamenti idropotabili antecedente l'entrata in esercizio del Centro acque Setta ed evidenziava quindi forti prelievi di acque di falda, complessivamente oltre 63 Mmc/anno, con emungimenti, oltre che nei comuni di Bologna, San Lazzaro di Savena e Calderara di Reno, anche in quelli di Castenaso, Casalecchio di Reno e Zola Predosa<sup>11</sup>. Molto importanti erano anche gli approvvigionamenti industriali, ai quali erano attribuiti oltre 20 Mmc/anno di emungimenti, connessi ad un numero importante di siti fortemente idroesigenti localizzati soprattutto nel comune di Bologna, (Panigal, birrificio Wuhler, fonderie Calzoni, distillerie Buton, Vetrosilex, diversi zuccherifici). Meno importanti, circa 8 Mmc/anno, erano valutati gli emungimenti irrigui.

L'entrata in esercizio del Centro acque Setta ha reso disponibili mediamente circa 35 Mmc/anno di approvvigionamenti da acque superficiali, permettendo di sgravare gli emungimenti di acque di falda che, all'inizio degli anni '90 del secolo scorso, risultavano dell'ordine dei 47 Mmc/anno (rispetto agli anni '70 i fabbisogni idropotabili complessivi si erano incrementati di circa 15 Mmc/anno) ed erano interamente riferibili ai cinque campi pozzi attualmente in esercizio<sup>12</sup>.

---

<sup>10</sup> Come i pozzi di Medicina, Casalecchio, Anzola, Castenaso, ecc, attivi negli anni '70 del secolo scorso.

<sup>11</sup> 60 Mmc/anno erano prelevati nei comuni di Bologna, Calderara di Reno e San Lazzaro, 3 Mmc/anno negli altri comuni interni al dominio di interesse; ulteriori 4 Mmc/anno erano prelevati in comuni attualmente serviti dall'acquedotto primario ma esterni al dominio territoriale di riferimento.

<sup>12</sup> Per il 1985 sono disponibili informazioni circa gli emungimenti dai campi pozzi civili (cfr. G. Darini, Land subsidence due to groundwater withdrawal: the case of Bologna, Tesi di Dottorato, Università di Cassino).

Nel Piano di tutela delle acque del 2005 era valutato, al 2000, un approvvigionamento idropotabile da falda di circa 42 Mmc/anno, una consistente riduzione degli emungimenti industriali (sia per efficientamento dei processi produttivi sia, soprattutto, per dismissione di molti dei siti idroesigenti) che risultavano di circa 13 Mmc/anno e un modesto calo degli usi irrigui, stimati in meno di 6 Mmc/anno. È da sottolineare che la disponibilità di acque superficiali del T. Setta, molto modesta nel periodo estivo e inizio autunnale, era integrata con prelievi dal bacino di Suviana vettoriati sul Setta mediante il pompaggio Bargi-Brasimone: nei mesi da giugno a ottobre l'approvvigionamento medio del Centro acque risultava di circa 2.5 Mmc/mese, mentre nei restanti mesi tardo autunnali, invernali e primaverili risultava dell'ordine dei 3.7 Mmc/mese<sup>13</sup>.

Nell'Aggiornamento dei bilanci idrici connesso ai PDG del 2015 si faceva riferimento, per il quadro conoscitivo degli approvvigionamenti, al 2010; in effetti, tale anno costituiva una sorta di *turning point* per il settore civile, risultando il 2010 l'anno di entrata in esercizio sperimentale del derivatore Reno - Setta, che ha permesso di incrementare significativamente la disponibilità di acque superficiali al Centro acque Setta<sup>14</sup>: la produzione è salita da circa 37 Mmc/anno medi nel periodo 1997-2009 a circa 45 Mmc/anno medi nel periodo 2010-2016; l'incremento di approvvigionamenti da acque superficiali ha riguardato essenzialmente il periodo estivo e inizio autunnale, risultando invece molto più modesto nei mesi tardo autunnali, invernali e primaverili. Gli emungimenti di acque di falda, pari a circa 38 Mmc/anno negli anni precedenti al 2010, si sono ridotti a circa 28 Mmc/anno in quelli successivi; è da sottolineare come tale riduzione abbia riguardato essenzialmente i campi pozzi ovest, risultando invece mediamente invariati gli emungimenti relativi ai campi Fossolo e Mirandola. Nel quadro conoscitivo si evidenziava, anche, una sensibile riduzione degli approvvigionamenti industriali e irrigui.

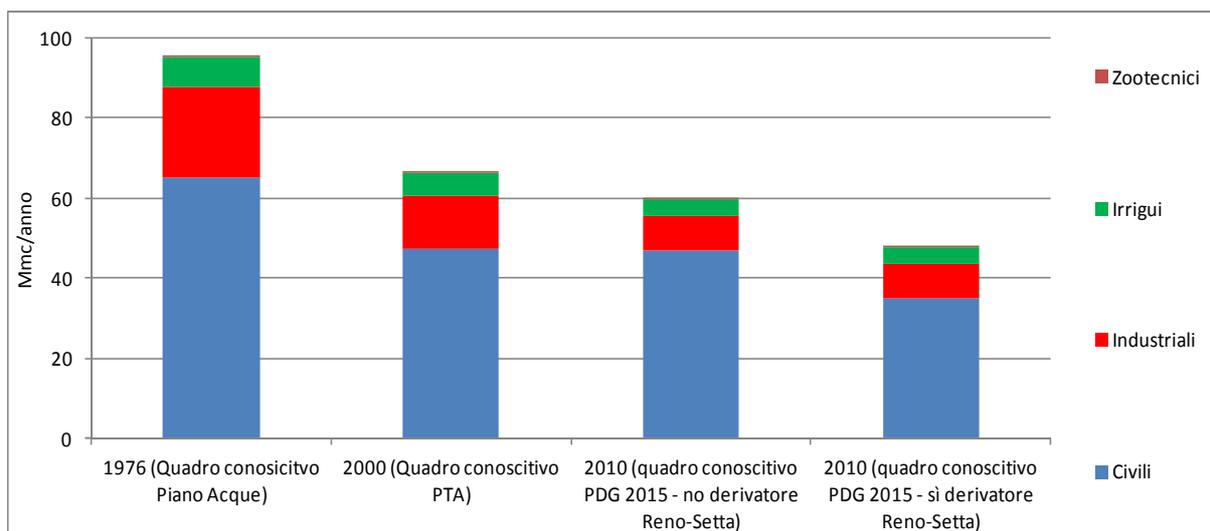
Nella *Figura 47* è proposta l'evoluzione temporale degli emungimenti di acque di falda nei diversi orizzonti temporali di riferimento per la pianificazione di settore. A commento del grafico e ad integrazione di quanto scritto nei capoversi precedenti si osserva che:

- gli usi zootecnici sono sempre trascurabili;
- l'incidenza degli emungimenti idropotabili rispetto al totale è elevata, ed è aumentata dal 1976 (68%), al 2000 (72%), al 2010 (78% prima dell'entrata in servizio del derivatore Reno - Setta, 72% successivamente);
- l'incidenza degli emungimenti nei comuni di Bologna, Calderara di Reno e San Lazzaro rispetto a quelli totali è sempre molto elevata, dell'ordine o superiore all'80%;
- gli usi industriali si sono fortemente ridotti nel tempo: dei numerosi siti produttivi idroesigenti presenti al 1975, è oggi attivo solo quello lattiero caseario della Granarolo;
- gli usi irrigui rappresentano una quota relativamente modesta e costante nel tempo degli emungimenti complessivi (circa l'8% del totale).

---

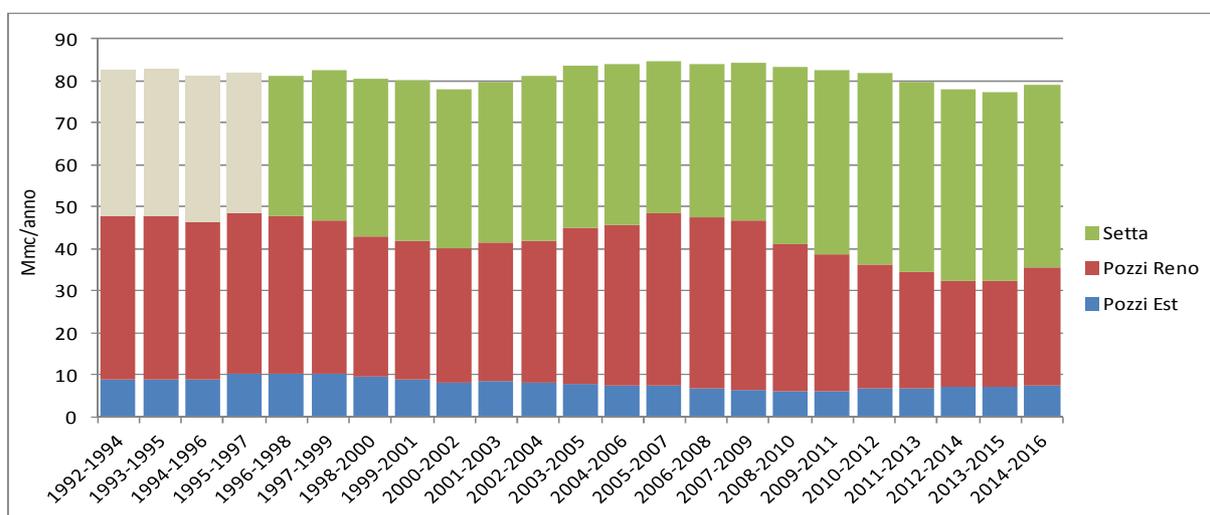
<sup>13</sup> L'entrata in servizio del Centro acque Setta ha indotto quindi un certo grado di modulazione negli emungimenti da falda (soprattutto nei campi pozzi ovest) a compensazione della stagionalità della produzione idropotabile da acque superficiali (mitigata solo parzialmente dai volumi forniti dal bacino di Suviana).

<sup>14</sup> Come già accennato, nel periodo antecedente il 2010 erano stati effettuati alcuni adeguamenti nelle adduzioni acquedottistiche per migliorare le potenzialità di vettoriamento nella parte est della rete bolognese di acque del Centro acque Setta, consentendo di incrementare la produzione nei mesi a maggiore disponibilità di risorsa, e permettendo quindi di ridurre gli emungimenti dai campi pozzi Fossolo e Mirandola (che sono passati dai circa 10 Mmc/anno medi complessivi negli anni antecedenti il 2000 ai circa 7 Mmc/anno medi complessivi negli anni successivi al 2003).



**Fig. 47** - Evoluzione degli emungimenti di acque di falda nei diversi orizzonti temporali di riferimento per la pianificazione di settore

Di notevole interesse è anche l'evoluzione dell'approvvigionamento idropotabile dalle diverse fonti, proposto nella *Fig. igura 48*; nel grafico sono forniti i valori medi triennali e non quelli annuali, per mediare le diverse annate e rendere maggiormente chiare le tendenze evolutive. Si possono stimare in circa 70 Mmc/anno gli approvvigionamenti idropotabili al 1975 relativi ai comuni attualmente serviti dall'acquedotto primario, interamente soddisfatti con emungimenti di acque di falda; i fabbisogni si sono incrementati fino a superare gli 80 Mmc/anno negli anni '90 del secolo scorso e quindi raggiungere gli 85 Mmc/anno a metà del primo decennio del 2000, per poi diminuire e scendere sotto gli 80 Mmc/anno negli ultimi anni<sup>15</sup>; si ricorda che gli approvvigionamenti sono operativamente gestiti cercando di massimizzare lo sfruttamento del Centro acque Setta (condizionato sia dalla disponibilità di risorsa sia dall'infrastrutturazione distributiva).



**Fig. 48** - Evoluzione degli approvvigionamenti acquedottistici relativi all'acquedotto primario - i dati grigi relativi al Setta per l'inizio della serie temporale sono stimati (Pozzi Reno: campi pozzi San Vitale, Tiro a Segno, Borgo Panigale; Pozzi est: campi pozzi Fossolo e Mirandola)

<sup>15</sup> I fabbisogni complessivi dell'acquedotto sono determinati dai consumi alle utenze e dagli usi tecnici di gestione e dalle perdite nelle reti; al riguardo alla popolazione residente complessiva è risultata in progressivo aumento, osservandosi per contro una significativa tendenza alla diminuzione dei consumi procapite successiva all'incirca all'anno 2000.

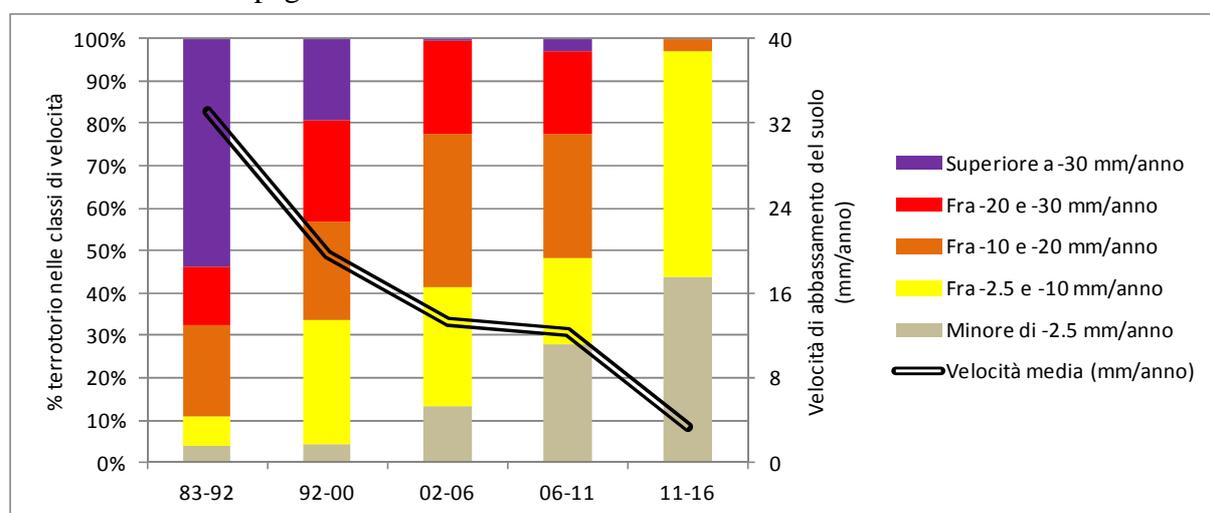
### 5.5.4 L'evoluzione dei fenomeni di subsidenza

L'evoluzione dei fenomeni di subsidenza è esaminata sia a macroscale, prendendo in esame i valori medi di velocità di abbassamento del suolo, deducibili dalle curve isocinetiche prodotte relativamente alle campagne di rilievo disponibili, sia a livello di maggiore dettaglio, focalizzando l'attenzione su specifici areali di maggiore interesse e su intervalli temporali maggiormente ridotti (consentiti dalle serie storiche degli abbassamenti relativi per gli scatterer point, disponibili solo per le campagne 2006-2011 e 2011-2016).

#### L'evoluzione dei fenomeni di subsidenza alla macroscale

Nella *Figura 49* sono proposte le informazioni maggiormente significative circa l'entità dei fenomeni di subsidenza rilevati nel dominio territoriale di riferimento:

- la distribuzione percentuale delle aree per classe di velocità di abbassamento del suolo nelle diverse campagne;
- la velocità media di abbassamento del suolo sull'intero dominio territoriale nelle diverse campagne.

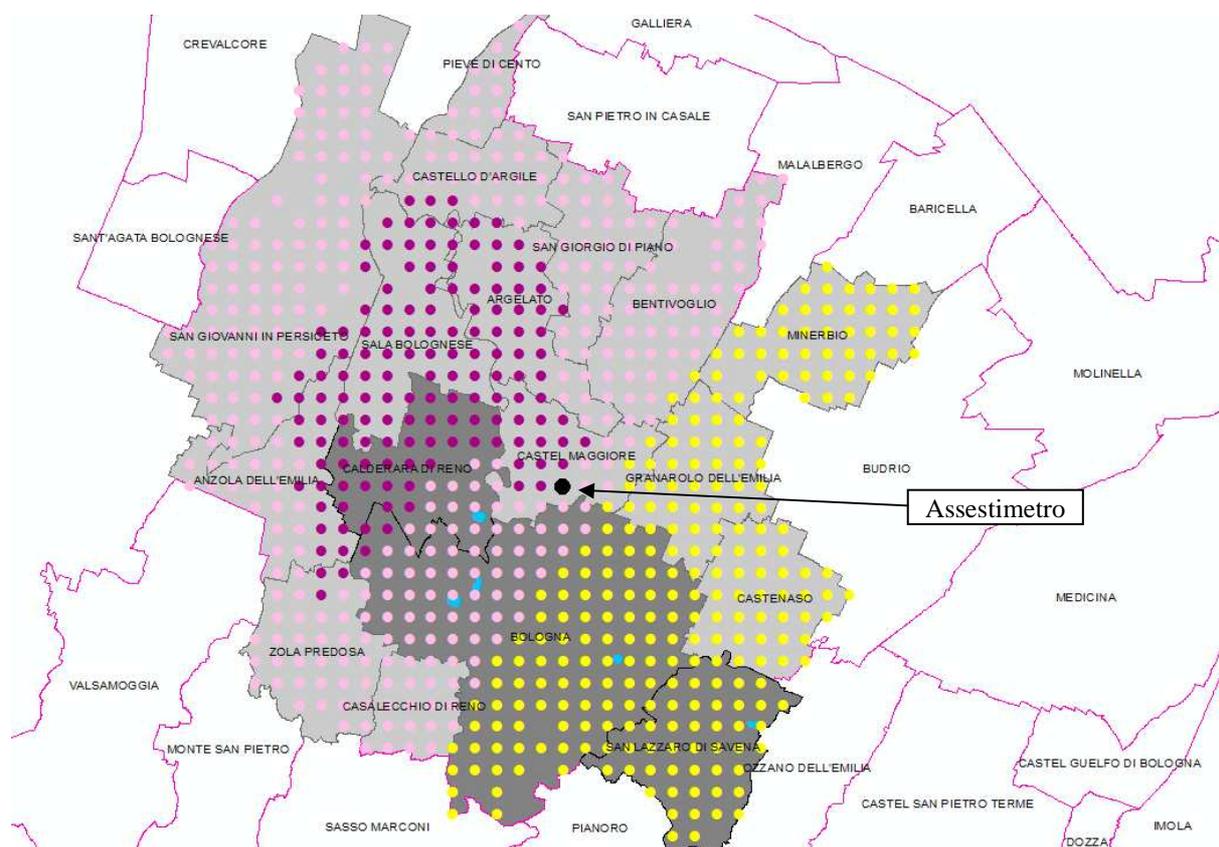


*Fig. 49 - Distribuzione percentuale delle superfici interne al dominio territoriale d'indagine in relazione alle velocità di subsidenza e velocità media di abbassamento del suolo valutate per le diverse campagne*

Risulta immediatamente evidente la forte riduzione della velocità media di abbassamento del suolo e, in particolare, la progressiva diminuzione e quindi scomparsa delle superfici territoriali caratterizzate dai fenomeni di subsidenza maggiormente critici: già al 2000 la percentuale di superficie con velocità di abbassamento maggiori di 20 mm/anno si era più che dimezzata, per poi scomparire del tutto nell'ultima campagna, che evidenzia limitatissime superfici con velocità superiore a 10 mm/anno.

#### L'evoluzione dei fenomeni di subsidenza alla scala di dettaglio negli anni 2006-2011

Preliminarmente sono stati individuati i nodi di una maglia di lato chilometrico, interni ai comuni di riferimento; nella *Figura 50*, che mostra la collocazione dei nodi sul dominio territoriale e l'individuazione dei tre distinti areali, è anche mostrata la localizzazione dell'assestimento di Castel Maggiore in funzione dal 2006.



**Fig. 50** - Grid a maglia chilometrica individuato sul dominio territoriale di riferimento: in giallo areale est, in viola il nucleo di subsidenza e in rosa l'areale ad esso periferico; con pallini ciano sono localizzati i pozzi acquedottistici

Sono quindi stati individuati nel grid tre distinti areali:

- un “areale est” caratterizzato, nelle campagne più recenti, da fenomeni di subsidenza meno critici, comprendente circa 250 nodi del grid;
- il “nucleo” di maggiore subsidenza, delimitato indicativamente dall'isocinetica - 20 mm/anno nel periodo 2006-2011, comprendente circa 150 nodi del grid;
- un areale periferico rispetto al “nucleo”, comprendente circa 350 nodi del grid.

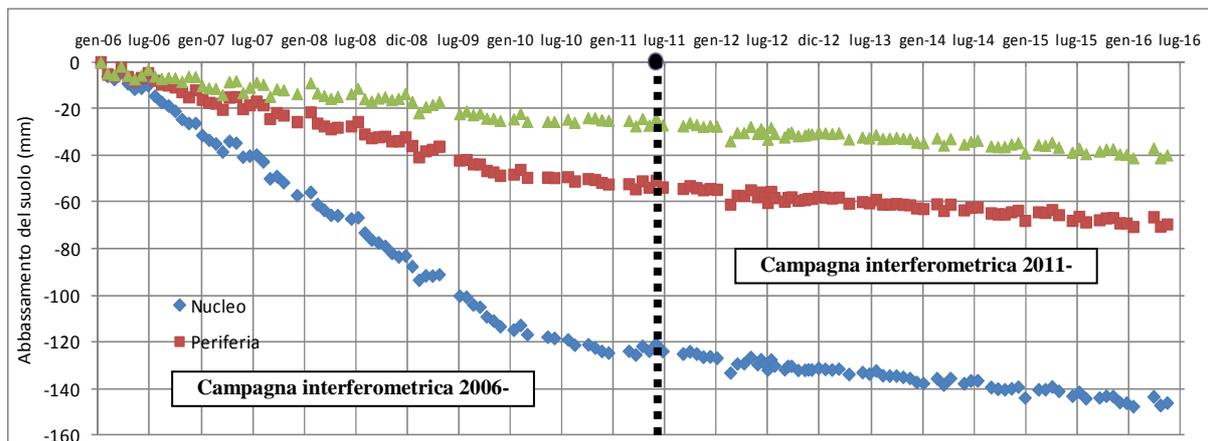
Ciascuno degli scatterer point individuati nelle campagne interferometriche 2006-2011 e 2011-2016 è stato associato al nodo del grid più vicino e, sulla base di semplici medie aritmetiche degli abbassamenti relativi di ciascun scatterer point associato ad ogni nodo per ciascuna delle acquisizioni satellitari connesse alle due campagne interferometriche, sono stati calcolati i valori medi degli abbassamenti relativi per ogni nodo. È da segnalare che non per tutti i nodi del grid è stato individuato almeno uno scatterer point; la maglia dei nodi con serie storica degli abbassamenti 2006-2016 presenta quindi un limitato numero di “buchi”, localizzati in areali rurali con ridotta possibilità di definire scatterer point nelle elaborazioni interferometriche.

È quindi possibile, per ogni nodo, calcolare il valore medio dell'abbassamento relativo del suolo in occasione di ciascuna acquisizione interferometrica delle campagne 2006-2011 e 2011-2016; è poi possibile “giuntare” le serie storiche, ponendo per ciascun nodo il valore finale di abbassamento della campagna 2006-2011 come valore iniziale di posizione per la campagna 2011-2016<sup>16</sup>.

Nella *Figura 51* sono proposti gli abbassamenti del suolo cumulati per gli anni 2006-2016 in termini di valore medio sui grid dei nodi ricadenti nei tre areali di analisi (nucleo, periferico,

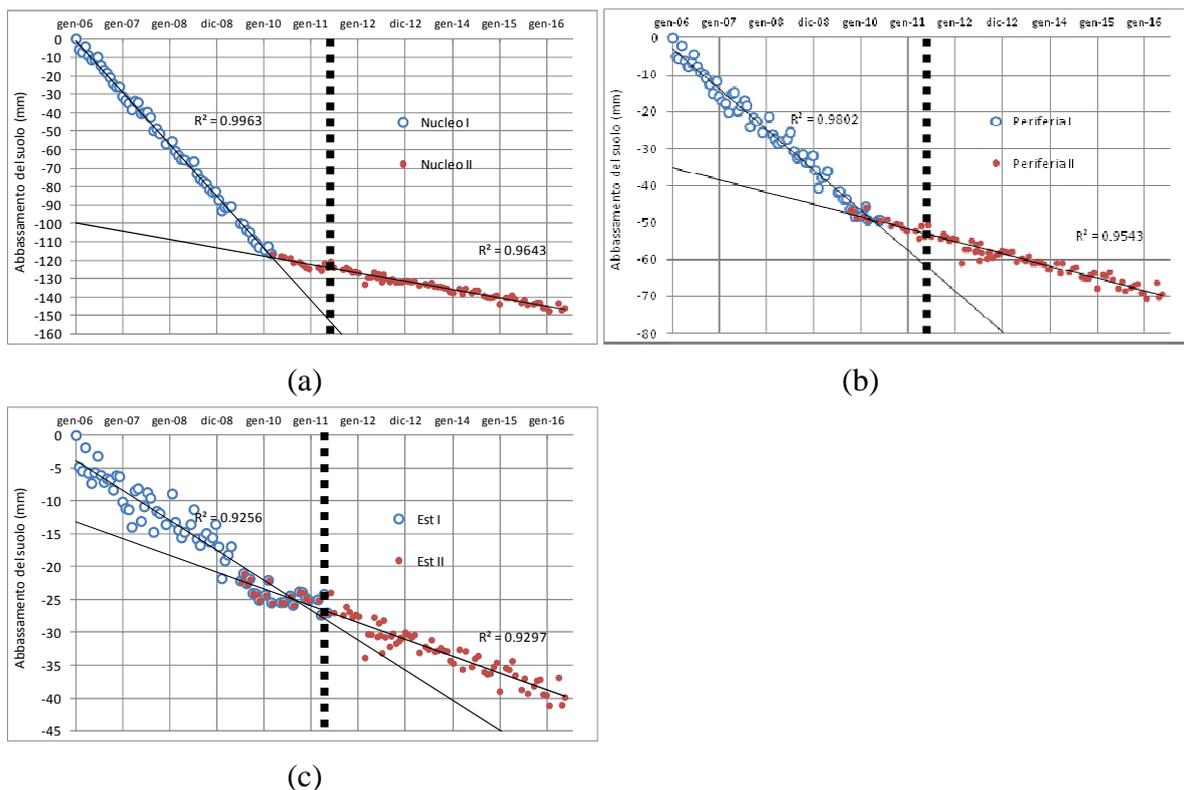
<sup>16</sup> È da evidenziare che tale operazione di giunzione è difficilmente praticabile alla scala di scatterer point, risultando problematica l'individuazione delle coppie di scatterer point corrispondenti nelle due serie storiche.

est); complessivamente sono stati utilizzati i dati relativi ad oltre 25'000 scatterer point per la campagna 2006-2011 e quasi 52'000 per la campagna 2011-2016.



**Fig. 51** - Evoluzione dell'abbassamento del suolo media per gli areali nucleo, periferia ed est deducibili dalle risultanze delle campagne 2006-2011 e 2011-2016

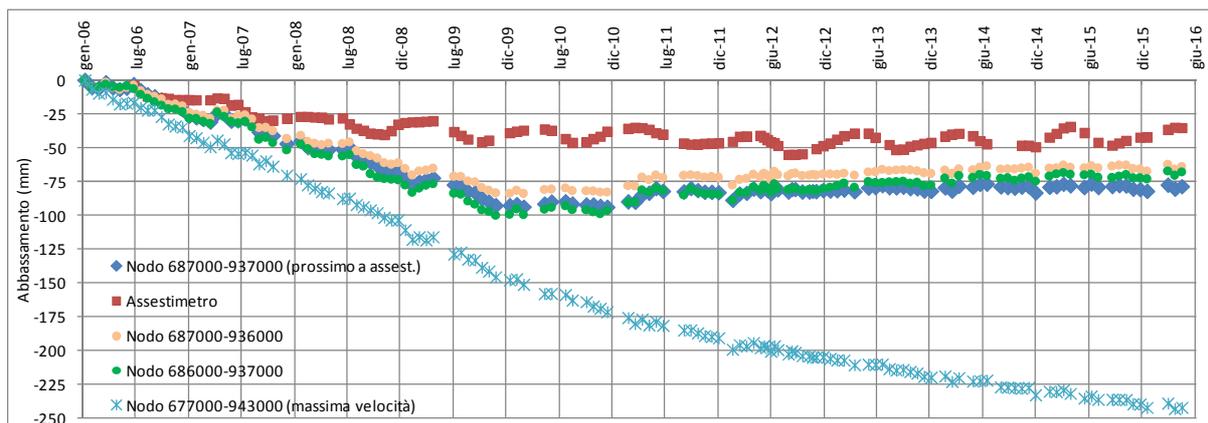
Dall'esame della figura si osserva un flesso nella tendenza evolutiva degli abbassamenti, molto evidente per l'areale nucleo, ma comunque visibile anche per gli altri due areali. Per evidenziare la presenza di una variazione della velocità di abbassamento del suolo nel corso degli anni 2006-2016 si sono effettuate interpolazioni lineari, prendendo in esame per ciascun areale due serie storiche parziali: una (la prima) con inizio al 2006, l'altra (la seconda) con termine 2011, variando il termine finale della prima e quello iniziale della seconda in modo da massimizzare i rispettivi coefficienti di determinazione delle regressioni. Si è evidenziato (Figura 52) che per l'areale nucleo la variazione di pendenza è repentina e collocabile, temporalmente, fra le due acquisizioni satellitari di marzo e maggio 2010; la velocità di abbassamento passa da 28 mm/anno a 4.5 mm/anno. Per l'areale periferico la variazione di velocità è molto più progressiva, con un periodo di transizione di circa 6 mesi (ottobre 2009 - maggio 2010); la velocità di abbassamento passa da 11 mm/anno a 3.5 mm/anno. Ancora più "dolce" è la variazione di velocità di abbassamento del suolo riscontrabile per l'areale est, con una transizione di circa 25 mesi (luglio 2009 a maggio 2011): la velocità di abbassamento passa da 5 mm/anno a circa 2.5 mm/anno. È da sottolineare come, in particolare per l'areale nucleo, la variazione di velocità risulta evidente già considerando la sola campagna 2006-2011, e la giunzione con gli abbassamenti derivanti dalla campagna 2011-2016 non appare introdurre distorsioni apprezzabili.



**Fig. 52** - Tendenze lineari negli abbassamenti del suolo individuabili per gli areali nucleo (a), periferico (b) ed est (c)

### I confronti con i dati assestimetrici

È stata infine valutata la corrispondenza a livello locale fra le informazioni derivanti dalle rilevazioni dell'assestimetro più profondo (- 200 m dal piano campagna) localizzato fra Castel Maggiore e Bologna (si veda la *Figura 50*) e i valori di abbassamento valutati per i nodi ad esso più prossimo. Nella *Figura 53* sono graficati i movimenti verticali dei nodi e rilevati dall'assestimetro<sup>17</sup>.



**Fig. 53** - Abbassamenti del suolo per i nodi più prossimi all'assestimetro e per il nodo a massimo abbassamento nell'intero dominio territoriale a confronto con le corrispondenti compattazioni del suolo rilevate dall'assestimetro negli orizzonti 0–200 m slm negli anni 2006-2016

<sup>17</sup> Si ricorda che la giunzione di serie storiche di abbassamenti derivanti da diverse campagne interferometriche deve essere trattata con cautela, soprattutto alla scala locale, osservando tuttavia come nella figura gli andamenti non appaiono presentare anomalie in corrispondenza della giunzione stessa.

Dal confronto degli andamenti degli abbassamenti emergono le seguenti considerazioni:

- le serie storiche degli abbassamenti del suolo indicate per i tre nodi del grid più prossimi all'assestometro presentano una forte correlazione con i compattamenti 0-200 m registrati dall'assestometro stesso (i valori maggiori,  $\rho=90\%$ , si osservano per il nodo più vicino);
- fino all'inizio del 2010 gli abbassamenti sui nodi del grid sono più che doppi rispetto ai compattamenti dello strato 0 -200 m s.l.m. monitorato dall'assestometro (velocità medie di 10 mm/anno per lo strato 0 -200 m s.l.m., di 23 mm/anno per il nodo del grid più vicino); successivamente i valori medi degli scatterer point associati ai grid dei nodi prossimi all'assestometro mostrano un sollevamento medio di circa 20 mm, mentre le rilevazioni dell'assestometro mostrano un decompattamento medio di circa 5 mm; successivamente al termine della campagna interferometrica 2011-2016 le registrazioni dell'assestometro indicano una sensibile ripresa dei processi di compattazione dello strato 0 -200 m s.l.m., pari a circa 8 mm da giugno 2016 a gennaio 2018<sup>18</sup>;
- si evincerebbe che nella zona almeno il 50% della subsidenza 2006-2010 è riferibile agli strati più profondi del suolo (inferiori a quota -200 m s.l.m.); successivamente i fenomeni di subsidenza si annullano, evidenziandosi anzi un recupero di quota della superficie del suolo attribuibile ad un sollevamento dell'orizzonte -200 m s.l.m., mentre risulterebbe molto limitata la decompattazione degli strati compresi fra 0 e -200 m s.l.m.;
- l'andamento degli abbassamenti nel nodo del grid caratterizzato dalla maggiore subsidenza complessiva nel periodo 2006-2016, localizzato circa 10 km a nord ovest dell'assestometro (vicino al centro abitato di Sala Bolognese) evidenzia velocità di abbassamento di circa 35 mm/anno per il primo periodo e di circa 15 mm/anno per il secondo periodo.

#### **5.5.5 La correlazione fra approvvigionamenti di acque di falda e fenomeni di subsidenza**

Si sono messi a confronto i valori di velocità media di abbassamento del suolo con i corrispondenti valori medi di approvvigionamento idrico dalle falde. Riguardo questi ultimi si osserva come gli unici dati disponibili in forma di serie storica annuale risultano gli emungimenti civili per il periodo 1992-2016; per gli altri settori e per il comparto civile precedentemente il 1992 si è fatto ricorso a stime e interpolazioni sulla base dei dati disponibili per il 1975, il 2000 e il 2010 (tenendo comunque in considerazione le variazioni determinate dall'entrata in esercizio del Centro acque Setta)<sup>19</sup>. È stato ricostruito anche un valore medio della velocità di abbassamento del suolo con riferimento al periodo 1972-1983: si tratta di un valore fortemente approssimato, stimato sulla base del confronto delle velocità di abbassamento rilevate su circa 65 capisaldi delle linee IGM 5, 6, 15 e 17 nei periodi

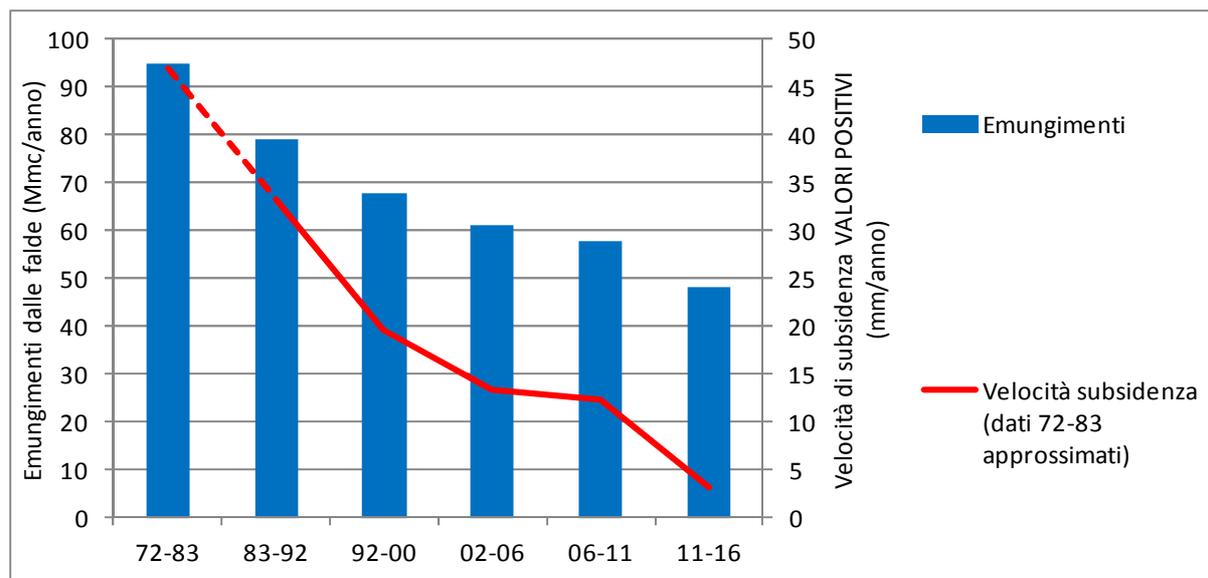
---

<sup>18</sup> La quantificazione dei fenomeni di compattazione / decompattazione registrati dall'assestometro deve inevitabilmente interpretare, con medie mobili o interpolazioni, le oscillazioni di periodicità pari all'anno solare e ampiezza dell'ordine dei 12 mm; su archi temporali brevi i margini di incertezza di tali elaborazioni non sono trascurabili.

<sup>19</sup> Per il settore irriguo la ricostruzione degli emungimenti alla scala annuale non può non tenere in considerazione i relativi andamenti climatici, potendo risultare le necessità irrigue variare fortemente al passare da un anno "umido" ad un anno "siccitoso"; tuttavia, poiché si prendono in esame intervalli pluriennali, l'interpolazione dei dati 1975, 2000 e 2010 (riferiti ad anni climatici medi) non introduce distorsioni significative, soprattutto in considerazione della ridotta incidenza di tali emungimenti rispetto ai totali.

1972/73-1983 e 1983-1987, che si ritiene comunque molto interessante, perché riferito al periodo storico verosimilmente caratterizzato dalle maggiori velocità di subsidenza<sup>20</sup>.

Il confronto fra evoluzione degli emungimenti dalle falde e le velocità di abbassamento, proposto nella *Figura Fig. 54*, evidenzia una fortissima correlazione (negativa) fra le due grandezze ( $\rho=-99.7\%$ ). Non sembra tuttavia trattarsi di una proporzionalità diretta: in particolare osservando che la forte riduzione della velocità di subsidenza nel periodo 2011-2016 rispetto al periodo 2006-2011, corrisponde ad una diminuzione degli emungimenti, nel secondo periodo, proporzionalmente molto inferiore. Al riguardo, è possibile che le condizioni climatiche abbiano inciso positivamente, segnalandosi come il periodo 2011-2016 (che si chiude in realtà a inizio estate 2016) sia risultato sensibilmente più piovoso rispetto al periodo 2006-2011.

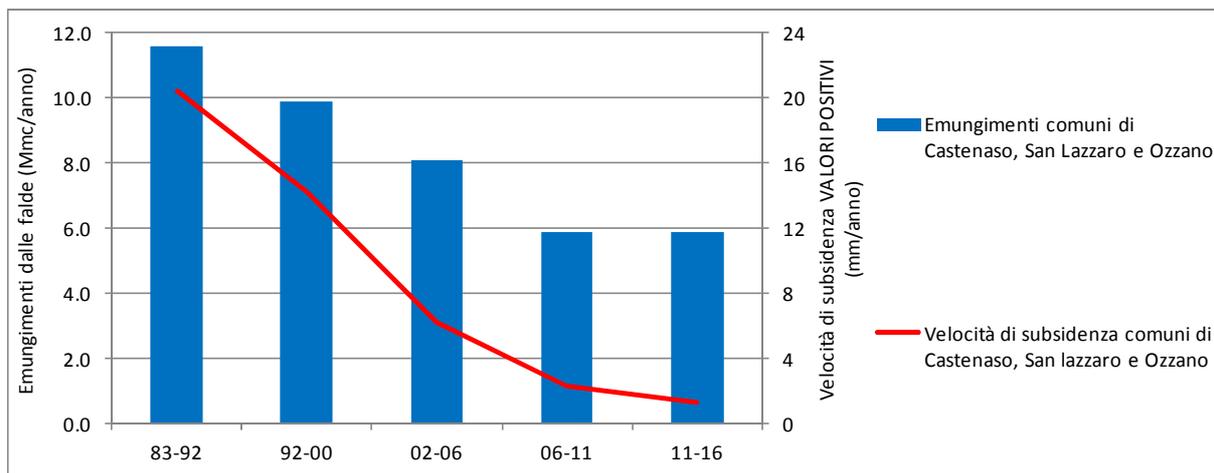


**Fig. 54** - Evoluzione nel medio - lungo periodo dei fenomeni di subsidenza ed emungimenti dalle falde

Un ulteriore interessante confronto fra emungimenti dalle falde e velocità di subsidenza è proposto nella *Figura 55* con riferimento ad una scala territoriale più circoscritta e relativa ai territori comunali di Castenaso, San Lazzaro e Ozzano (quest'ultimo comune è peraltro esterno al dominio territoriale di riferimento principale). I dati relativi agli emungimenti dalle falde derivano dalle basi informative già citate e mostrano, anche in questo caso una preponderanza degli usi idropotabili, che sono valutati dell'ordine del 50% del totale. Si segnala che la riduzione degli approvvigionamenti dal campo pozzi Mirandola, con volumi medi emunti passati da circa 5 Mmc/anno precedentemente al 2000 a poco più di 3 Mmc/anno successivamente, ha portato ad una forte riduzione dei fenomeni di subsidenza circostanti, che nei territori comunali di Castenaso, San Lazzaro e Ozzano<sup>21</sup> sono passati da circa 14 mm/anno nella campagna 1992-2000 a circa 6 mm/anno nella campagna 2002-2006, a circa 2.5 mm/anno nella campagna 2006-2011 (il coefficiente di correlazione fra le serie storiche degli emungimenti dalle falde e delle velocità di abbassamento vale -99%).

<sup>20</sup> Un confronto relativo al periodo 1943/50 -1972, in questo caso possibile per soli 35 capisaldi, mostra infatti velocità medie di abbassamento del suolo significativamente minori rispetto al periodo 1972-1983.

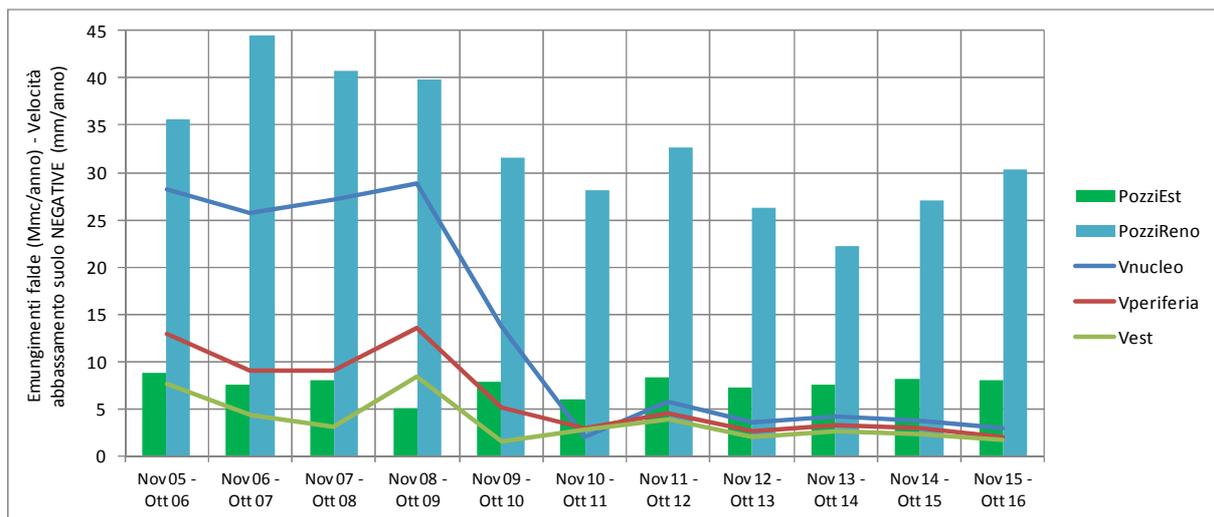
<sup>21</sup> Il campo pozzi Mirandola è localizzato in prossimità del confine comunale fra San Lazzaro di Savena e Ozzano dell'Emilia.



**Fig. 55** - Evoluzione nel medio - lungo periodo dei fenomeni di subsidenza ed emungimenti dalle falde nei comuni di Castenaso, San Lazzaro e Ozzano

Sono infine stati messi a confronto i valori di velocità di subsidenza valutabili per i singoli anni del periodo 2006-2011 e i corrispettivi valori di emungimento dai campi pozzi Reno ed est, con la finalità di evidenziare eventuali correlazioni. Le velocità di abbassamento sono calcolate, per ogni anno, come pendenza dei valori di abbassamento dall'ultima acquisizione satellitare di settembre dell'anno precedente fino alla prima di novembre dell'anno in esame; si è scelto, infatti, di considerare un intervallo in fase rispetto all'andamento medio dei livelli di falda, che vede normalmente nel mese di ottobre i valori minimi.

Nella *Figura 56* sono graficati i valori annui di emungimento dai pozzi Reno ed est e le velocità di subsidenza rilevate negli areali nucleo, periferico ed est. Si segnala una forte correlazione (negativa) fra i valori annui di emungimento nei pozzi Reno e le velocità di abbassamento negli areali nucleo e periferico: i coefficienti di correlazione valgono, rispettivamente, -87% e -78%; ridotta, come peraltro prevedibile, è invece la correlazione fra emungimenti nei pozzi Reno e velocità di subsidenza nell'areale est ( $\rho=-55\%$ ). Non emergono invece correlazioni significative fra emungimenti nei pozzi est e velocità di subsidenza.



**Fig. 56** - Emungimenti annui e velocità medie annue di subsidenza

Sono infine state tentate semplici regressioni lineari che valutino la possibilità di determinare la velocità di abbassamento annua sulla base di grandezze quali emungimenti e precipitazioni, evapotraspirazione potenziale e pioggia netta media sull'alta pianura; i risultati di tali regressioni sono tuttavia non soddisfacenti, sia in termini di coefficienti di determinazione della regressione sia, soprattutto, di coefficienti delle singole variabili ed entità della stima dei relativi errori non coerenti con i fenomeni fisici che tentano di riprodurre.

In conclusione, le elaborazioni condotte hanno mostrato come nel tempo gli emungimenti dalle falde nel territorio bolognese siano considerevolmente diminuiti: da oltre 90 Mmc/anno negli anni '70 del secolo scorso, a poco più di 60 Mmc/anno da inizio secolo a fine del primo decennio, fino a meno di 50 Mmc/anno nel periodo più recente. Corrispondentemente, sui 17 comuni che costituiscono il dominio territoriale, si sono ridotte fortemente le velocità di abbassamento del suolo: da oltre 33 mm/anno medi negli anni '80 del secolo scorso (con ampi areali con velocità superiori a 50 mm/anno) a circa 13 mm/anno medi ad inizio secolo, risultando infine dell'ordine dei 3 mm/anno medi nel periodo più recente. È da segnalare che i dati registrati dall'assestometro di Castel Maggiore, che hanno mostrato per gli anni 2006-2016 una ottima correlazione fra la compattazione degli strati compresi fra 0 e -200 m s.l.m. e gli abbassamenti del suolo, segnalano per il periodo luglio 2016 - gennaio 2018 una ripresa dei fenomeni di compattazione.

Appare molto evidente un legame causa - effetto fra riduzione degli emungimenti dalle falde e riduzione della velocità di abbassamento del suolo, segnalandosi in particolare come nel periodo più recente la diminuzione degli emungimenti idropotabili dai campi pozzi in area Reno, connessa all'entrata in esercizio del derivatore Reno-Setta, ha congiuntamente portato una forte diminuzione dei valori di subsidenza. È da osservare che le condizioni climatiche nella campagna interferometrica più recente sono risultate sensibilmente più piovose rispetto al medio periodo antecedente, non è quindi da escludersi un contributo meteo favorevole (in termini di maggiore ricarica delle falde). Si segnala inoltre una forte riduzione dei fenomeni di subsidenza, ad una scala molto più localizzata (comuni di San Lazzaro, Castenaso e Ozzano), concomitante con la riduzione degli emungimenti dal campo pozzi Mirandola avvenuta dal 2000 in poi.

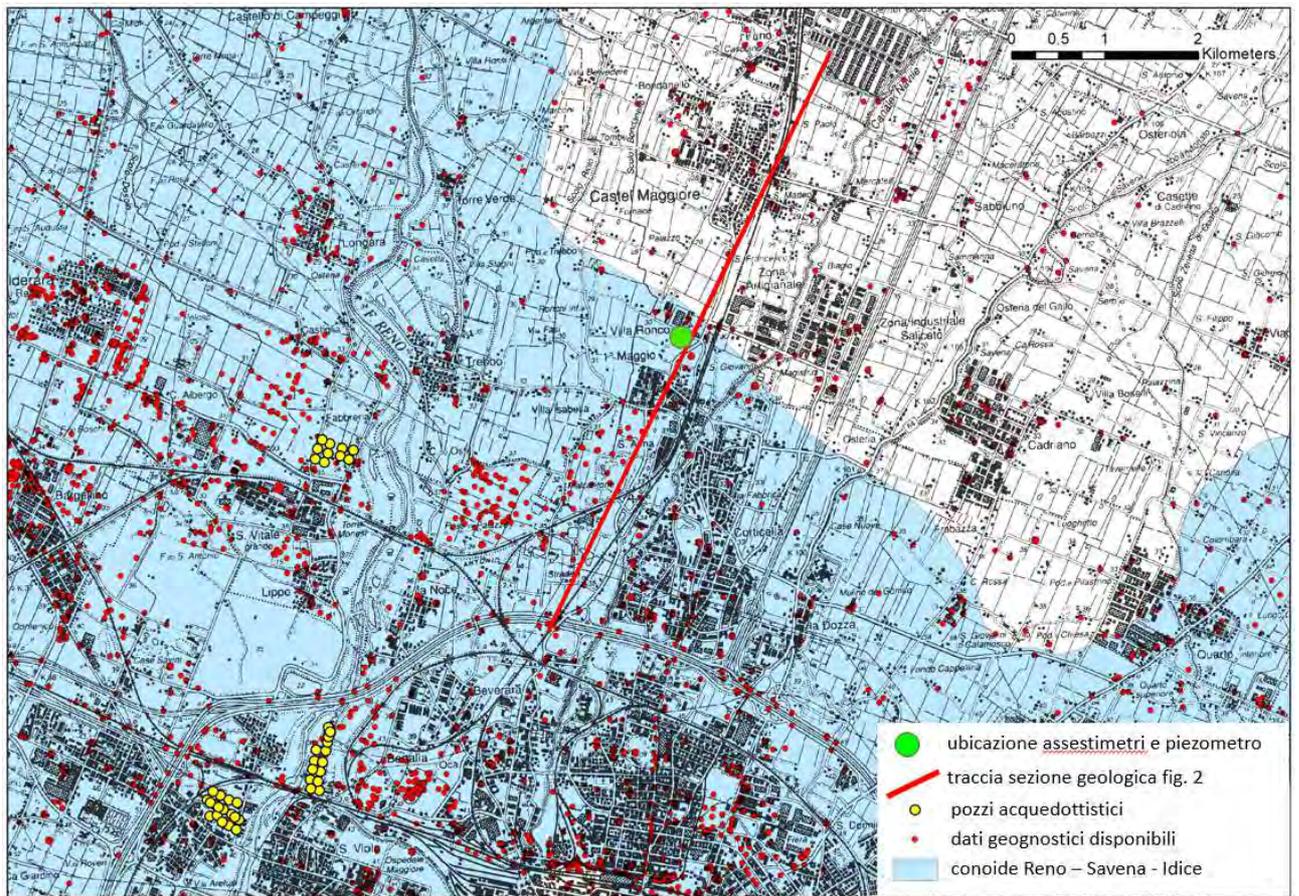
Ulteriori approfondimenti potrebbero essere effettuati per evidenziare una relazione quantitativa che leghi i fenomeni di subsidenza al regime di emungimenti dalle falde. A Tal fine si dovrebbero prendere in esame le dinamiche circolatorie idrogeologiche del sistema acquifero, i processi di ricarica e i relativi legami con le condizioni climatiche, le caratteristiche di suscettibilità alla compattazione dei diversi strati del sottosuolo; tali valutazioni sarebbero di estremo interesse, ma richiederebbero uno studio *ad hoc*, esulando dalle finalità del presente lavoro. Premesse le limitazioni connesse alla mancanza di tali approfondimenti conoscitivi, si può, comunque, ritenere che nell'areale bolognese il regime di emungimenti dall'acquifero di pianura nell'ultimo periodo 2010-2016 (successivo all'entrata in servizio del derivatore Reno-Setta) sia compatibile con una significativa riduzione dei fenomeni di subsidenza.

#### **5.5.6 La correlazione fra variazioni assestimetriche e piezometriche a Castelmaggiore (Bo)**

Nell'aprile del 2005 sono stati installati due assestimetri profondi 100 e 200 metri per monitorare in continuo le deformazioni del suolo presso Castelmaggiore (Bo), in una delle zone della pianura emiliano-romagnola maggiormente interessate dal fenomeno della subsidenza. Successivamente, nell'autunno del 2007, è stato perforato in prossimità degli assestimetri un piezometro profondo 60 metri, con l'obiettivo di confrontare i dati della deformazione del suolo con la variazione del livello piezometrico.

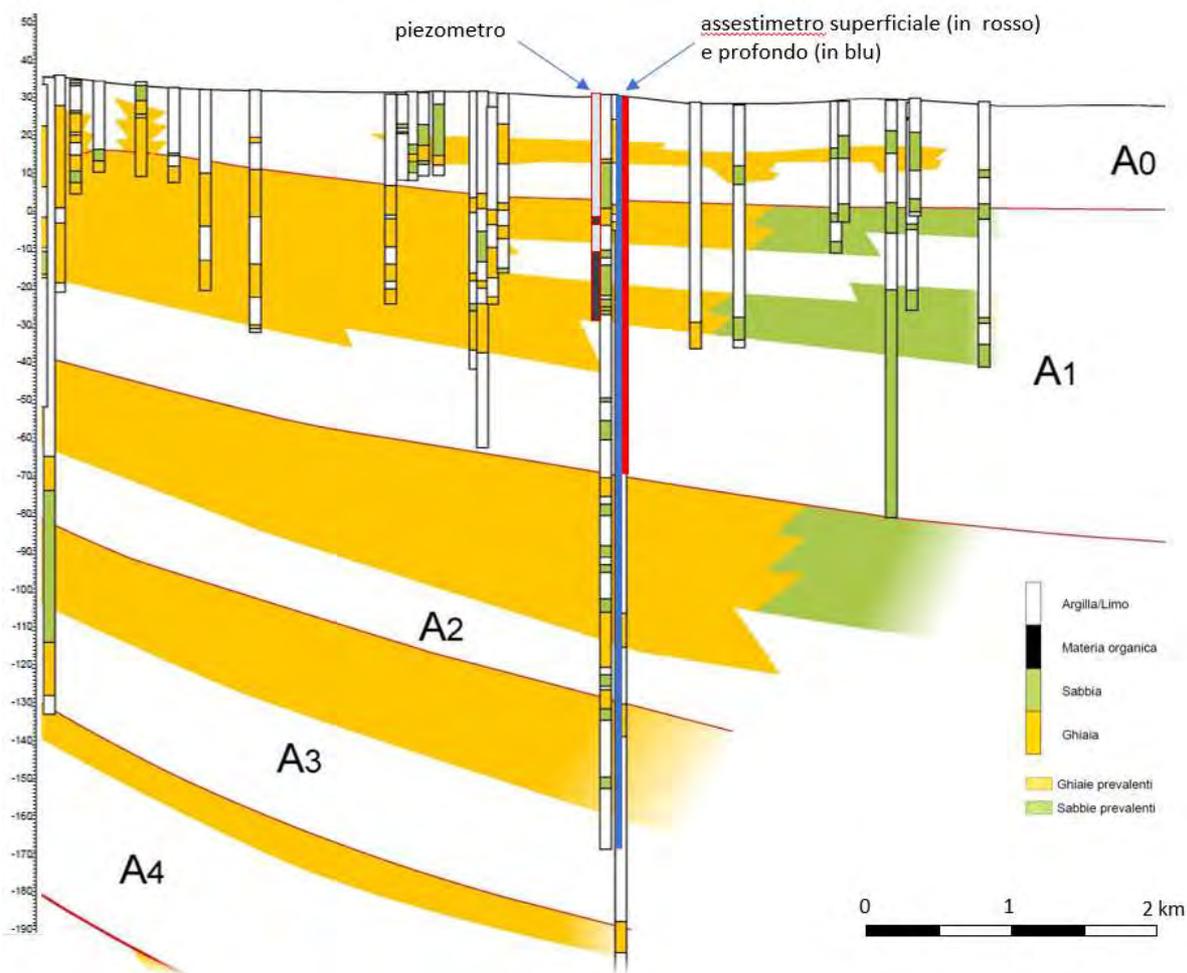
La zona ricade in una porzione marginale della conoide alluvionale del fiume Reno (*Figura 57*), caratterizzata da alternanze di depositi grossolani, che costituiscono i principali acquiferi, e depositi fini, per uno spessore massimo di oltre 400 metri.

Nella conoide alluvionale del Reno sono presenti tre importanti campi pozzi che servono, assieme a due campi pozzi sulle conoidi di Savena-Idice e alle acque di superficie provenienti dal fiume Setta, l'approvvigionamento potabile dell'acquedotto primario, che serve tutto il circondario bolognese di pianura e prima collina.



**Fig. 57 - Ubicazione sito di monitoraggio e altri elementi di interesse (vedi legenda)**

Nel sottosuolo sono state individuate le unità stratigrafiche note a livello regionale, i gruppi acquiferi A, B e C con le loro suddivisioni interne in complessi acquiferi: A0, A1, A2, ecc. L'assestimetro superficiale ed il piezometro investigano l'unità stratigrafica A1, mentre l'assestimetro profondo arriva all'unità A3 (Figura 58).



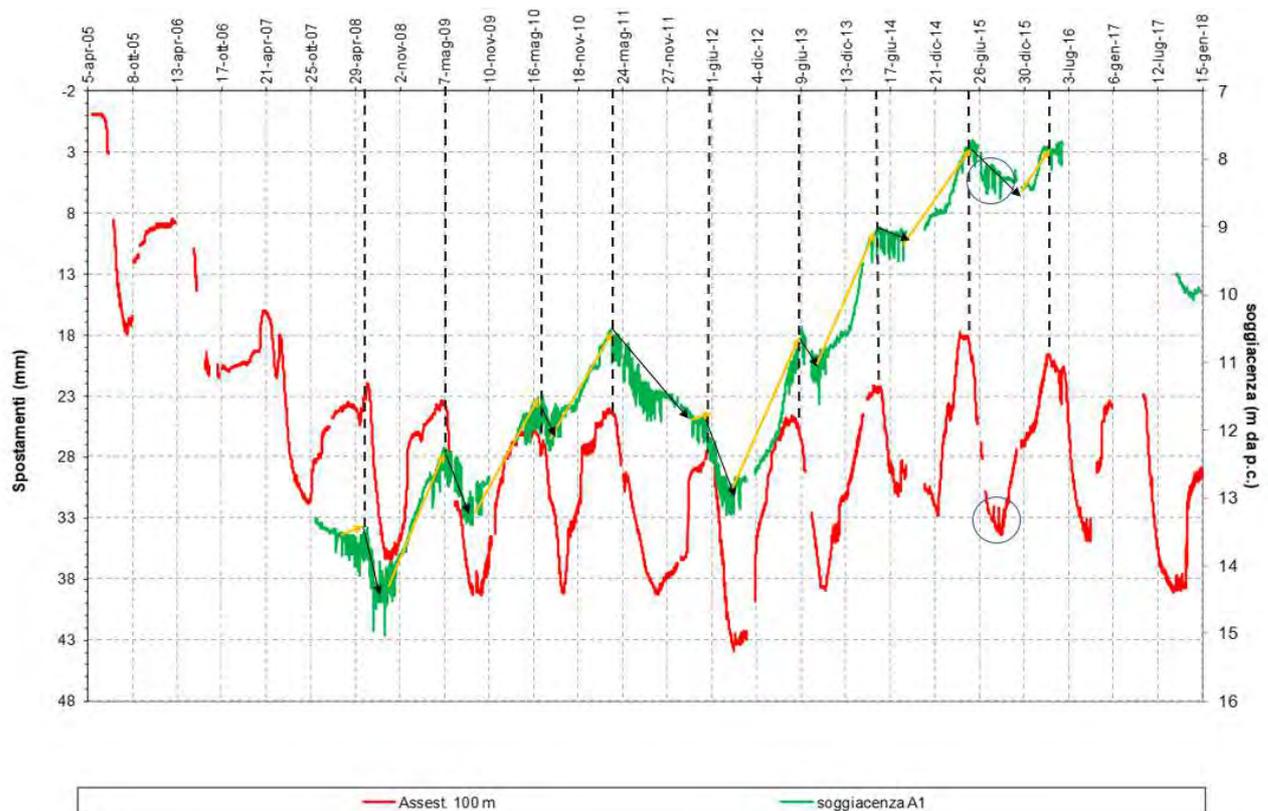
**Fig. 58** - Sezione geologica della zona in studio con evidenziati gli assestimetri ed il piezometro (in nero gli intervalli fenestrati). Traccia della sezione in figura 1

Il trend della piezometria nel piezometro posizionato a fianco degli assestimetri mostra degli andamenti con frequenza temporale diversa, osservabili in *Figura 59* e *60*, dove sono riportati anche i dati della deformazione del suolo acquisiti dall'assestometro superficiale.

Si osserva una sorta di seghettatura dovuta a frequenti abbassamenti giornalieri, dell'ordine di alcuni decimetri, che avvengono nel periodo primaverile-estivo e che sono probabilmente dovuti ad un pozzo per acqua in funzione nelle vicinanze del piezometro. Queste variazioni giornaliere in alcuni casi sembrano avere un certo riscontro anche nell'andamento dell'assestometro (vedi cerchi blu in *Figura 59*).

La piezometria mostra un evidente andamento sinusoidale a frequenza stagionale, caratterizzato da abbassamenti estivi-autunnali ed innalzamenti invernali-primaverili, da mettere verosimilmente in relazione con il regime della ricarica e dei prelievi. L'entità degli abbassamenti del livello è abbastanza variabile, con valori generalmente compresi tra 0.5 e 1 metro, un massimo di 1.5 metri nel 2012, e un minimo di pochi centimetri nell'estate del 2014 (freccie nere in *Figura 59*). L'entità dei sollevamenti è anch'essa variabile, con valori maggiori rispetto agli abbassamenti, e compresi generalmente tra 1.5 e 2 metri, un massimo di 2.3 metri nel 2012 – 2013 ed un minimo di pochi decimetri nel 2011 (freccie arancio in *Figura 59*).

Queste variazioni avvengono contemporaneamente con le deformazioni dell'assestometro che registra subsidenza durante estate-autunno e dilatazione in inverno-primavera (linee nere verticali tratteggiate in *Figura 59*). Si evidenzia quindi una relazione chiara ed immediata tra l'andamento del livello di falda e la deformazione del suolo: quando il livello si abbassa i terreni si compattano e quando il livello si alza i terreni si dilatano.

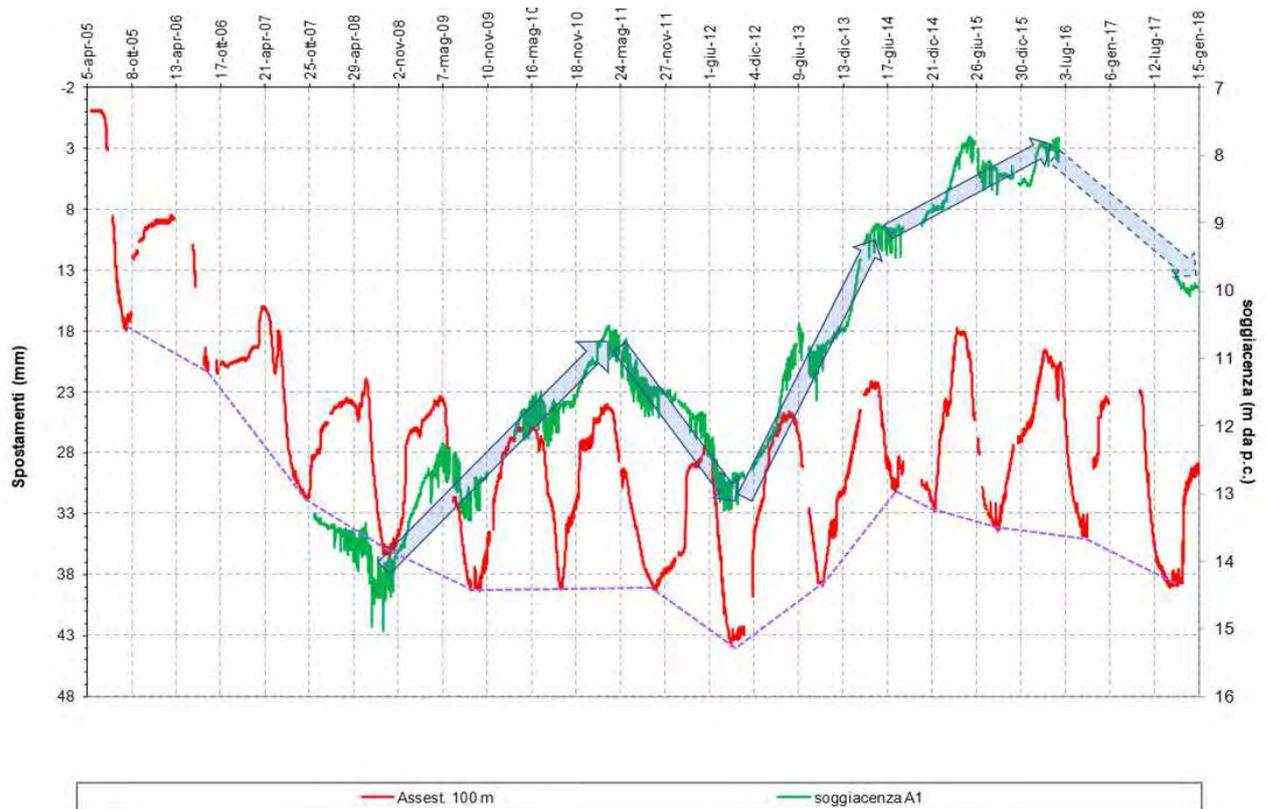


**Fig. 59** - Andamento della soggiacenza e delle deformazioni del suolo (gli spostamenti verso il basso della curva rossa indicano subsidenza, quelli verso l'alto sollevamento), spiegazione nel testo

Differentemente rispetto alle oscillazioni della piezometria, le variazioni stagionali positive e negative dell'assestometro sono molto regolari, con una ampiezza quasi sempre di poco meno di 15 mm.

Pur essendo i due fenomeni chiaramente correlati temporalmente, non hanno quindi una proporzionalità diretta, ovvero l'entità della deformazione del suolo non è strettamente proporzionale alla variazione della piezometria. E' quindi possibile che la deformazione stagionale del suolo dipenda anche da altri fattori, quali forse il grado di umidità del terreno e l'andamento dei livelli piezometrici degli acquiferi sovrastanti e sottostanti quello qui monitorato.

Dato che, come detto, i sollevamenti stagionali del livello piezometrico sono di ampiezza maggiore rispetto agli abbassamenti, l'andamento complessivo del livello di falda in tutto il periodo analizzato mostra un innalzamento della superficie piezometrica. Il livello è aumentato di circa 6 metri in poco meno di 9 anni, dall'ottobre 2007 al giugno 2016; tale aumento, oltre che essere funzione del regime delle precipitazioni, molto probabilmente è dovuto anche alla diminuzione complessiva dei prelievi nella conoide del Reno, dovuta all'entrata in esercizio, sperimentale, del derivatore Reno Setta, che ha incrementato la disponibilità di acque potabilizzate di origine superficiale. L'innalzamento del livello avviene in due momenti distinti, intervallati da un periodo in cui il livello diminuisce (*Figura 60*).



**Fig. 60** - Frecce blu: andamento della soggiacenza di lungo periodo; linea tratteggiata viola: involuppo dei picchi di subsidenza

La risalita del livello piezometrico dalla primavera 2008 alla primavera 2011, si accompagna ad un rallentamento progressivo della velocità di subsidenza, che alla fine di questo periodo è completamente azzerata. Il successivo abbassamento del livello piezometrico, che culmina con il minimo dell'agosto 2012, vede una ripresa della subsidenza.

La rapida risalita del livello dall'agosto 2012 sino al maggio 2014 avviene contemporaneamente ad una inversione del movimento del suolo, che in questo periodo si solleva.

Successivamente, sino al giugno 2016, il livello sale anche se meno di prima, ed il terreno è sostanzialmente fermo.

Si osserva quindi una chiara relazione tra l'andamento del livello piezometrico e la deformazione del suolo anche nel lungo periodo, alla scala di tutto l'intervallo di tempo analizzato. Il sollevamento del livello piezometrico è contemporaneo al rallentamento, azzeramento ed inversione della subsidenza, come già osservato a livello delle variazioni stagionali.

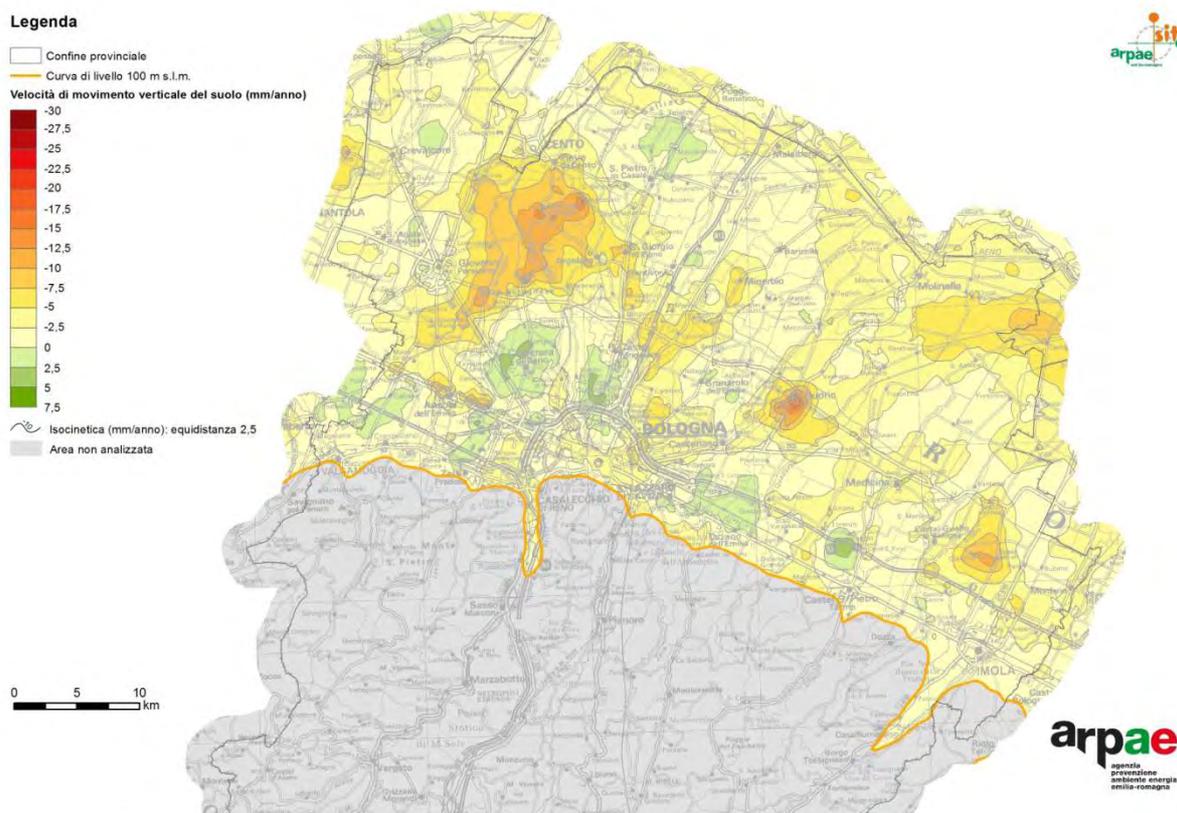
Come ampiamente descritto in letteratura a partire dai lavori classici di Terzaghi (1923), esiste una relazione di causa effetto tra questi fenomeni: le variazioni di pressione che si registrano nell'acquifero causano una variazione nello stato tensionale del terreno, che risponde dilatandosi durante l'aumento del livello, e contraendosi durante la diminuzione del livello. Quanto osservato, mostra che in questo sito la relazione tra i due fenomeni si evidenzia a scala stagionale, pluriennale e, probabilmente, anche a quella giornaliera (si vedano i cerchi blu in *Figura 59*), ed è sostanzialmente immediata.

Alla scala del sito di monitoraggio qui descritto la risalita complessiva del livello piezometrico del primo acquifero confinato ha influenzato in modo deciso la deformazione della porzione di sottosuolo tra 0 e 100 metri; la subsidenza è diminuita fino ad azzerarsi completamente, con momenti in cui il fenomeno si è addirittura invertito.

Quindi si conferma quando osservato in gran parte della pianura bolognese, in cui la diminuzione dei prelievi acquedottistici, consentita principalmente dal maggiore utilizzo delle acque superficiali, ha determinato l'aumento del livello nelle falde rallentando in modo deciso il fenomeno della subsidenza.

### 5.5.7 Conclusioni

Come anzidetto, l'abbassamento generalizzato che ha caratterizzato in passato il territorio bolognese, sia per vastità delle superfici interessate sia per i valori di velocità particolarmente elevati, si è fortemente ridimensionato, in ragione principalmente della riduzione dei prelievi acquedottistici. Il 39% del territorio presenta una riduzione della subsidenza, tuttavia, permangono alcune aree di media pianura, molto localizzate, che continuano a presentare abbassamenti, seppure di entità notevolmente ridotta rispetto al precedente rilievo. In particolare, ci si riferisce ai centri di Sala Bolognese (*Figura 62*), Castello d'Argile (*Figura 63*), e Budrio (*Figura 64*) con velocità massime intorno a 15 mm/anno. La città di Bologna presenta abbassamenti di alcuni mm/anno fino a massimi di 5 mm/anno, grosso modo in linea con il precedente rilievo. Valori simili, ma di segno positivo, si evidenziano invece in ampie aree a nord del centro cittadino (*Figura 65*), aree che in particolare hanno beneficiato della riduzione dei prelievi acquedottistici. La *Figura 61* costituisce uno stralcio della cartografia regionale ritagliato sui confini della provincia di Bologna.



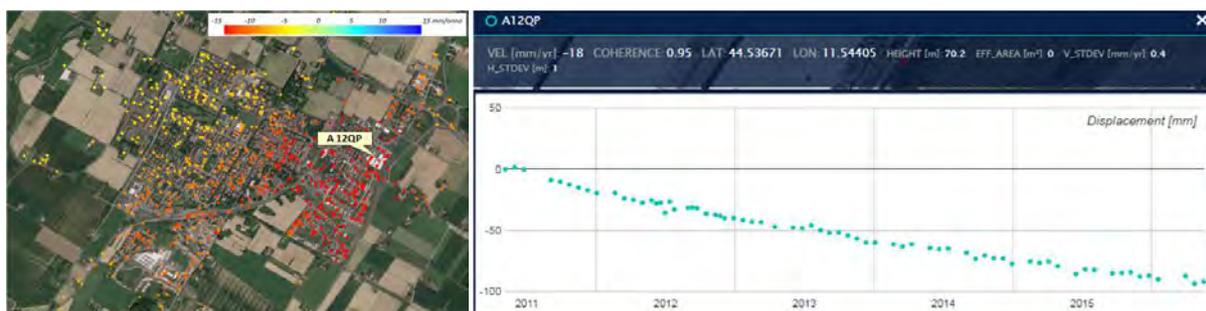
**Fig. 61** - Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2011-2016. Provincia di Bologna



**Fig. 62** - Area di Sala Bolognese con evidenziati i PS/DS analizzati (a sinistra) e serie temporale del punto A2DST (a destra)



**Fig. 63** - Area di Castello d'Argile con evidenziati i PS/DS analizzati (a sinistra) e serie temporale del punto A2QWD (a destra)



**Fig. 64** - Area di Budrio con evidenziati i PS/DS analizzati (a sinistra) e serie temporale del punto A12QP (a destra)



**Fig. 65** - Area di Bologna (Corticella) con evidenziati i PS/DS analizzati (a sinistra) e serie temporale del punto A1HL2 (a destra)

## 5.6 Ferrara

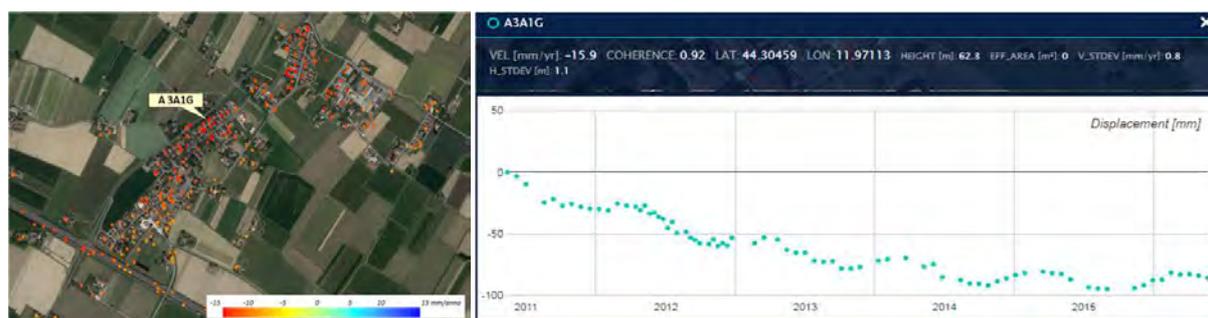
Nella provincia di Ferrara, in generale, non si evidenziano fenomeni subsidenziali significativi; gli abbassamenti mediamente si attestano intorno a 2 mm/anno, compatibili quindi con una subsidenza di tipo naturale. Rispetto al precedente rilievo si segnala solo un incremento subsidenziale in corrispondenza di Mirabello con massimi di circa 10 mm/anno.

## 5.7 Ravenna

Nella provincia di Ravenna si evidenzia, in generale, una riduzione della subsidenza rispetto al precedente rilievo, gli abbassamenti, mediamente, si attestano intorno a 3 mm/anno. In particolare, si evidenziano alcune aree di abbassamento storiche, quali la depressione in corrispondenza della foce dei Fiumi Uniti, con massimi di oltre 15 mm/anno - in diminuzione rispetto al periodo precedente - (Figura 66) ed un'ampia area a est di Faenza, compresa tra il F. Lamone ed il F. Montone all'altezza dell'autostrada, con abbassamenti massimi di circa 15 mm/anno (Figura 67) in corrispondenza di Reda. E' da notare anche un'altra zona di depressione, molto più circoscritta rispetto alle precedenti, in corrispondenza di un insediamento industriale a nord di Conselice con massimi di oltre 15 mm/anno. La città di Ravenna è sostanzialmente stabile presentando abbassamenti massimi intorno a 2-3 mm/anno compatibili con una subsidenza di tipo naturale.



**Fig. 66-** Area di Foce Fiumi Uniti con evidenziati i PS/DS analizzati (a sinistra) e serie temporale del punto A3JH4 (a destra)



**Fig. 67-** Area di Reda-Birandola (Faentino) con evidenziati i PS/DS analizzati (a sinistra) e serie temporale del punto A3A1G (a destra)

## 5.8 Forlì-Cesena

Nella provincia di Forlì-Cesena si evidenziano abbassamenti medi di circa 2 mm/anno, in riduzione rispetto al precedente rilievo. Continua la tendenza alla riduzione della subsidenza nell'area di Savignano sul Rubicone, in cui si notano abbassamenti massimi inferiori a 15 mm/anno localizzati in corrispondenza di San Mauro Pascoli (Figura 68). I centri di Forlì e Cesena sono sostanzialmente stabili con abbassamenti medi di circa 2 mm/anno.



**Fig. 68 -** Area di San Mauro Pascoli con evidenziati i PS/DS analizzati (a sinistra) e serie temporale del punto A015K (a destra)

## 5.9 Rimini

Nella provincia di Rimini si registra una riduzione degli abbassamenti che ora si attestano mediamente intorno a 2 mm/anno. Nella città di Rimini si evidenziano abbassamenti massimi compresi tra 5 e 7.5 mm/anno, in riduzione rispetto al precedente rilievo.

## 5.10 Il litorale

Osservando il litorale nel suo complesso, non si evidenziano variazioni significative rispetto al periodo precedente: si osservano, in generale, valori compatibili con una subsidenza di tipo naturale, fatta eccezione per l'areale storicamente subsidente compreso tra Lido Adriano e la Bocca del T. Bevano, che presenta valori massimi di oltre 15 mm/anno in corrispondenza della foce dei Fiumi Uniti - in diminuzione rispetto al periodo precedente - ed un'estensione massima dell'area subsidente verso l'entroterra di circa 5 km.

Il litorale nella sua interezza presenta un abbassamento medio, relativamente ad una fascia di 5 km verso l'entroterra, di circa 3 mm/anno, ulteriormente ridotto rispetto al periodo precedente. Nella *Figura 69* è riportato uno stralcio della cartografia regionale ritagliato secondo la suddetta fascia litoranea.

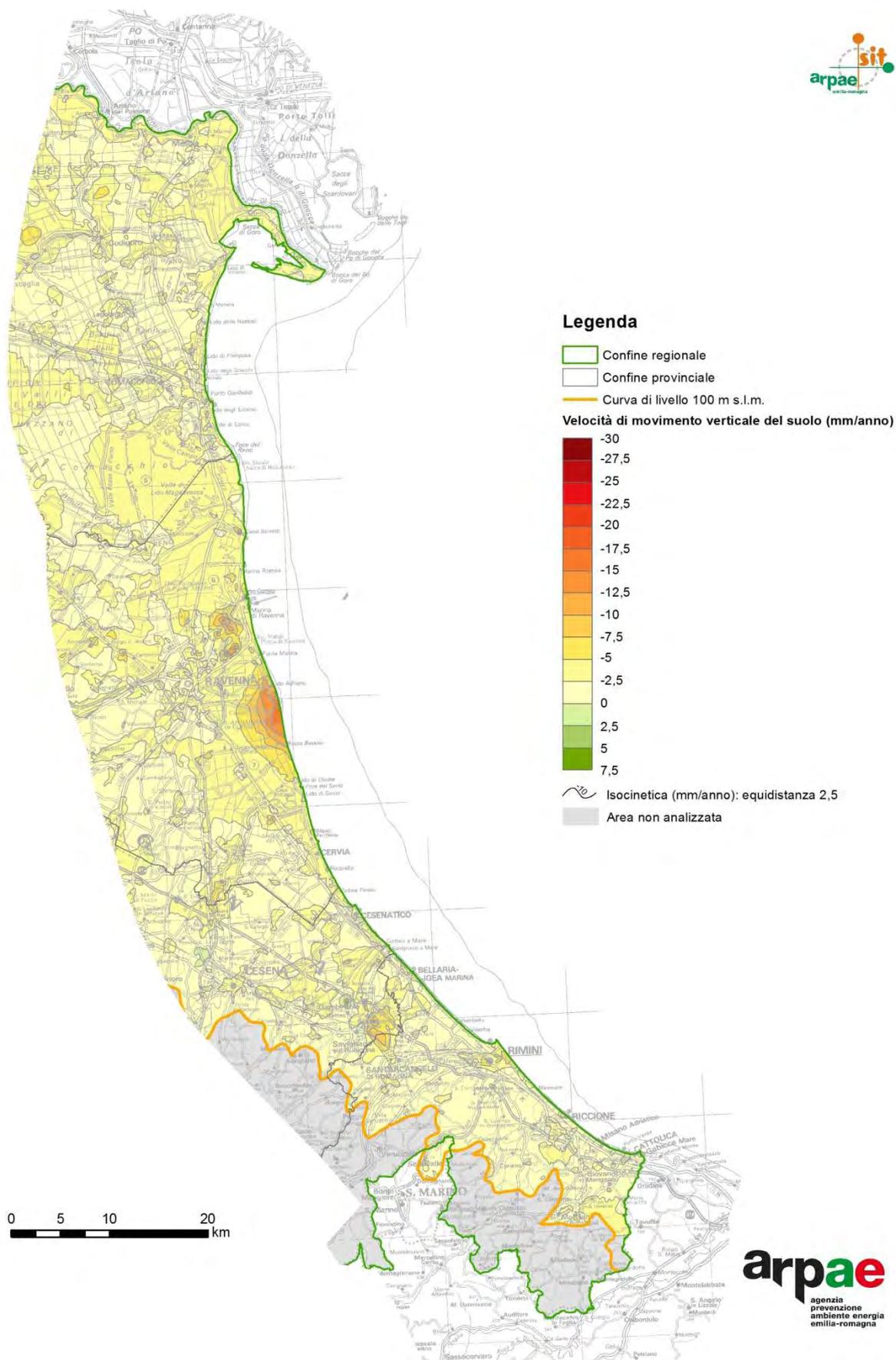
Nella *Tabella 14* sono riportate le velocità di abbassamento nei 5 periodi 1984-1987, 1987-1999, 1999-2005, 2006-2011, 2011-2016 e l'abbassamento totale nel periodo 1984-2016 per diverse località costiere da Cattolica sino alla foce del Po di Goro. Per ciascuna località è stato scelto un caposaldo di livellazione che presentasse una serie storica con inizio a partire dal primo rilievo del 1984<sup>22</sup> seguito dai rilievi del 1987 e 2005 sempre con metodi topografici; le serie storiche sono state completate utilizzando le velocità di abbassamento rilevate per i medesimi siti dalle analisi interferometriche del 2006-2011 e 2011-2016. Infine viene riportato anche l'abbassamento totale registrato con le medesime modalità nel periodo 1984-2016. Come si può osservare, nel periodo più recente, continua la tendenza alla riduzione degli abbassamenti già evidenziata nel precedente rilievo, anche la subsidenza del paraggio di Lido di Dante (foce Fiumi Uniti), pur presentando il valore più alto dell'intero arco costiero con 17 mm/anno, appare in diminuzione. Per quanto riguarda gli abbassamenti complessivi dal 1984 al 2016, ancora Lido di Dante appare la località più subsidente (53 cm) insieme al limitrofo Lido Adriano (45 cm).

---

<sup>22</sup> L'unica eccezione è il caposaldo istituito nel 1993 alla foce del Po di Goro e, quindi, mancante delle misure 1984 e 1987.

Località	Velocità di abbassamento nel periodo 1984-1987 (mm/anno)	Velocità di abbassamento nel periodo 1987-1999 (mm/anno)	Velocità di abbassamento nel periodo 1999-2005 (mm/anno)	Velocità di abbassamento nel periodo 2006-2011 (mm/anno)	Velocità di abbassamento nel periodo 2011-2016 (mm/anno)	Abbassamento 1984-2016 (cm)
Cattolica	10	2	4	4	3	-12
Rimini	28	6	9	6	4	-27
Torre Pedrera	27	2	6	3	3	-17
Bellaria	36	6	8	5	2	-27
Gatteo a Mare	38	12	10	6	3	-37
Cesenatico	55	10	9	5	3	-38
Pinarella di Cervia	30	6	8	5	3	-26
Milano Marittima	35	9	10	7	5	-35
Lido di Savio	24	9	10	6	5	-30
Foce Bevano	17	8	11	11	11	-33
Lido di Dante	20	12	19	21	17	-53
Lido Adriano	23	13	15	14	11	-45
Punta Marina	21	11	10	5	4	-31
Marina di Ravenna	20	10	8	5	4	-27
Porto Corsini	24	15	13	7	8	-42
Casalborsetti	18	11	10	3	2	-27
Dosso degli Angeli	23	18	13	2	3	-40
Portogaribaldi	10	8	8	3	2	-21
Lido delle Nazioni	14	13	10	2	3	-29
Boscone della Mesola	10	11	7	5	3	-26
Goro	20	17	10	8	3	-39
Foce del Po di Goro	-	-	9	9	4	-

**Tabella 14** - Confronto tra le velocità di abbassamento nei periodi 1984-1987, 1987-1999, 1999-2005, 2006-2011, 2011-2016 e abbassamento complessivo nel periodo 1984-2016 per diverse località costiere



**Fig. 69 - Carta delle velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2011-2016. Litorale**

## 6. Conclusioni

Il presente lavoro aggiorna al periodo 2011-2016 le conoscenze relative alle velocità di movimento verticale del suolo, sull'intera area di pianura regionale, rispetto al precedente rilievo riferito al periodo 2006-2011. In particolare si è proceduto attraverso due fasi successive: in una prima fase (2016-17) è stata effettuata l'analisi interferometrica, tramite la tecnica SqueeSAR™, dei dati radar satellitari acquisiti sull'intera area di pianura della regione, individuando i punti di misura presenti, le loro velocità medie annue e le relative serie storiche di spostamento nel periodo 2011-2016 per ciascuno dei 6 siti elaborati.

Nella seconda fase del lavoro (2017-18) si è proceduto all'allineamento a scala regionale dei 6 siti elaborati e alla calibrazione dei risultati dell'analisi SqueeSAR™, tramite i dati di movimento verticale, ottenuti dall'elaborazione di 16 stazioni permanenti GPS; ulteriori 6 stazioni sono state utilizzate per un controllo dei risultati a posteriori. Successivamente è stata effettuata un'analisi particolarmente accurata sul totale di 1.974.150 punti di misura individuati, al fine di selezionare i punti considerati non significativi e fuorvianti rispetto alle finalità del nostro lavoro: sono state implementate quindi procedure volte alla ricerca di punti, caratterizzati da velocità "anomale" rispetto al loro intorno, indicativi di fenomeni diversi non attinenti al fenomeno della subsidenza a carattere regionale che si voleva rappresentare. Si tratta, in sostanza, di fenomeni estremamente localizzati legati a cedimenti di singole strutture o all'assestamento di opere di recente costruzione. Le procedure di selezione implementate hanno portato ad un *dataset* finale pari a 1.912.781 punti, essendo stati scartati 61.369 punti i quali, tuttavia, non si esclude possano comunque essere utilizzati per finalità diverse da quelle che hanno informato il presente lavoro.

Il *dataset* definitivo così ottenuto è stato usato per un'interpolazione che ha generato un grigliato regolare (100x100 m) delle velocità di movimento verticale sull'intero territorio di pianura della regione; da esso è stata generata la carta dei movimenti verticali del suolo a scala regionale relativa al periodo 2011-2016, tramite una rappresentazione a curve isocinetiche le quali, anche grazie alla precisione del dato che si stima - in linea con il precedente rilievo - intorno a  $\pm 2$  mm/anno, sono state delineate con un passo di 2.5 mm/anno, come per la precedente cartografia.

In conclusione, si può affermare che il metodo dell'analisi interferometrica di dati radar satellitari supportato dall'elaborazione di stazioni permanenti GPS, già collaudato nel rilievo del 2011, ancora una volta ha risposto pienamente ai risultati attesi. Il metodo potrebbe essere ulteriormente affinato utilizzando dati interferometrici a doppia geometria (ascendente e discendente), anziché a geometria singola, soprattutto in considerazione che in futuro potrebbero essere pienamente utilizzabili i dati acquisiti da Sentinel (Agenzia Spaziale Europea) con un significativo sgravio di costi rispetto a RADARSAT. Nella stessa ottica potrebbero essere utilizzati i dati acquisiti da Cosmo- SkyMed (Agenzia Spaziale Italiana) per effettuare, data la risoluzione molto più elevata, dei *focus* specifici su aree particolari.

Dall'esame degli elaborati prodotti si evince che la gran parte del territorio (79%) non presenta nel periodo 2011-16 variazioni di tendenza rispetto al precedente rilievo, mentre il 18% della superficie evidenzia una riduzione della subsidenza.

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

Nella provincia di Reggio si rileva una riduzione generalizzata della subsidenza, permangono, tuttavia, due aree in abbassamento che continuano a presentare valori simili al passato: l'area industriale a nord del capoluogo con valori massimi di circa 10 mm/anno e l'area industriale

ad est di Correggio con valori massimi di circa 15 mm/anno. Il capoluogo, in particolare, è sostanzialmente stabile.

Nella provincia di Modena si osserva, in generale, una riduzione degli abbassamenti: è ancora il territorio di media pianura ad essere più interessato dalla subsidenza, in particolare, in corrispondenza delle aree artigianali ad ovest di Carpi, con massimi di circa 20 mm/anno, e a sud di Soliera, con massimi di circa 25 mm/anno, entrambe in decremento rispetto ai valori massimi precedenti. L'area artigianale a nord di Bomporto presenta ancora valori di oltre 15 mm/anno. La città di Modena è sostanzialmente stabile.

La provincia di Bologna, caratterizzata in passato dal più alto tasso di subsidenza a livello regionale, presenta ora un forte ridimensionamento del fenomeno, le cui ragioni sono legate principalmente alla riduzione degli emungimenti idropotabili, in concomitanza con l'entrata in esercizio del derivatore Reno-Setta che ha permesso un maggiore utilizzo di acque superficiali. Tuttavia, permangono alcune aree di media pianura, molto localizzate, che continuano a presentare abbassamenti, seppure di entità notevolmente ridotta rispetto al precedente rilievo, in particolare i centri di Sala Bolognese, Castello d'Argile, Venezzano e Budrio con velocità massime intorno a 15 mm/anno. La città di Bologna presenta abbassamenti di alcuni mm/anno fino a massimi di 5 mm/anno, grosso modo in linea con il precedente rilievo. Valori simili, ma ora di segno positivo, si evidenziano invece in ampie aree a nord del centro cittadino, aree che in particolare hanno beneficiato della riduzione dei prelievi acquedottistici.

Nella provincia di Ferrara gli abbassamenti sono generalmente compatibili con una subsidenza di tipo naturale. Rispetto al precedente rilievo si segnala solo un incremento subsidenziale in corrispondenza di Mirabello con massimi di circa 10 mm/anno.

Nella provincia di Ravenna continua la tendenza alla riduzione della subsidenza; si evidenziano ancora alcune aree di abbassamento storiche, comunque in riduzione rispetto al precedente rilievo, quali la depressione in corrispondenza della foce dei Fiumi Uniti, con massimi di oltre 15 mm/anno, un'ampia area a est di Faenza tra il F. Lamone ed il F. Montone all'altezza dell'autostrada, con abbassamenti massimi di circa 15 mm/anno in corrispondenza di Reda e un'altra area, molto più circoscritta rispetto alle precedenti, in corrispondenza di un insediamento industriale a nord di Conselice con massimi di oltre 15 mm/anno. La città di Ravenna è sostanzialmente stabile presentando abbassamenti massimi intorno a 2-3 mm/anno compatibili con una subsidenza di tipo naturale.

Nella provincia di Forlì-Cesena si evidenziano abbassamenti medi di circa 2 mm/anno, in riduzione rispetto al precedente rilievo. Continua la tendenza alla riduzione della subsidenza nell'area di Savignano sul Rubicone, in cui si notano abbassamenti massimi inferiori a 15 mm/anno localizzati in corrispondenza di San Mauro Pascoli. I centri di Forlì e Cesena sono sostanzialmente stabili con abbassamenti medi di circa 2 mm/anno.

Nella provincia di Rimini si registra una riduzione degli abbassamenti che ora si attestano mediamente intorno a 2 mm/anno. La città di Rimini presenta abbassamenti massimi compresi tra 5 e 7.5 mm/anno, in riduzione rispetto al precedente rilievo.

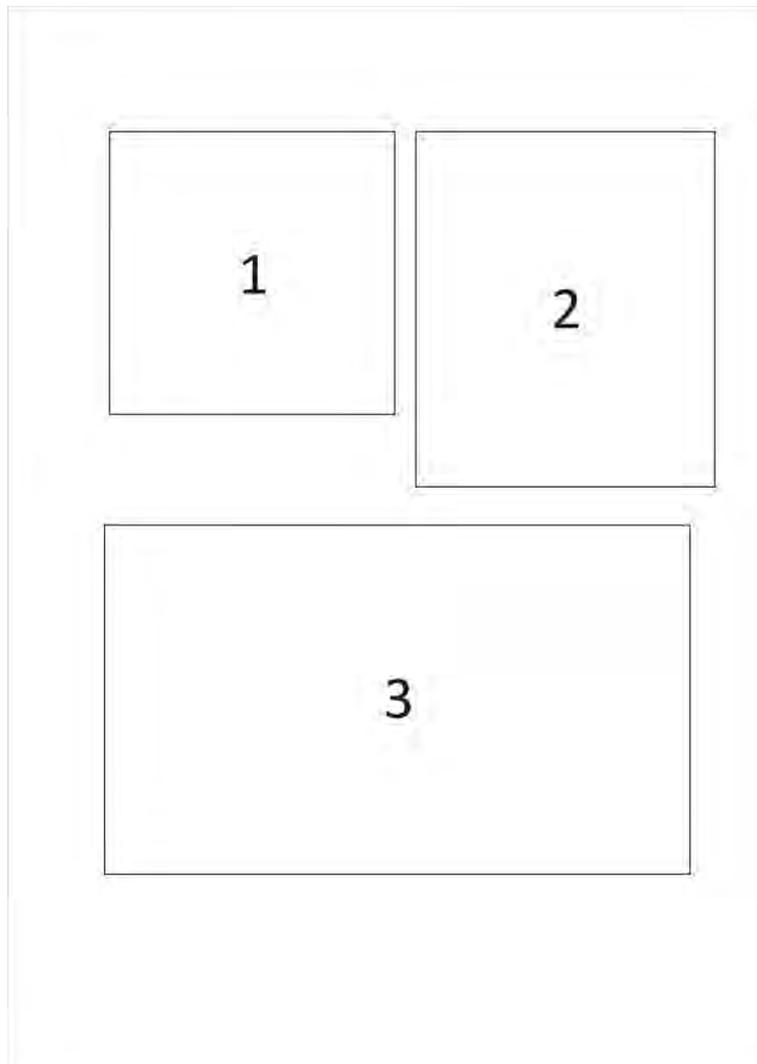
Sul litorale, continua la tendenza, già manifestatasi con il precedente rilievo, ad una diminuzione della subsidenza: Si notano abbassamenti di pochi mm/anno su tutto il litorale ferrarese; il litorale ravennate presenta abbassamenti generalmente fino a circa 5 mm/anno, fatta eccezione per un'area di depressione che interessa il paraggio costiero da Lido Adriano fino alla Bocca del T. Bevano, con un massimo di oltre 15 mm/anno in corrispondenza della foce dei Fiumi Uniti ed un'estensione massima verso l'entroterra di circa 5 km: anche

quest'area storicamente subsidente presenta una tendenza alla riduzione del fenomeno. Più a sud, gli abbassamenti si riducono a circa 2-3 mm/anno lungo tutto il litorale fino a Cattolica.

Il litorale nella sua interezza presenta un abbassamento medio, relativamente ad una fascia di 5 km verso l'entroterra, di circa 3 mm/anno, in ulteriore riduzione rispetto al periodo precedente.

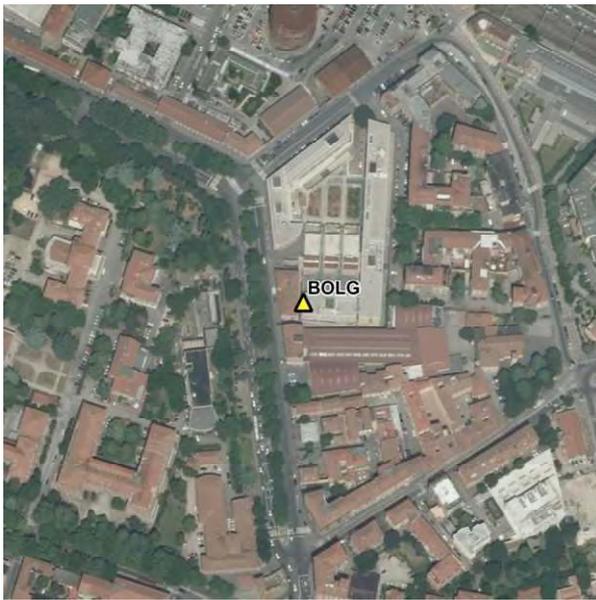
## **Appendice I - Monografie delle stazioni GPS**

## Guida grafica di lettura della monografia

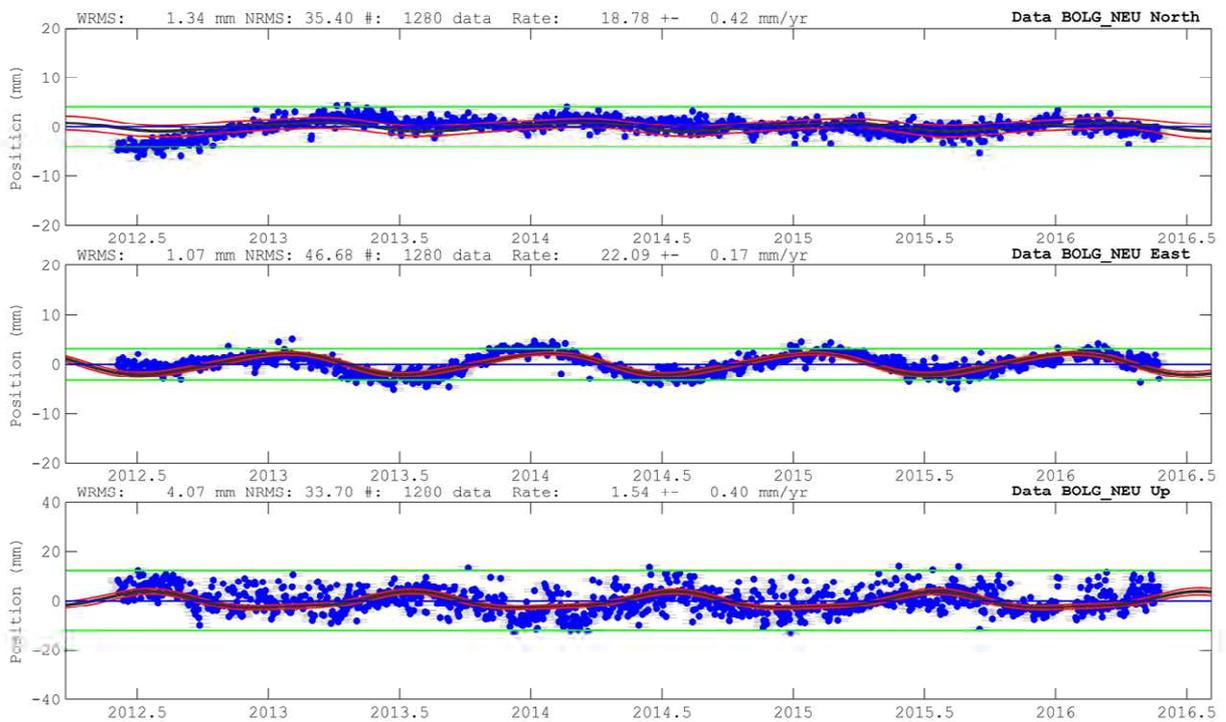


*1) Ubicazione della stazione (triangolo giallo). Nel caso l'immagine ricomprenda due stazioni vicine, la comprimaria è indicata da un triangolo vuoto; 2) Velocità stimate nelle tre direzioni Nord, Est, Up e componenti annuali e semi-annuali ottenute mediante l'analisi con il software Tsview (Herring, 2003); 3) Grafico dei residui detrended delle componenti Nord, Est, Up*

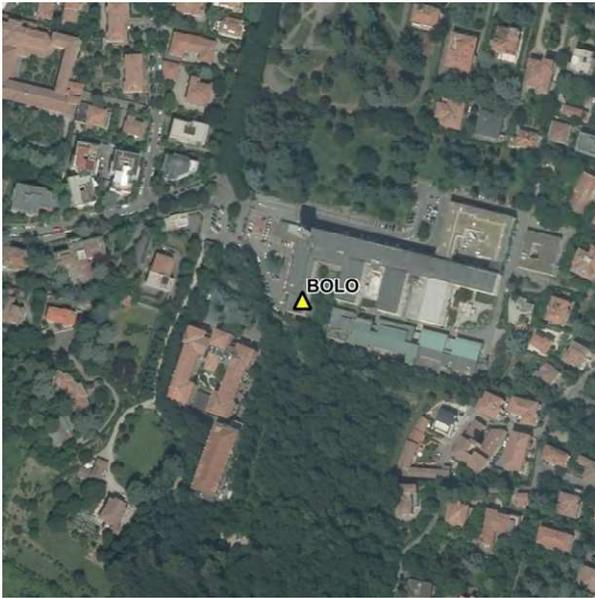
# MONOGRAFIA 1 - BOLG



<b>Detrend of BOLG_NEU North</b>	
WRMS: 1.34 mm NRMS: 35.40 #: 1280 data	
Mean	70.48 +- 0.46 mm
<b>Rate</b>	<b>18.78 +- 0.42 mm/yr</b>
Annual Cos	0.53 +- 0.66 mm
Annual Sin	0.59 +- 0.64 mm
SemiAnnual Cos	-0.15 +- 0.65 mm
SemiAnnual Sin	-0.10 +- 0.65 mm
<b>Detrend of BOLG_NEU East</b>	
WRMS: 1.07 mm NRMS: 46.68 #: 1280 data	
Mean	74.22 +- 0.20 mm
<b>Rate</b>	<b>22.09 +- 0.17 mm/yr</b>
Annual Cos	2.03 +- 0.29 mm
Annual Sin	0.54 +- 0.28 mm
SemiAnnual Cos	-0.12 +- 0.27 mm
SemiAnnual Sin	0.21 +- 0.28 mm
<b>Detrend of BOLG_NEU Up</b>	
WRMS: 4.07 mm NRMS: 33.70 #: 1280 data	
Mean	-7.88 +- 0.44 mm
<b>Rate</b>	<b>1.54 +- 0.40 mm/yr</b>
Annual Cos	-3.06 +- 0.63 mm
Annual Sin	-0.62 +- 0.61 mm
SemiAnnual Cos	0.57 +- 0.62 mm
SemiAnnual Sin	0.58 +- 0.62 mm



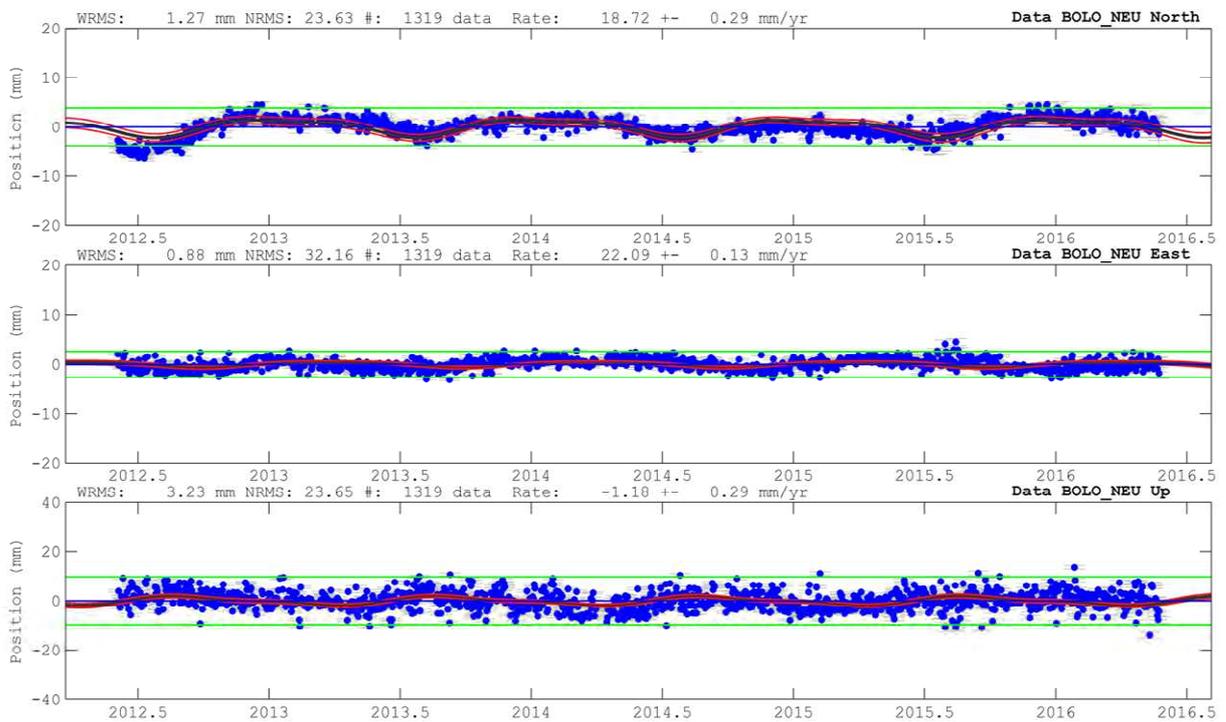
## MONOGRAFIA 2 – BOLO



Detrend of BOLO_NEU <b>North</b>	
WRMS:	1.27 mm NRMS: 23.63 #: 1319 data
Mean	71.84 +- 0.31 mm
<b>Rate</b>	<b>18.72 +- 0.29 mm/yr</b>
Annual Cos	1.57 +- 0.45 mm
Annual Sin	0.43 +- 0.45 mm
SemiAnnual Cos	-0.33 +- 0.44 mm
SemiAnnual Sin	-0.49 +- 0.44 mm

Detrend of BOLO_NEU <b>East</b>	
WRMS:	0.88 mm NRMS: 32.16 #: 1319 data
Mean	75.51 +- 0.14 mm
<b>Rate</b>	<b>22.09 +- 0.13 mm/yr</b>
Annual Cos	0.04 +- 0.20 mm
Annual Sin	0.52 +- 0.20 mm
SemiAnnual Cos	0.13 +- 0.19 mm
SemiAnnual Sin	-0.00 +- 0.20 mm

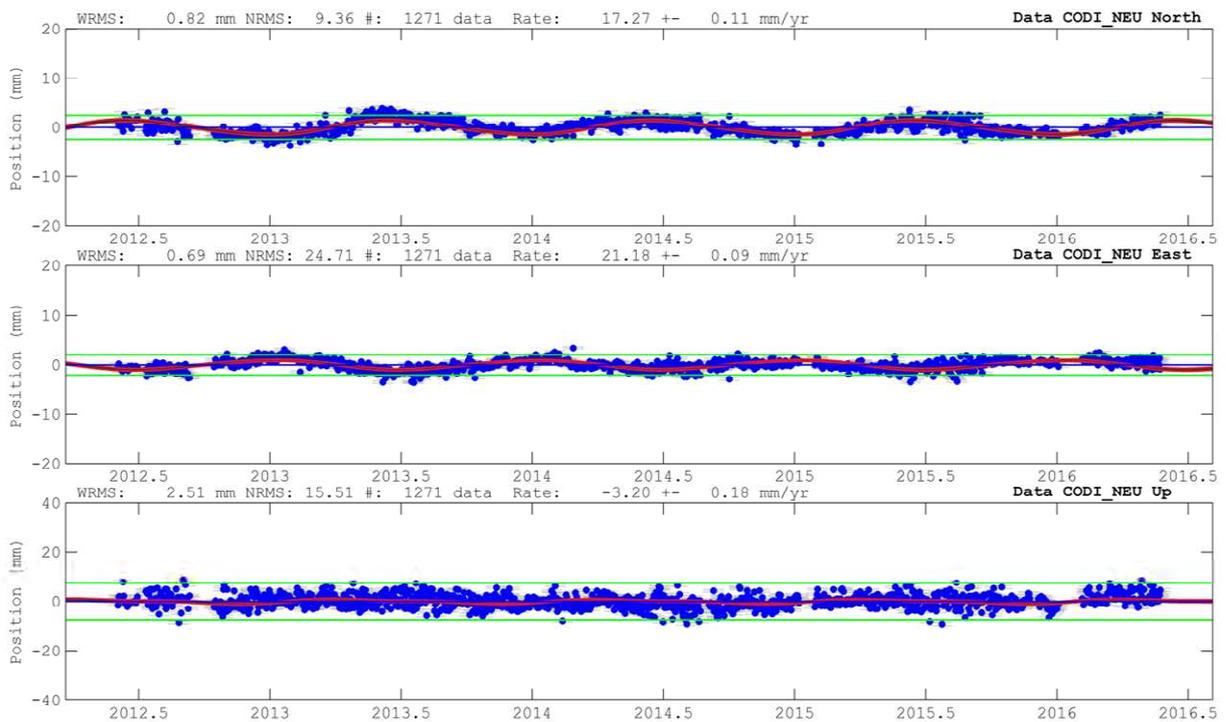
Detrend of BOLO_NEU <b>Up</b>	
WRMS:	3.23 mm NRMS: 23.65 #: 1319 data
Mean	2.29 +- 0.32 mm
<b>Rate</b>	<b>-1.18 +- 0.29 mm/yr</b>
Annual Cos	-0.50 +- 0.45 mm
Annual Sin	-1.52 +- 0.45 mm
SemiAnnual Cos	0.32 +- 0.44 mm
SemiAnnual Sin	0.56 +- 0.44 mm



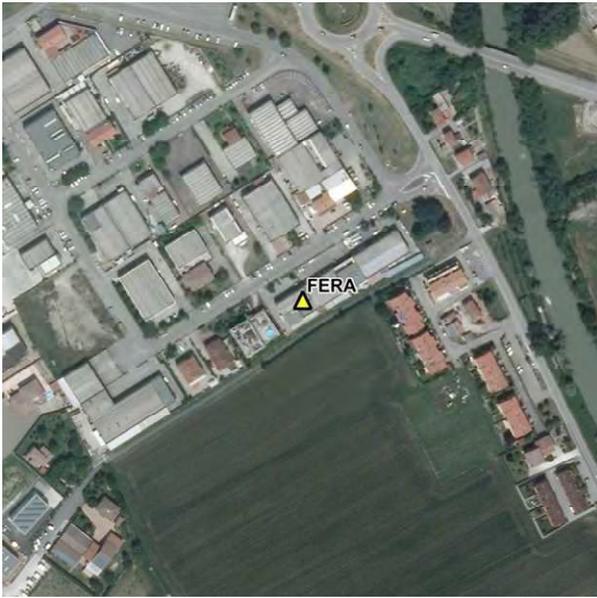
### MONOGRAFIA 3 - CODI



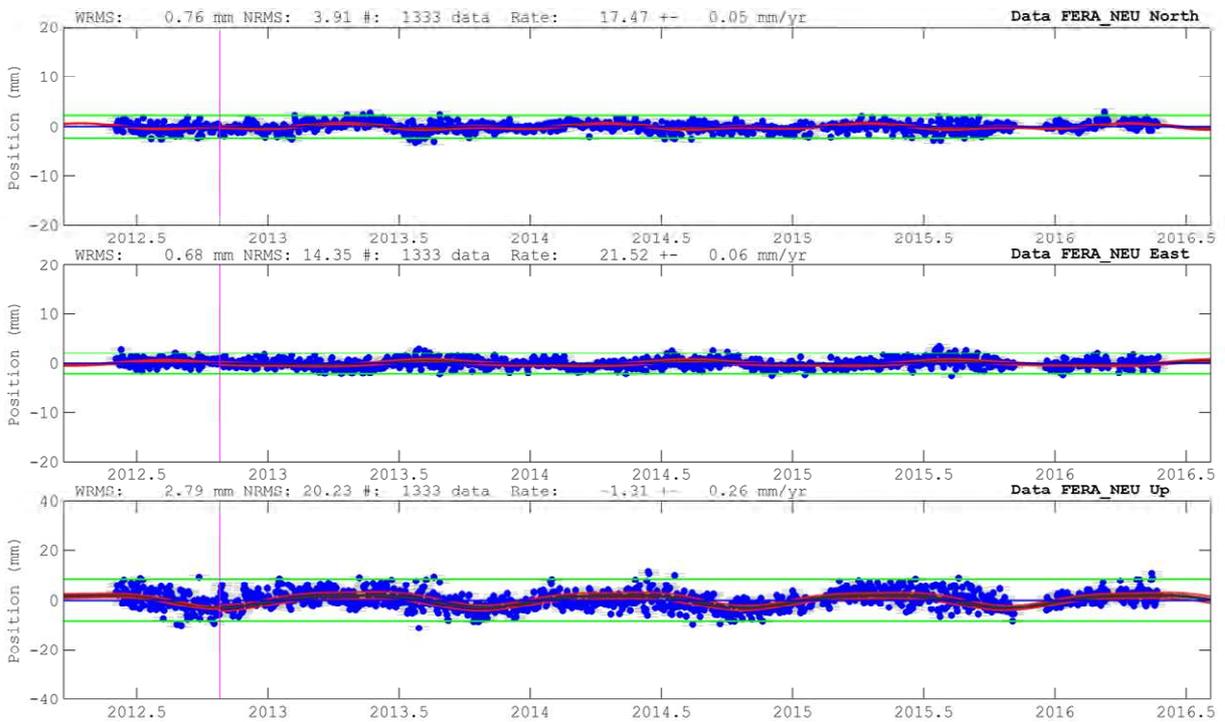
<b>Detrend of CODI_NEU North</b>	
WRMS: 0.82 mm NRMS: 9.36 #:	1271 data
Mean	58.99 +- 0.12 mm
<b>Rate</b>	<b>17.27 +- 0.11 mm/yr</b>
Annual Cos	-1.41 +- 0.17 mm
Annual Sin	0.26 +- 0.16 mm
SemiAnnual Cos	-0.00 +- 0.17 mm
SemiAnnual Sin	-0.13 +- 0.17 mm
<b>Detrend of CODI_NEU East</b>	
WRMS: 0.69 mm NRMS: 24.71 #:	1271 data
Mean	71.50 +- 0.10 mm
<b>Rate</b>	<b>21.18 +- 0.09 mm/yr</b>
Annual Cos	0.92 +- 0.15 mm
Annual Sin	0.04 +- 0.14 mm
SemiAnnual Cos	-0.05 +- 0.14 mm
SemiAnnual Sin	0.06 +- 0.14 mm
<b>Detrend of CODI_NEU Up</b>	
WRMS: 2.51 mm NRMS: 15.51 #:	1271 data
Mean	-14.66 +- 0.20 mm
<b>Rate</b>	<b>-3.20 +- 0.18 mm/yr</b>
Annual Cos	-0.34 +- 0.28 mm
Annual Sin	0.62 +- 0.27 mm
SemiAnnual Cos	-0.17 +- 0.28 mm
SemiAnnual Sin	0.28 +- 0.28 mm



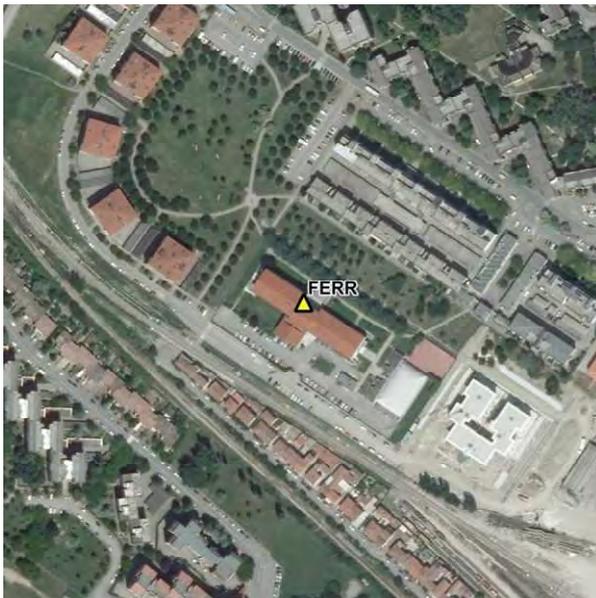
# MONOGRAFIA 4 - FERA



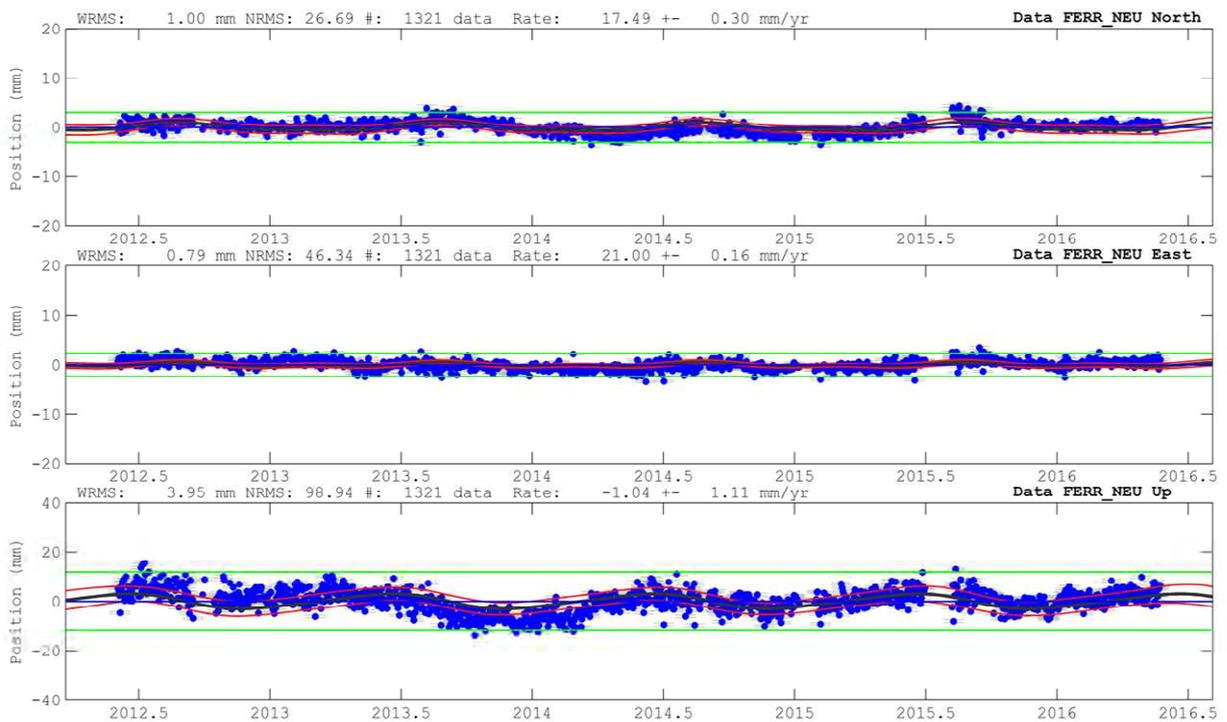
<b>Detrend of FERA_NEU North</b>	
WRMS: 0.76 mm NRMS: 3.91 #: 1333 data	
Mean	55.51 +- 0.19 mm
<b>Rate</b>	<b>17.47 +- 0.05 mm/yr</b>
Annual Cos	-0.04 +- 0.07 mm
Annual Sin	0.39 +- 0.07 mm
SemiAnnual Cos	-0.27 +- 0.07 mm
SemiAnnual Sin	-0.15 +- 0.07 mm
Break 2012 10 25	1 1
<b>Detrend of FERA_NEU East</b>	
WRMS: 0.68 mm NRMS: 14.35 #: 1333 data	
Mean	73.55 +- 0.23 mm
<b>Rate</b>	<b>21.52 +- 0.06 mm/yr</b>
Annual Cos	-0.29 +- 0.09 mm
Annual Sin	-0.28 +- 0.09 mm
SemiAnnual Cos	0.05 +- 0.08 mm
SemiAnnual Sin	0.12 +- 0.09 mm
Break 2012 10 25	1 1
<b>Detrend of FERA_NEU Up</b>	
WRMS: 2.79 mm NRMS: 20.23 #: 1333 data	
Mean	-12.25 +- 0.98 mm
<b>Rate</b>	<b>-1.31 +- 0.26 mm/yr</b>
Annual Cos	-1.10 +- 0.38 mm
Annual Sin	2.15 +- 0.37 mm
SemiAnnual Cos	0.43 +- 0.35 mm
SemiAnnual Sin	0.40 +- 0.37 mm
Break 2012 10 25	1 1



# MONOGRAFIA 5 - FERR



<b>Detrend of FERR_NEU North</b>	
WRMS: 1.00 mm NRMS: 26.69 #: 1321 data	
Mean	62.30 +- 0.33 mm
<b>Rate</b>	<b>17.49 +- 0.30 mm/yr</b>
Annual Cos	-0.40 +- 0.49 mm
Annual Sin	-0.62 +- 0.47 mm
SemiAnnual Cos	-0.04 +- 0.47 mm
SemiAnnual Sin	0.27 +- 0.46 mm
<b>Detrend of FERR_NEU East</b>	
WRMS: 0.79 mm NRMS: 46.34 #: 1321 data	
Mean	74.48 +- 0.19 mm
<b>Rate</b>	<b>21.00 +- 0.16 mm/yr</b>
Annual Cos	-0.18 +- 0.27 mm
Annual Sin	-0.26 +- 0.26 mm
SemiAnnual Cos	-0.10 +- 0.25 mm
SemiAnnual Sin	0.21 +- 0.26 mm
<b>Detrend of FERR_NEU Up</b>	
WRMS: 3.95 mm NRMS: 98.94 #: 1321 data	
Mean	14.39 +- 1.23 mm
<b>Rate</b>	<b>-1.04 +- 1.11 mm/yr</b>
Annual Cos	-2.62 +- 1.80 mm
Annual Sin	1.21 +- 1.73 mm
SemiAnnual Cos	0.34 +- 1.75 mm
SemiAnnual Sin	0.26 +- 1.72 mm



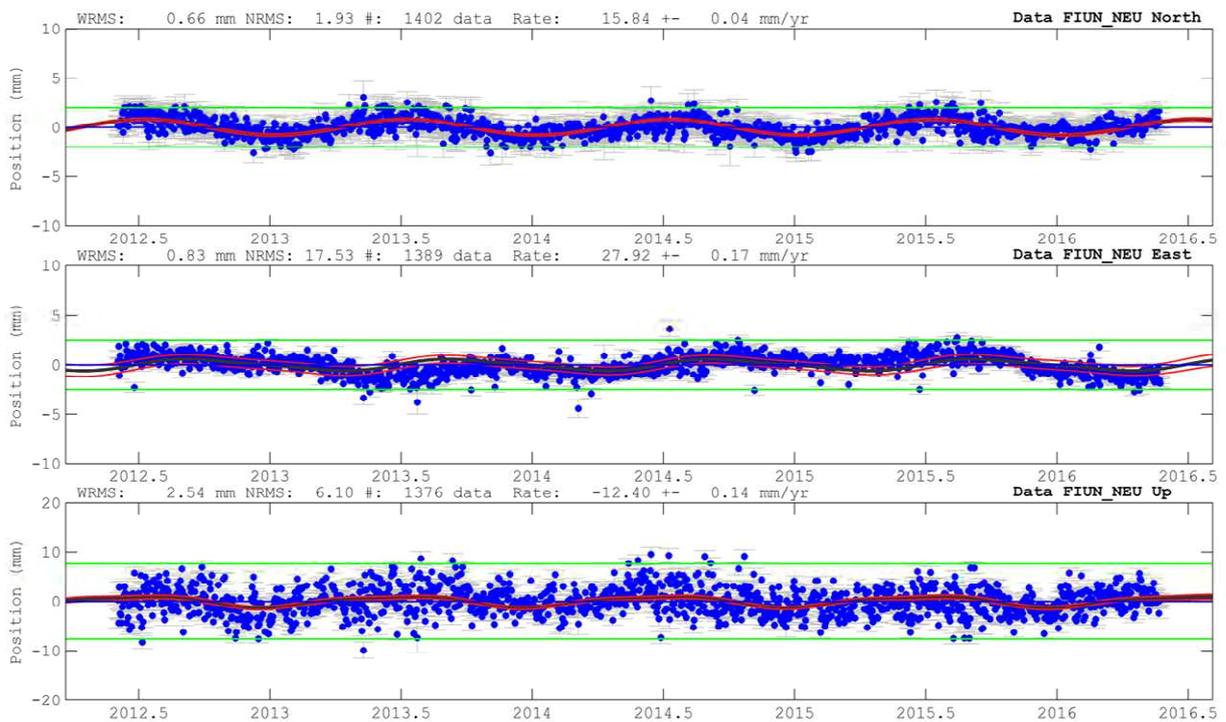
## MONOGRAFIA 6 - FIUN



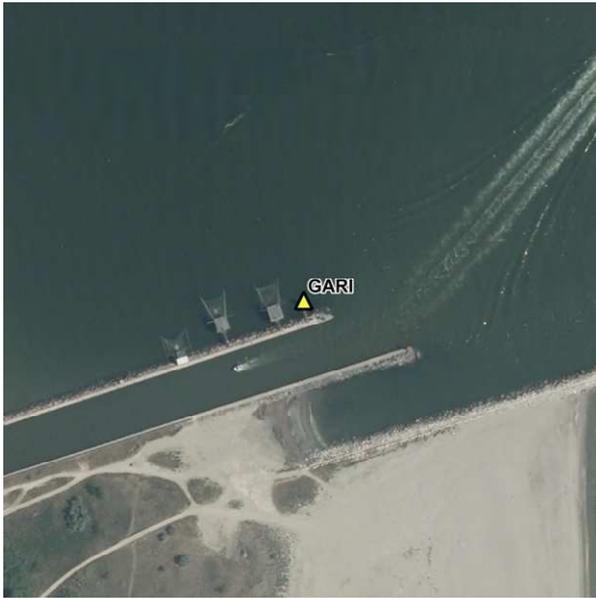
Detrend of FIUN_NEU <b>North</b>	
WRMS:	0.66 mm NRMS: 1.93 #: 1402 data
Mean	185.68 +- 0.05 mm
<b>Rate</b>	<b>15.84 +- 0.04 mm/yr</b>
Annual Cos	-0.80 +- 0.07 mm
Annual Sin	-0.10 +- 0.07 mm
SemiAnnual Cos	0.02 +- 0.07 mm
SemiAnnual Sin	0.01 +- 0.07 mm

Detrend of FIUN_NEU <b>East</b>	
WRMS:	0.83 mm NRMS: 17.53 #: 1389 data
Mean	357.98 +- 0.19 mm
<b>Rate</b>	<b>27.92 +- 0.17 mm/yr</b>
Annual Cos	-0.05 +- 0.28 mm
Annual Sin	-0.53 +- 0.27 mm
SemiAnnual Cos	0.03 +- 0.27 mm
SemiAnnual Sin	0.12 +- 0.27 mm

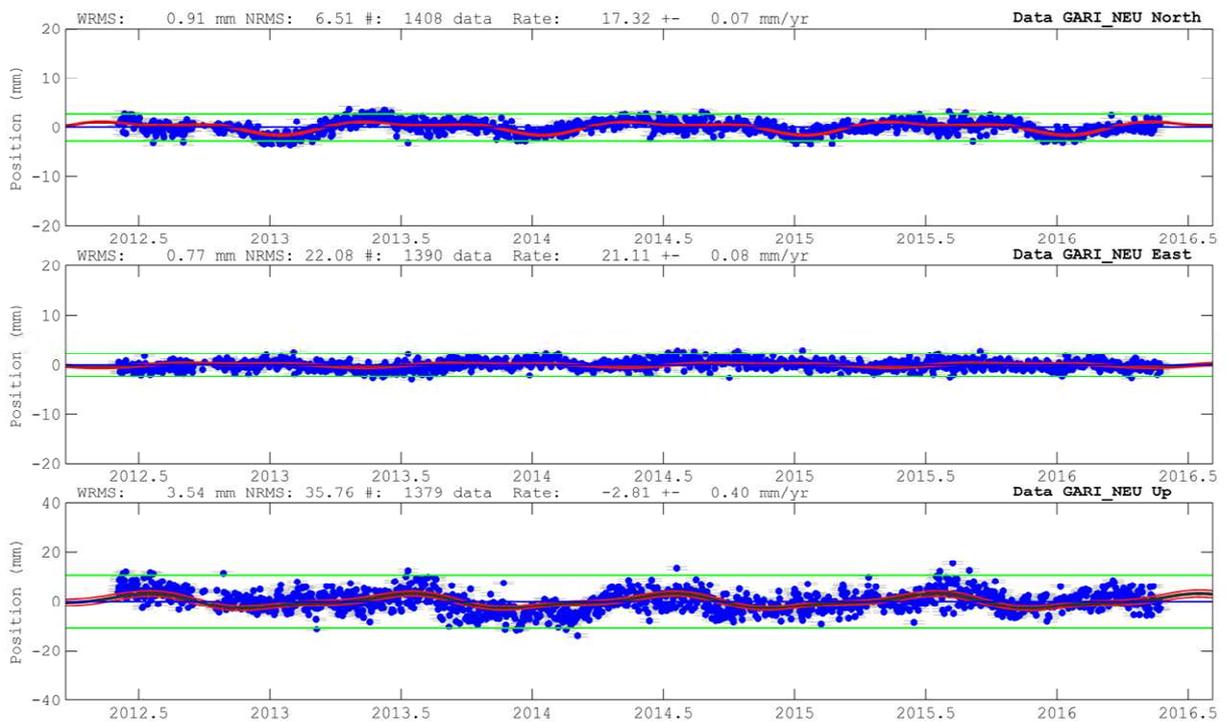
Detrend of FIUN_NEU <b>Up</b>	
WRMS:	2.54 mm NRMS: 6.10 #: 1376 data
Mean	-174.63 +- 0.16 mm
<b>Rate</b>	<b>-12.40 +- 0.14 mm/yr</b>
Annual Cos	-1.05 +- 0.23 mm
Annual Sin	0.12 +- 0.23 mm
SemiAnnual Cos	-0.22 +- 0.23 mm
SemiAnnual Sin	0.20 +- 0.23 mm



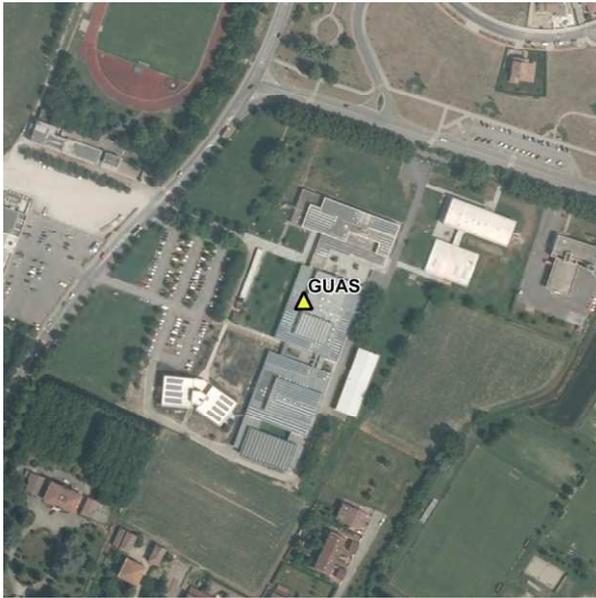
# MONOGRAFIA 7 - GARI



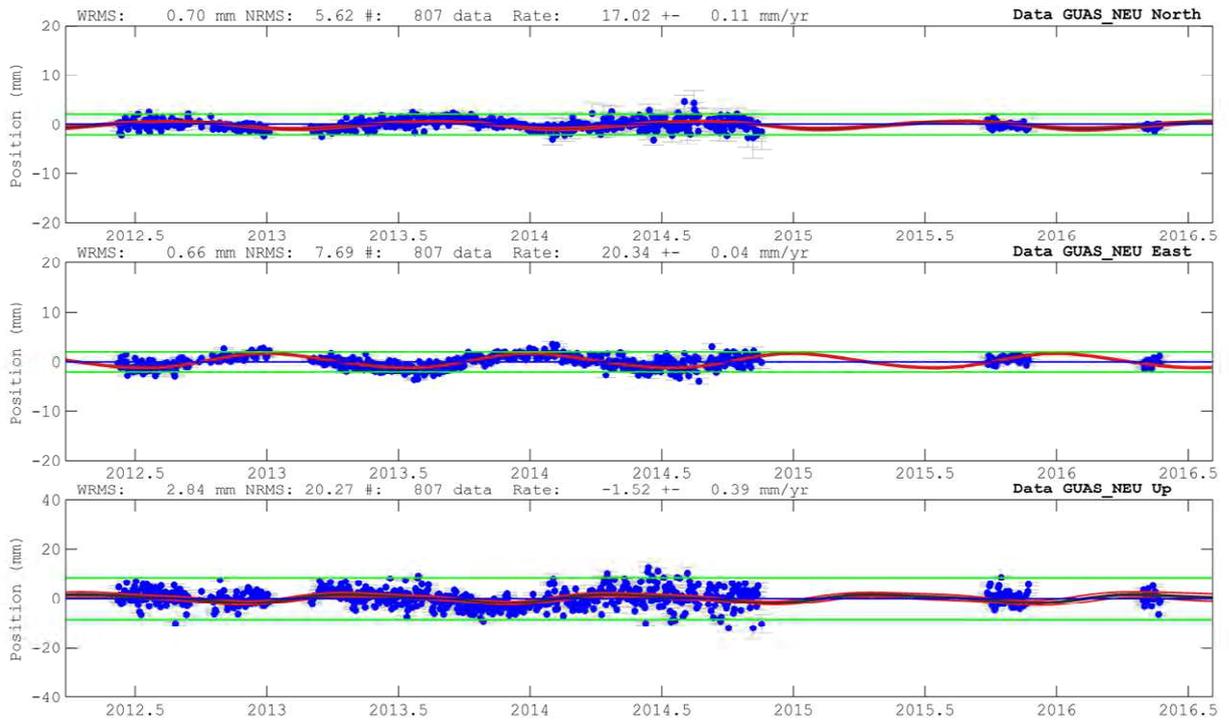
<b>Detrend of GARI_NEU North</b>	
WRMS: 0.91 mm NRMS: 6.51 #:	1408 data
Mean	59.15 +- 0.08 mm
<b>Rate</b>	<b>17.32 +- 0.07 mm/yr</b>
Annual Cos	-1.01 +- 0.11 mm
Annual Sin	-0.03 +- 0.11 mm
SemiAnnual Cos	-0.51 +- 0.11 mm
SemiAnnual Sin	-0.39 +- 0.11 mm
<b>Detrend of GARI_NEU East</b>	
WRMS: 0.77 mm NRMS: 22.08 #:	1390 data
Mean	75.08 +- 0.10 mm
<b>Rate</b>	<b>21.11 +- 0.08 mm/yr</b>
Annual Cos	0.15 +- 0.14 mm
Annual Sin	-0.25 +- 0.14 mm
SemiAnnual Cos	0.03 +- 0.13 mm
SemiAnnual Sin	0.15 +- 0.13 mm
<b>Detrend of GARI_NEU Up</b>	
WRMS: 3.54 mm NRMS: 35.76 #:	1379 data
Mean	-11.61 +- 0.44 mm
<b>Rate</b>	<b>-2.81 +- 0.40 mm/yr</b>
Annual Cos	-2.47 +- 0.64 mm
Annual Sin	0.20 +- 0.63 mm
SemiAnnual Cos	0.53 +- 0.63 mm
SemiAnnual Sin	0.80 +- 0.63 mm



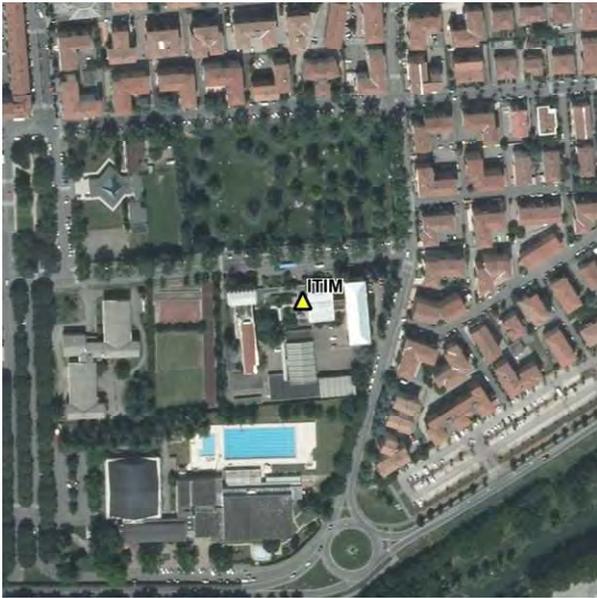
# MONOGRAFIA 8 - GUAS



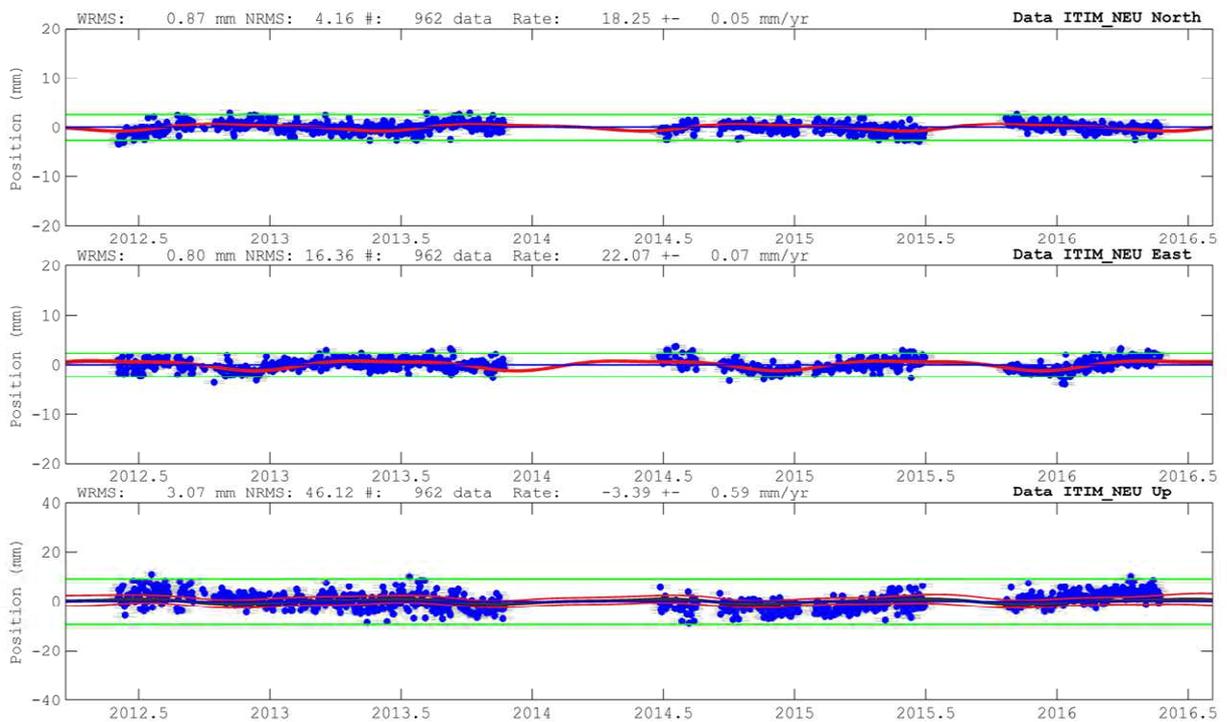
<b>Detrend of GUAS_NEU North</b>	
WRMS: 0.70 mm NRMS: 5.62 #: 807 data	
Mean	49.67 +- 0.11 mm
<b>Rate</b>	<b>17.02 +- 0.11 mm/yr</b>
Annual Cos	-0.57 +- 0.15 mm
Annual Sin	-0.55 +- 0.15 mm
SemiAnnual Cos	-0.06 +- 0.14 mm
SemiAnnual Sin	-0.00 +- 0.16 mm
<b>Detrend of GUAS_NEU East</b>	
WRMS: 0.66 mm NRMS: 7.69 #: 807 data	
Mean	60.00 +- 0.04 mm
<b>Rate</b>	<b>20.34 +- 0.04 mm/yr</b>
Annual Cos	1.38 +- 0.06 mm
Annual Sin	0.11 +- 0.06 mm
SemiAnnual Cos	0.07 +- 0.06 mm
SemiAnnual Sin	-0.08 +- 0.06 mm
<b>Detrend of GUAS_NEU Up</b>	
WRMS: 2.84 mm NRMS: 20.27 #: 807 data	
Mean	-8.71 +- 0.41 mm
<b>Rate</b>	<b>-1.52 +- 0.39 mm/yr</b>
Annual Cos	-1.11 +- 0.55 mm
Annual Sin	1.08 +- 0.55 mm
SemiAnnual Cos	-0.35 +- 0.52 mm
SemiAnnual Sin	0.21 +- 0.57 mm



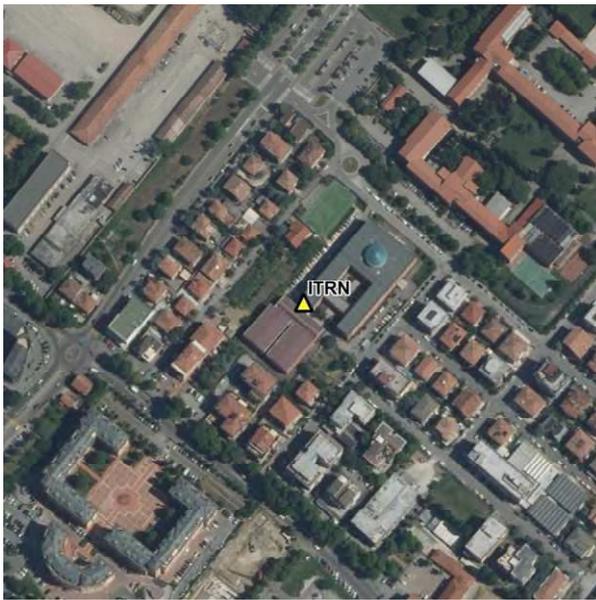
# MONOGRAFIA 9 - ITIM



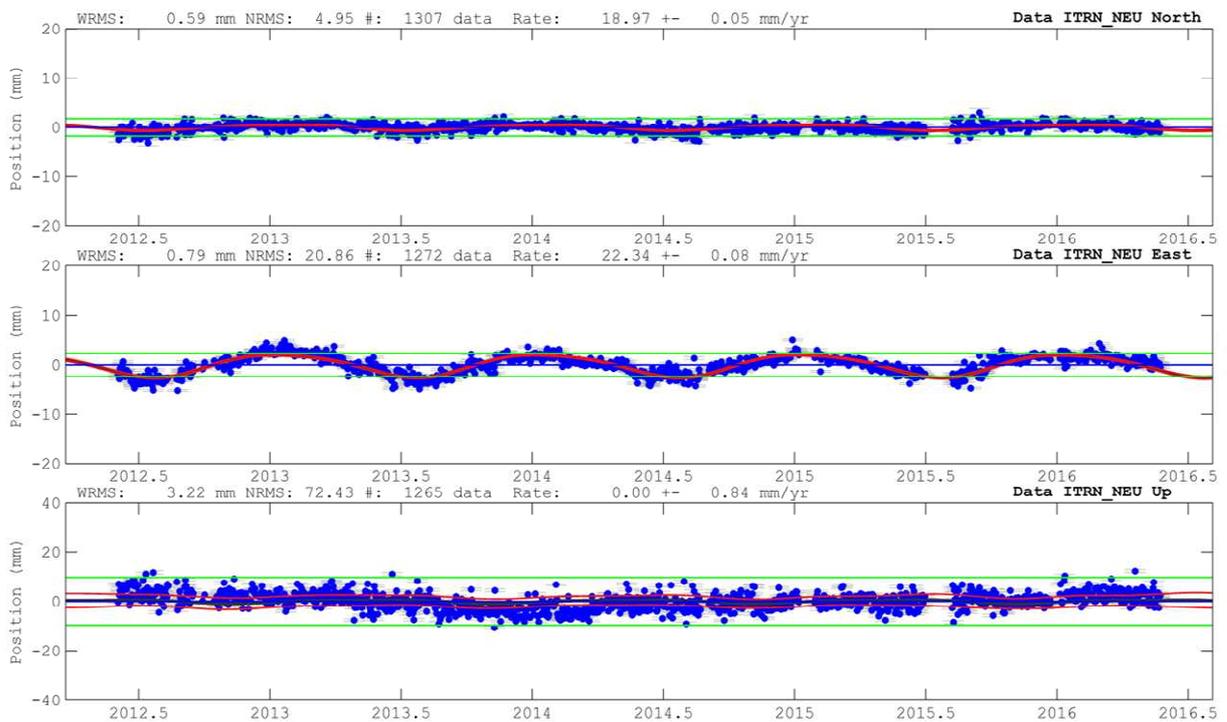
<b>Detrend of ITIM_NEU North</b>	
WRMS: 0.87 mm NRMS: 4.16 #:	962 data
Mean	62.76 +- 0.06 mm
<b>Rate</b>	<b>18.25 +- 0.05 mm/yr</b>
Annual Cos	0.43 +- 0.09 mm
Annual Sin	-0.46 +- 0.09 mm
SemiAnnual Cos	-0.20 +- 0.09 mm
SemiAnnual Sin	0.10 +- 0.09 mm
<b>Detrend of ITIM_NEU East</b>	
WRMS: 0.80 mm NRMS: 16.36 #:	962 data
Mean	69.18 +- 0.08 mm
<b>Rate</b>	<b>22.07 +- 0.07 mm/yr</b>
Annual Cos	-0.81 +- 0.12 mm
Annual Sin	0.40 +- 0.11 mm
SemiAnnual Cos	-0.24 +- 0.10 mm
SemiAnnual Sin	0.17 +- 0.11 mm
<b>Detrend of ITIM_NEU Up</b>	
WRMS: 3.07 mm NRMS: 46.12 #:	962 data
Mean	-0.70 +- 0.69 mm
<b>Rate</b>	<b>-3.39 +- 0.59 mm/yr</b>
Annual Cos	-0.77 +- 1.01 mm
Annual Sin	0.42 +- 1.02 mm
SemiAnnual Cos	0.19 +- 0.95 mm
SemiAnnual Sin	0.27 +- 0.97 mm



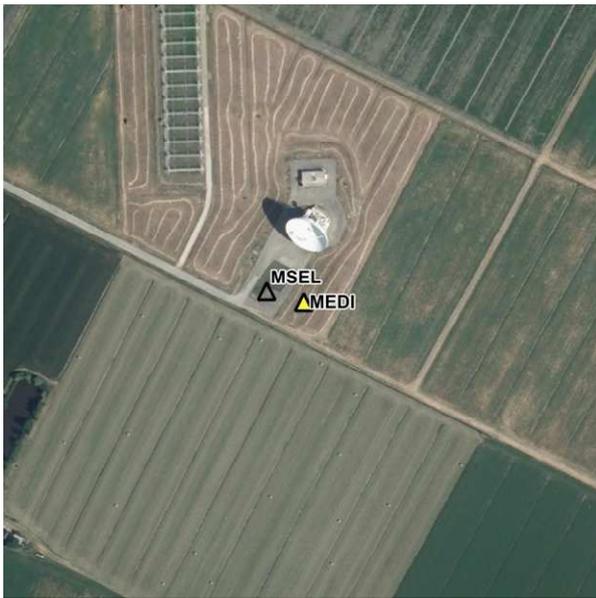
# MONOGRAFIA 10 - ITRN



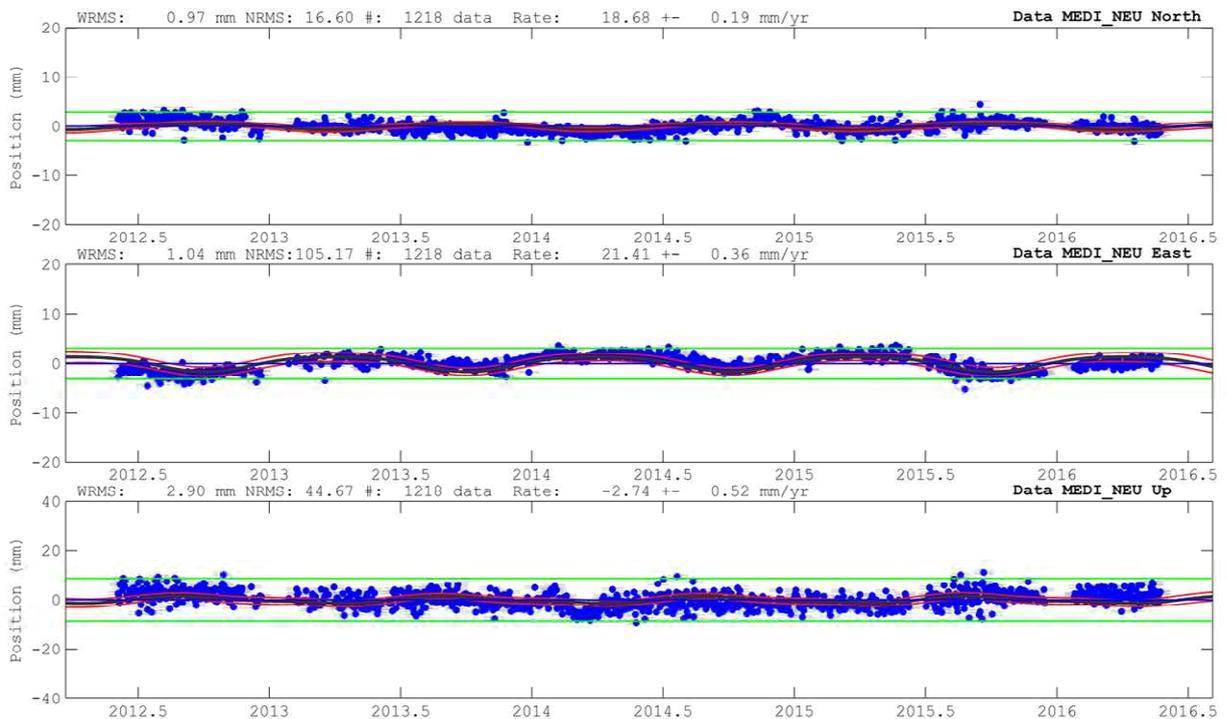
<b>Detrend of ITRN_NEU North</b>	
WRMS: 0.59 mm NRMS: 4.95 #: 1307 data	
Mean	62.37 +- 0.06 mm
<b>Rate</b>	<b>18.97 +- 0.05 mm/yr</b>
Annual Cos	0.52 +- 0.09 mm
Annual Sin	0.16 +- 0.08 mm
SemiAnnual Cos	-0.12 +- 0.08 mm
SemiAnnual Sin	0.01 +- 0.09 mm
<b>Detrend of ITRN_NEU East</b>	
WRMS: 0.79 mm NRMS: 20.86 #: 1272 data	
Mean	74.25 +- 0.10 mm
<b>Rate</b>	<b>22.34 +- 0.08 mm/yr</b>
Annual Cos	2.18 +- 0.14 mm
Annual Sin	0.67 +- 0.13 mm
SemiAnnual Cos	-0.14 +- 0.13 mm
SemiAnnual Sin	-0.28 +- 0.13 mm
<b>Detrend of ITRN_NEU Up</b>	
WRMS: 3.22 mm NRMS: 72.43 #: 1265 data	
Mean	-1.70 +- 0.93 mm
<b>Rate</b>	<b>0.00 +- 0.84 mm/yr</b>
Annual Cos	-0.46 +- 1.35 mm
Annual Sin	0.50 +- 1.29 mm
SemiAnnual Cos	0.13 +- 1.32 mm
SemiAnnual Sin	0.23 +- 1.30 mm



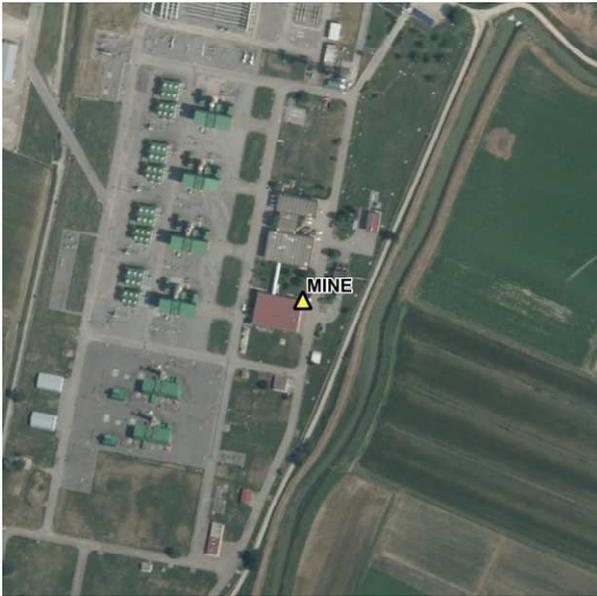
# MONOGRAFIA 11 - MEDI



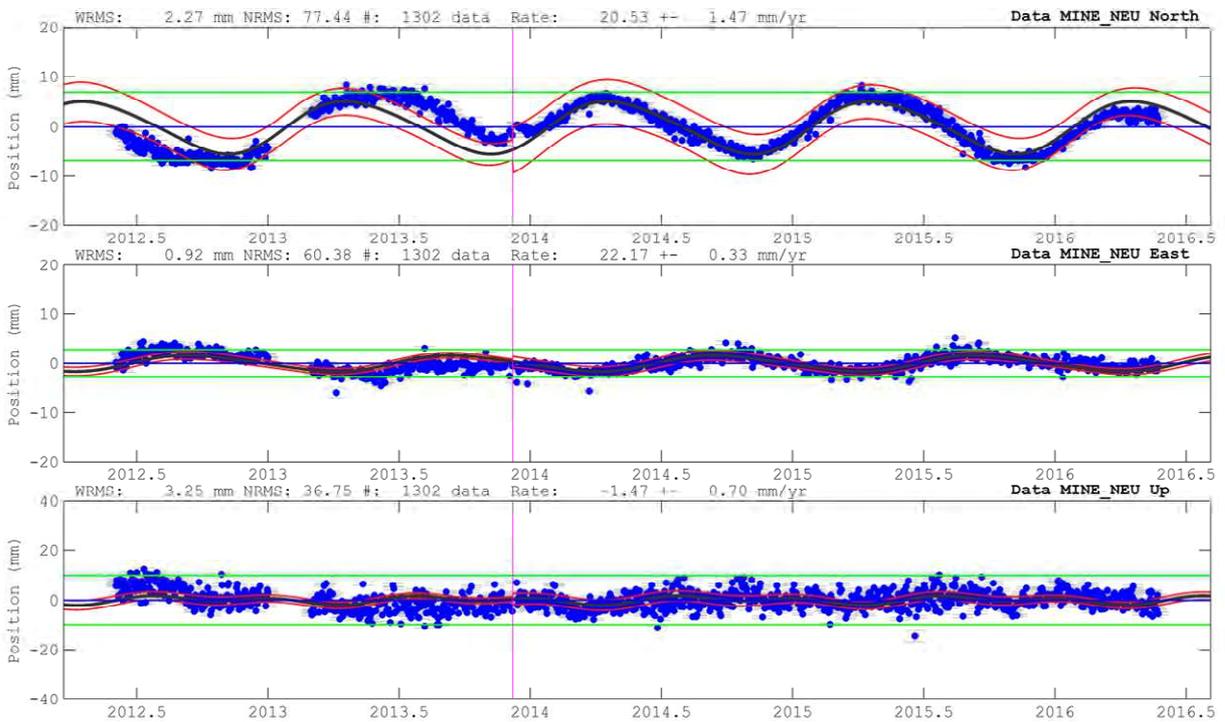
<b>Detrend of MEDI_NEU North</b>	
WRMS:	0.97 mm NRMS: 16.60 #: 1218 data
Mean	62.21 +- 0.20 mm
<b>Rate</b>	<b>18.68 +- 0.19 mm/yr</b>
Annual Cos	-0.04 +- 0.31 mm
Annual Sin	-0.64 +- 0.28 mm
SemiAnnual Cos	0.03 +- 0.30 mm
SemiAnnual Sin	-0.04 +- 0.28 mm
<b>Detrend of MEDI_NEU East</b>	
WRMS:	1.04 mm NRMS:105.17 #: 1218 data
Mean	75.67 +- 0.37 mm
<b>Rate</b>	<b>21.41 +- 0.36 mm/yr</b>
Annual Cos	-0.03 +- 0.57 mm
Annual Sin	1.47 +- 0.49 mm
SemiAnnual Cos	0.25 +- 0.53 mm
SemiAnnual Sin	0.02 +- 0.51 mm
<b>Detrend of MEDI_NEU Up</b>	
WRMS:	2.90 mm NRMS: 44.67 #: 1218 data
Mean	-6.66 +- 0.55 mm
<b>Rate</b>	<b>-2.74 +- 0.52 mm/yr</b>
Annual Cos	-0.42 +- 0.83 mm
Annual Sin	-1.16 +- 0.75 mm
SemiAnnual Cos	0.05 +- 0.80 mm
SemiAnnual Sin	0.43 +- 0.76 mm



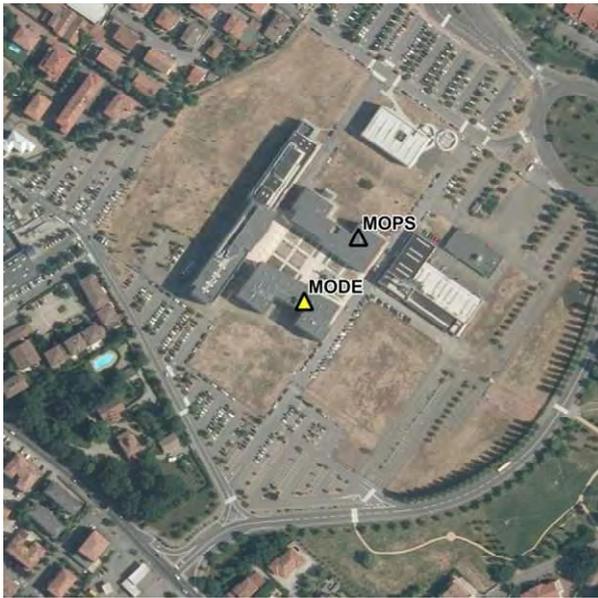
# MONOGRAFIA 12 - MINE



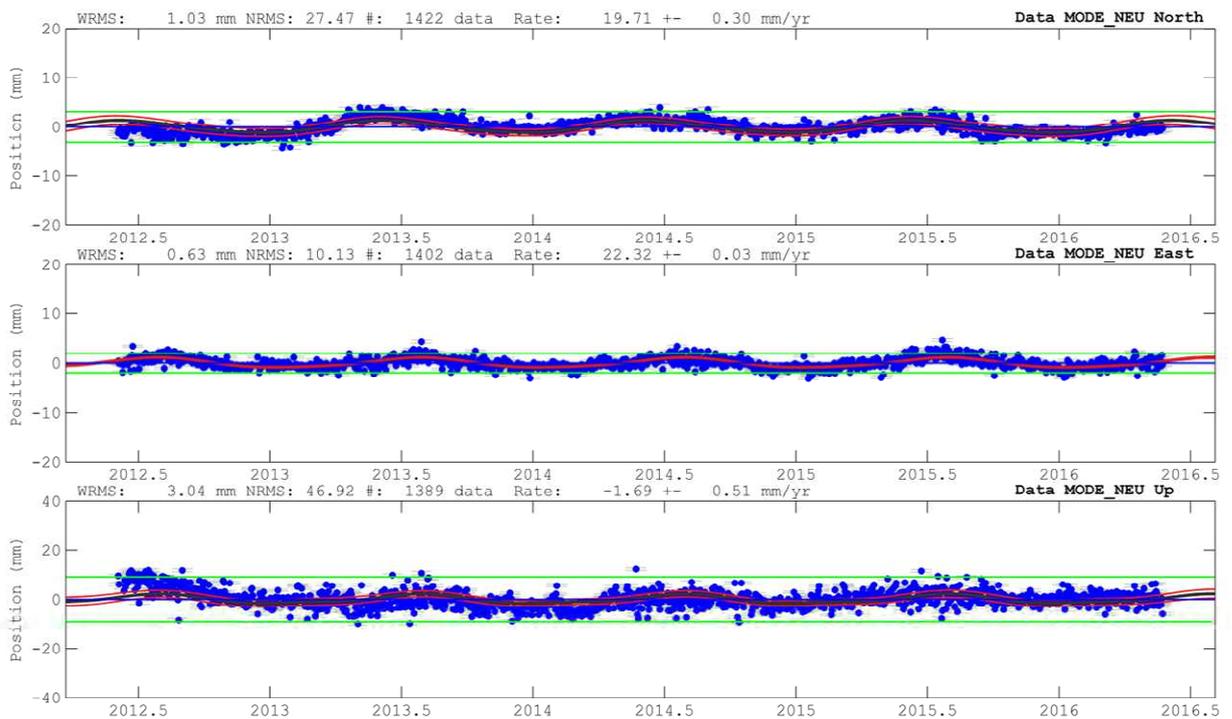
Detrend of MINE_NEU <b>North</b>	
WRMS: 2.27 mm NRMS: 77.44 #: 1302 data	
Mean	78.12 +- 2.64 mm
<b>Rate</b>	<b>20.53 +- 1.47 mm/yr</b>
Annual Cos	-2.32 +- 1.41 mm
Annual Sin	4.61 +- 1.35 mm
SemiAnnual Cos	-0.28 +- 1.34 mm
SemiAnnual Sin	0.47 +- 1.35 mm
Break 2013 12	8 20 56 -2.23 +-
Detrend of MINE_NEU <b>East</b>	
WRMS: 0.92 mm NRMS: 60.38 #: 1302 data	
Mean	76.44 +- 0.60 mm
<b>Rate</b>	<b>22.17 +- 0.33 mm/yr</b>
Annual Cos	-0.22 +- 0.35 mm
Annual Sin	-1.56 +- 0.31 mm
SemiAnnual Cos	0.06 +- 0.31 mm
SemiAnnual Sin	0.18 +- 0.31 mm
Break 2013 12	8 20 56 1.50 +-
Detrend of MINE_NEU <b>Up</b>	
WRMS: 3.25 mm NRMS: 36.75 #: 1302 data	
Mean	-9.87 +- 1.25 mm
<b>Rate</b>	<b>-1.47 +- 0.70 mm/yr</b>
Annual Cos	-0.32 +- 0.67 mm
Annual Sin	-0.96 +- 0.64 mm
SemiAnnual Cos	0.99 +- 0.64 mm
SemiAnnual Sin	0.48 +- 0.64 mm
Break 2013 12	8 20 56 -15.74 +-



# MONOGRAFIA 13 - MODE



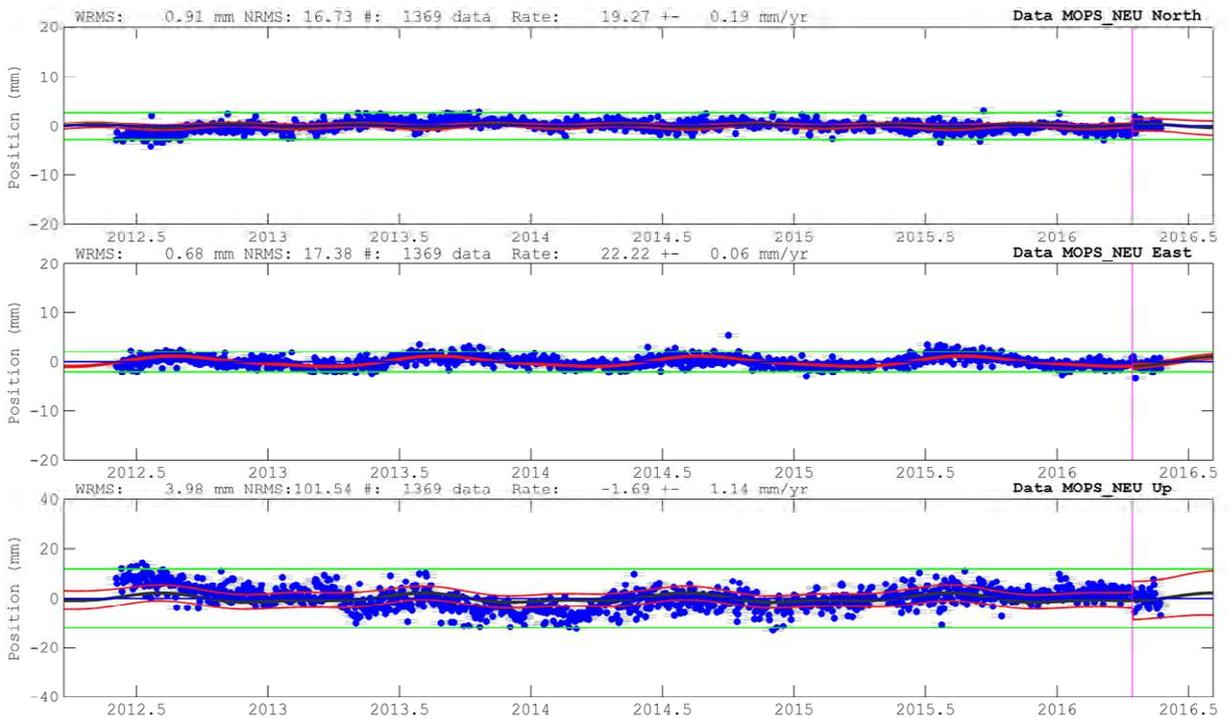
Detrend of MODE_NEU <b>North</b>	
WRMS: 1.03 mm NRMS: 27.47 #:	1422 data
Mean	83.03 +- 0.33 mm
<b>Rate</b>	<b>19.71 +- 0.30 mm/yr</b>
Annual Cos	-1.16 +- 0.48 mm
Annual Sin	0.42 +- 0.47 mm
SemiAnnual Cos	0.02 +- 0.47 mm
SemiAnnual Sin	-0.15 +- 0.47 mm
Detrend of MODE_NEU <b>East</b>	
WRMS: 0.63 mm NRMS: 10.13 #:	1402 data
Mean	85.20 +- 0.04 mm
<b>Rate</b>	<b>22.32 +- 0.03 mm/yr</b>
Annual Cos	-0.87 +- 0.06 mm
Annual Sin	-0.36 +- 0.05 mm
SemiAnnual Cos	0.05 +- 0.05 mm
SemiAnnual Sin	0.15 +- 0.05 mm
Detrend of MODE_NEU <b>Up</b>	
WRMS: 3.04 mm NRMS: 46.92 #:	1389 data
Mean	-11.38 +- 0.58 mm
<b>Rate</b>	<b>-1.69 +- 0.51 mm/yr</b>
Annual Cos	-1.65 +- 0.84 mm
Annual Sin	-0.63 +- 0.81 mm
SemiAnnual Cos	0.15 +- 0.81 mm
SemiAnnual Sin	0.50 +- 0.81 mm



# MONOGRAFIA 14 - MOPS



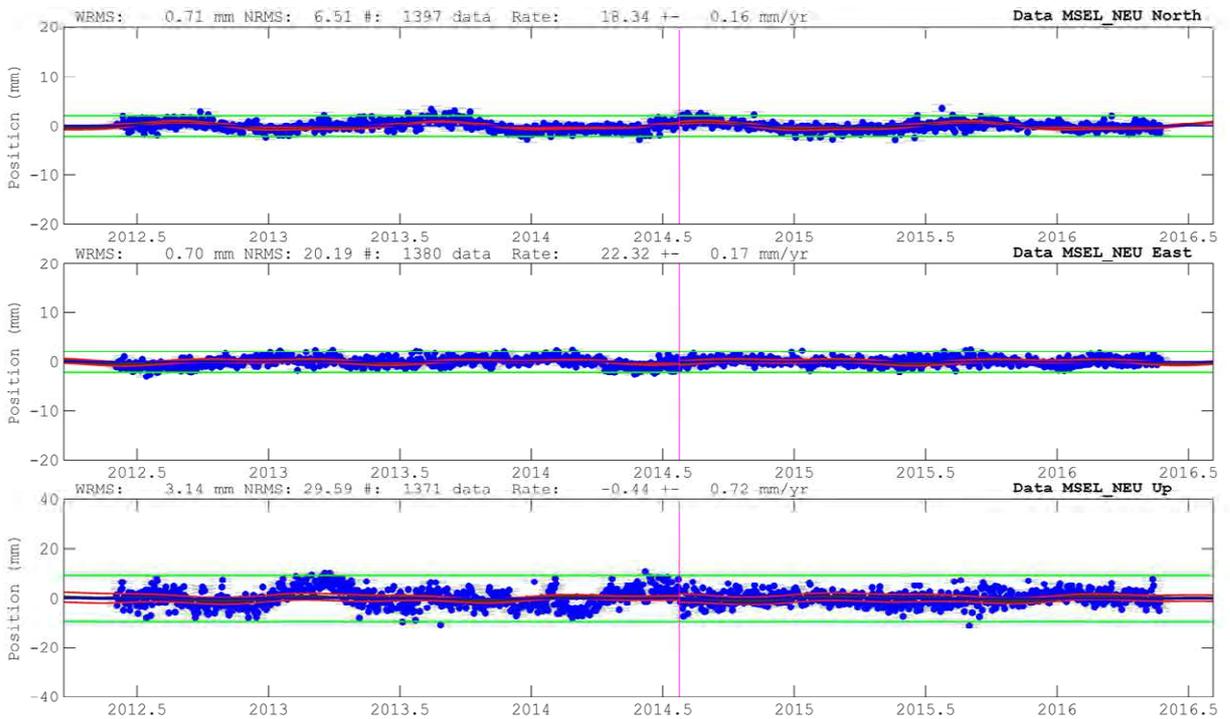
<b>Detrend of MOPS_NEU North</b>	
WRMS: 0.91 mm NRMS: 16.73 #: 1369 data	
Mean	78.09 +- 0.21 mm
<b>Rate</b>	<b>19.27 +- 0.19 mm/yr</b>
Annual Cos	0.07 +- 0.30 mm
Annual Sin	0.00 +- 0.29 mm
SemiAnnual Cos	-0.08 +- 0.29 mm
SemiAnnual Sin	-0.30 +- 0.30 mm
Break 2016	4 14 13 22 1.98 +-
<b>Detrend of MOPS_NEU East</b>	
WRMS: 0.68 mm NRMS: 17.38 #: 1369 data	
Mean	79.93 +- 0.07 mm
<b>Rate</b>	<b>22.22 +- 0.06 mm/yr</b>
Annual Cos	-0.45 +- 0.10 mm
Annual Sin	-0.84 +- 0.09 mm
SemiAnnual Cos	0.06 +- 0.09 mm
SemiAnnual Sin	0.20 +- 0.10 mm
Break 2016	4 14 13 22 6.80 +-
<b>Detrend of MOPS_NEU Up</b>	
WRMS: 3.98 mm NRMS:101.54 #: 1369 data	
Mean	-25.90 +- 1.27 mm
<b>Rate</b>	<b>-1.69 +- 1.14 mm/yr</b>
Annual Cos	-1.34 +- 1.83 mm
Annual Sin	-0.56 +- 1.79 mm
SemiAnnual Cos	0.19 +- 1.73 mm
SemiAnnual Sin	0.75 +- 1.82 mm
Break 2016	4 14 13 22 13.58 +-



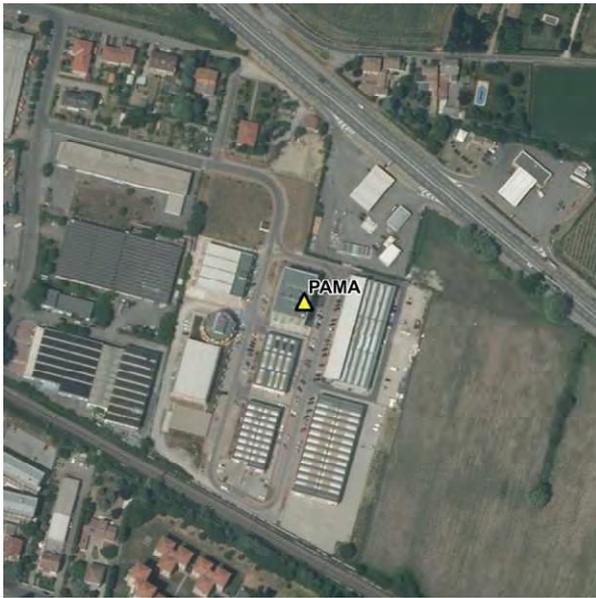
# MONOGRAFIA 15 - MSEL



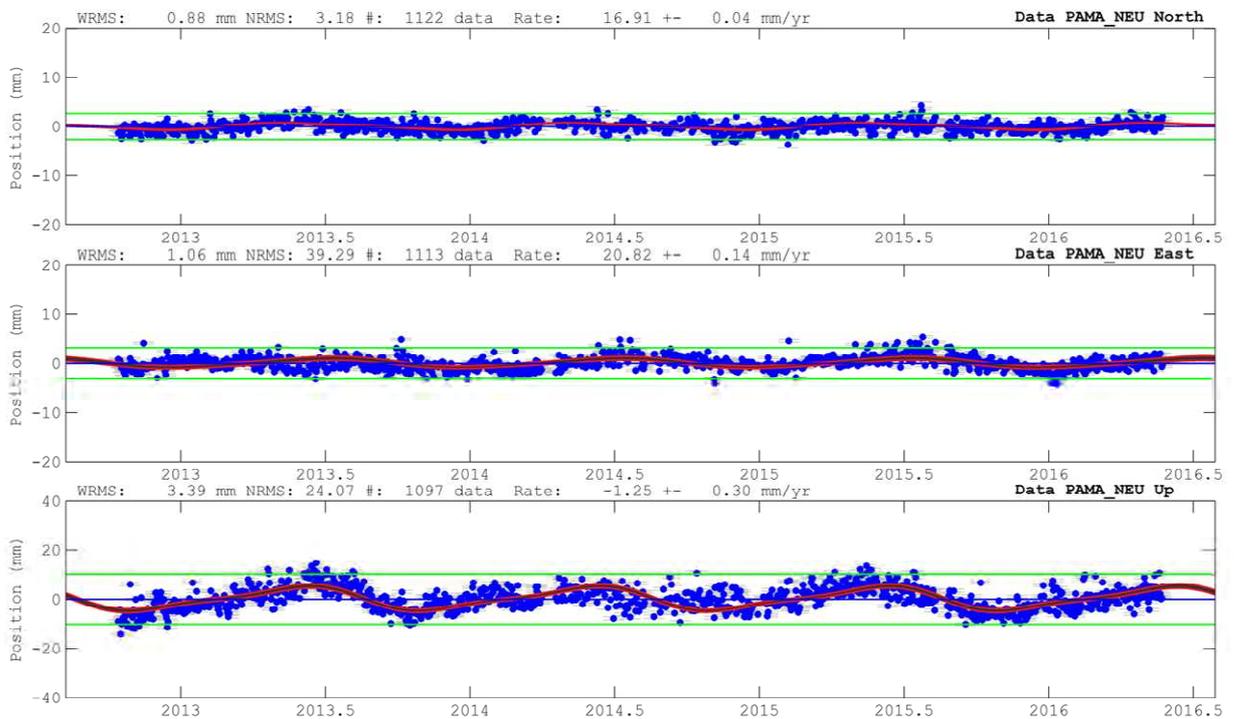
<b>Detrend of MSEL_NEU North</b>	
WRMS: 0.71 mm NRMS: 6.51 #:	1397 data
Mean	62.57 +- 0.19 mm
<b>Rate</b>	<b>18.34 +- 0.16 mm/yr</b>
Annual Cos	-0.43 +- 0.12 mm
Annual Sin	-0.51 +- 0.13 mm
SemiAnnual Cos	-0.14 +- 0.12 mm
SemiAnnual Sin	0.19 +- 0.12 mm
Break 2014	7 25 12 29 2.39 +-
<b>Detrend of MSEL_NEU East</b>	
WRMS: 0.70 mm NRMS: 20.19 #:	1380 data
Mean	76.06 +- 0.22 mm
<b>Rate</b>	<b>22.32 +- 0.17 mm/yr</b>
Annual Cos	0.25 +- 0.14 mm
Annual Sin	-0.06 +- 0.14 mm
SemiAnnual Cos	-0.17 +- 0.13 mm
SemiAnnual Sin	0.09 +- 0.13 mm
Break 2014	7 25 12 29 -5.00 +-
<b>Detrend of MSEL_NEU Up</b>	
WRMS: 3.14 mm NRMS: 29.59 #:	1371 data
Mean	1.92 +- 0.87 mm
<b>Rate</b>	<b>-0.44 +- 0.72 mm/yr</b>
Annual Cos	-0.09 +- 0.56 mm
Annual Sin	0.58 +- 0.57 mm
SemiAnnual Cos	0.12 +- 0.54 mm
SemiAnnual Sin	0.36 +- 0.55 mm
Break 2014	7 25 12 29 74.97 +-



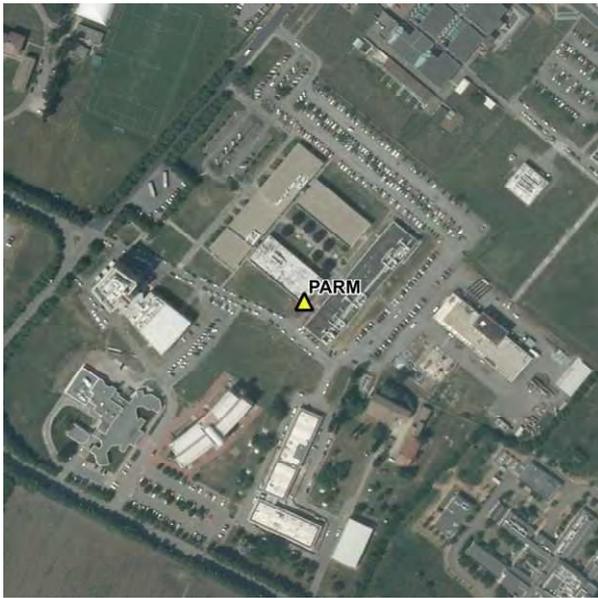
# MONOGRAFIA 16 - PAMA



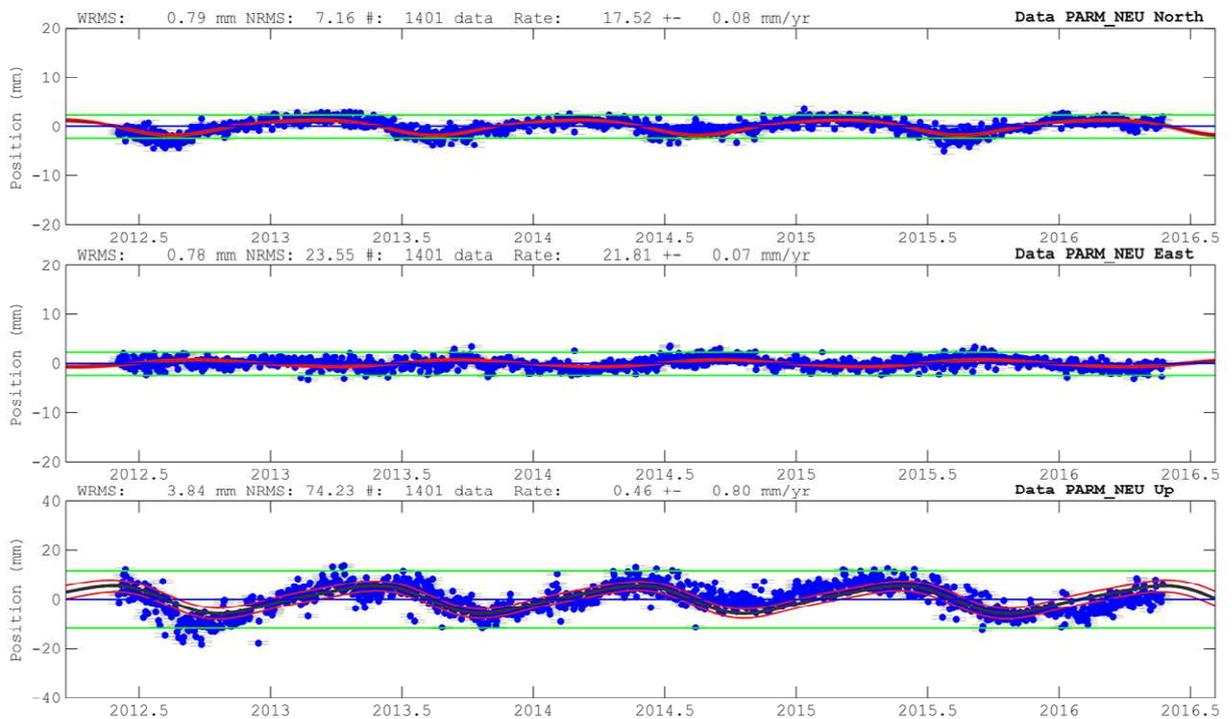
<b>Detrend of PAMA_NEU North</b>	
WRMS: 0.88 mm NRMS: 3.18 #: 1122 data	
Mean	32.44 +- 0.05 mm
<b>Rate</b>	<b>16.91 +- 0.04 mm/yr</b>
Annual Cos	-0.53 +- 0.07 mm
Annual Sin	0.36 +- 0.06 mm
SemiAnnual Cos	-0.17 +- 0.06 mm
SemiAnnual Sin	-0.03 +- 0.06 mm
<b>Detrend of PAMA_NEU East</b>	
WRMS: 1.06 mm NRMS: 39.29 #: 1113 data	
Mean	37.54 +- 0.18 mm
<b>Rate</b>	<b>20.82 +- 0.14 mm/yr</b>
Annual Cos	-0.87 +- 0.26 mm
Annual Sin	0.00 +- 0.24 mm
SemiAnnual Cos	0.03 +- 0.23 mm
SemiAnnual Sin	0.12 +- 0.23 mm
<b>Detrend of PAMA_NEU Up</b>	
WRMS: 3.39 mm NRMS: 24.07 #: 1097 data	
Mean	6.86 +- 0.35 mm
<b>Rate</b>	<b>-1.25 +- 0.30 mm/yr</b>
Annual Cos	-3.36 +- 0.50 mm
Annual Sin	2.88 +- 0.48 mm
SemiAnnual Cos	1.30 +- 0.48 mm
SemiAnnual Sin	0.08 +- 0.48 mm



# MONOGRAFIA 17 - PARM



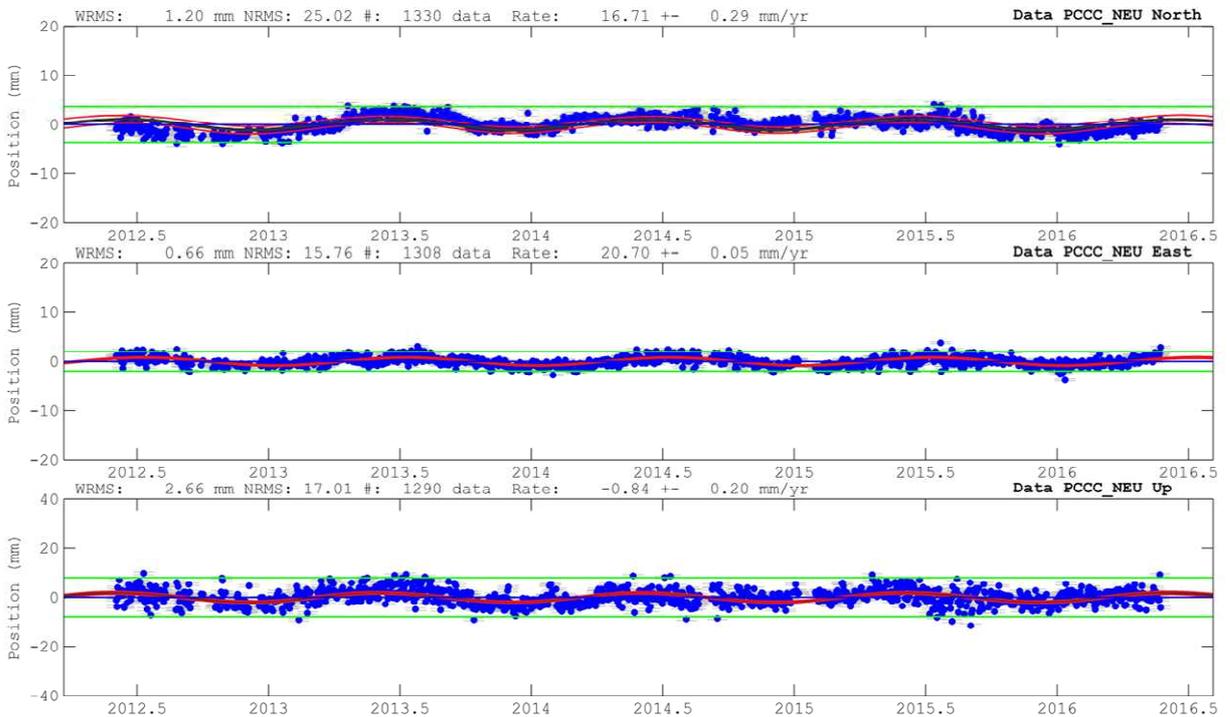
Detrend of PARM_NEU <b>North</b>	
WRMS: 0.79 mm NRMS: 7.16 #:	1401 data
Mean	55.78 +- 0.09 mm
<b>Rate</b>	<b>17.52 +- 0.08 mm/yr</b>
Annual Cos	1.00 +- 0.13 mm
Annual Sin	1.20 +- 0.12 mm
SemiAnnual Cos	-0.06 +- 0.12 mm
SemiAnnual Sin	-0.26 +- 0.12 mm
Detrend of PARM_NEU <b>East</b>	
WRMS: 0.78 mm NRMS: 23.55 #:	1401 data
Mean	75.43 +- 0.09 mm
<b>Rate</b>	<b>21.81 +- 0.07 mm/yr</b>
Annual Cos	-0.10 +- 0.13 mm
Annual Sin	-0.65 +- 0.12 mm
SemiAnnual Cos	-0.01 +- 0.12 mm
SemiAnnual Sin	0.05 +- 0.12 mm
Detrend of PARM_NEU <b>Up</b>	
WRMS: 3.84 mm NRMS: 74.23 #:	1401 data
Mean	-6.30 +- 0.90 mm
<b>Rate</b>	<b>0.46 +- 0.80 mm/yr</b>
Annual Cos	-2.91 +- 1.31 mm
Annual Sin	4.39 +- 1.27 mm
SemiAnnual Cos	0.99 +- 1.26 mm
SemiAnnual Sin	-0.13 +- 1.28 mm



# MONOGRAFIA 18 - PCCC



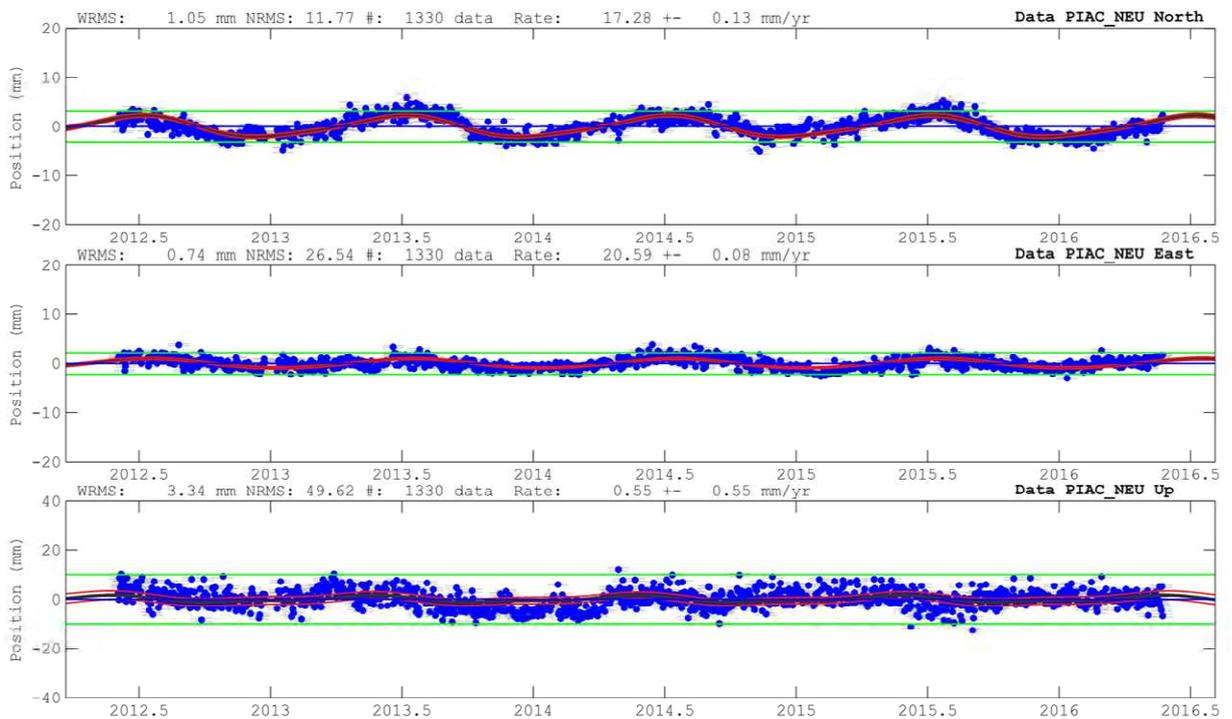
Detrend of PCCC_NEU <b>North</b>	
WRMS: 1.20 mm NRMS: 25.02 #:	1330 data
Mean	57.00 +- 0.31 mm
<b>Rate</b>	<b>16.71 +- 0.29 mm/yr</b>
Annual Cos	-1.02 +- 0.45 mm
Annual Sin	0.39 +- 0.44 mm
SemiAnnual Cos	-0.01 +- 0.44 mm
SemiAnnual Sin	0.05 +- 0.44 mm
Detrend of PCCC_NEU <b>East</b>	
WRMS: 0.66 mm NRMS: 15.76 #:	1308 data
Mean	72.32 +- 0.06 mm
<b>Rate</b>	<b>20.70 +- 0.05 mm/yr</b>
Annual Cos	-0.79 +- 0.08 mm
Annual Sin	-0.13 +- 0.08 mm
SemiAnnual Cos	-0.00 +- 0.08 mm
SemiAnnual Sin	0.00 +- 0.08 mm
Detrend of PCCC_NEU <b>Up</b>	
WRMS: 2.66 mm NRMS: 17.01 #:	1290 data
Mean	-1.40 +- 0.22 mm
<b>Rate</b>	<b>-0.84 +- 0.20 mm/yr</b>
Annual Cos	-1.67 +- 0.31 mm
Annual Sin	0.85 +- 0.31 mm
SemiAnnual Cos	-0.05 +- 0.30 mm
SemiAnnual Sin	-0.01 +- 0.31 mm



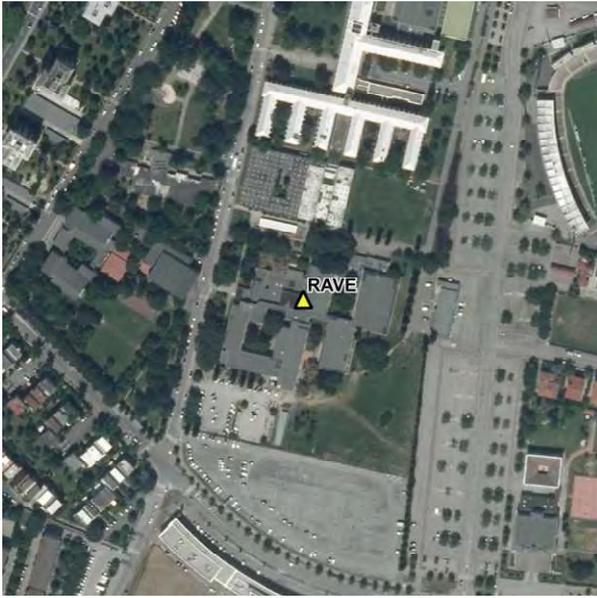
# MONOGRAFIA 19 - PIAC



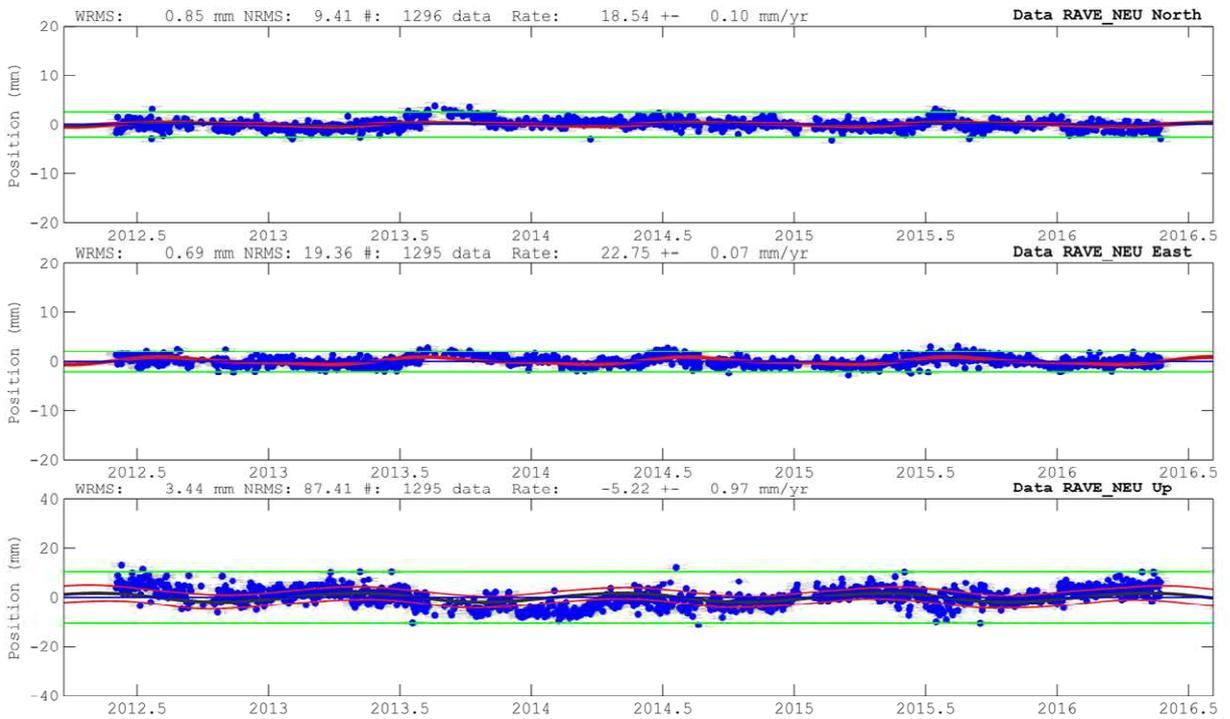
<b>Detrend of PIAC_NEU North</b>	
WRMS:	1.05 mm NRMS: 11.77 #: 1330 data
Mean	64.80 +- 0.15 mm
<b>Rate</b>	<b>17.28 +- 0.13 mm/yr</b>
Annual Cos	-2.11 +- 0.22 mm
Annual Sin	0.14 +- 0.20 mm
SemiAnnual Cos	0.21 +- 0.21 mm
SemiAnnual Sin	0.26 +- 0.21 mm
<b>Detrend of PIAC_NEU East</b>	
WRMS:	0.74 mm NRMS: 26.54 #: 1330 data
Mean	63.29 +- 0.09 mm
<b>Rate</b>	<b>20.59 +- 0.08 mm/yr</b>
Annual Cos	-0.89 +- 0.14 mm
Annual Sin	-0.21 +- 0.13 mm
SemiAnnual Cos	0.04 +- 0.13 mm
SemiAnnual Sin	0.05 +- 0.13 mm
<b>Detrend of PIAC_NEU Up</b>	
WRMS:	3.34 mm NRMS: 49.62 #: 1330 data
Mean	-5.29 +- 0.62 mm
<b>Rate</b>	<b>0.55 +- 0.55 mm/yr</b>
Annual Cos	-0.77 +- 0.91 mm
Annual Sin	0.92 +- 0.86 mm
SemiAnnual Cos	0.29 +- 0.87 mm
SemiAnnual Sin	-0.43 +- 0.88 mm



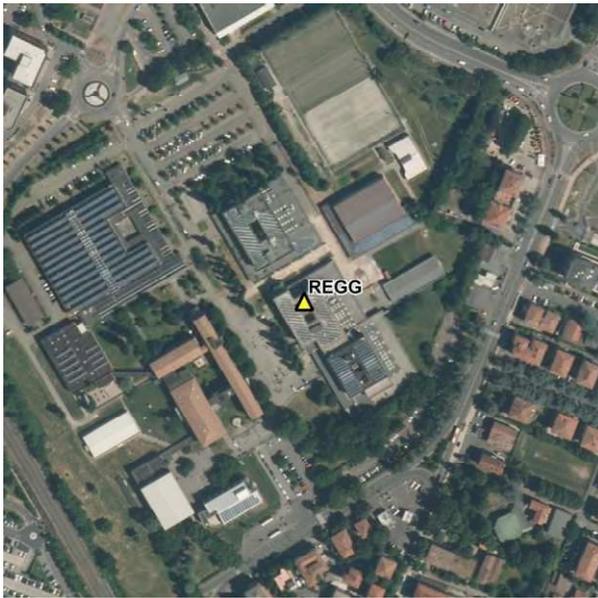
# MONOGRAFIA 20 - RAVE



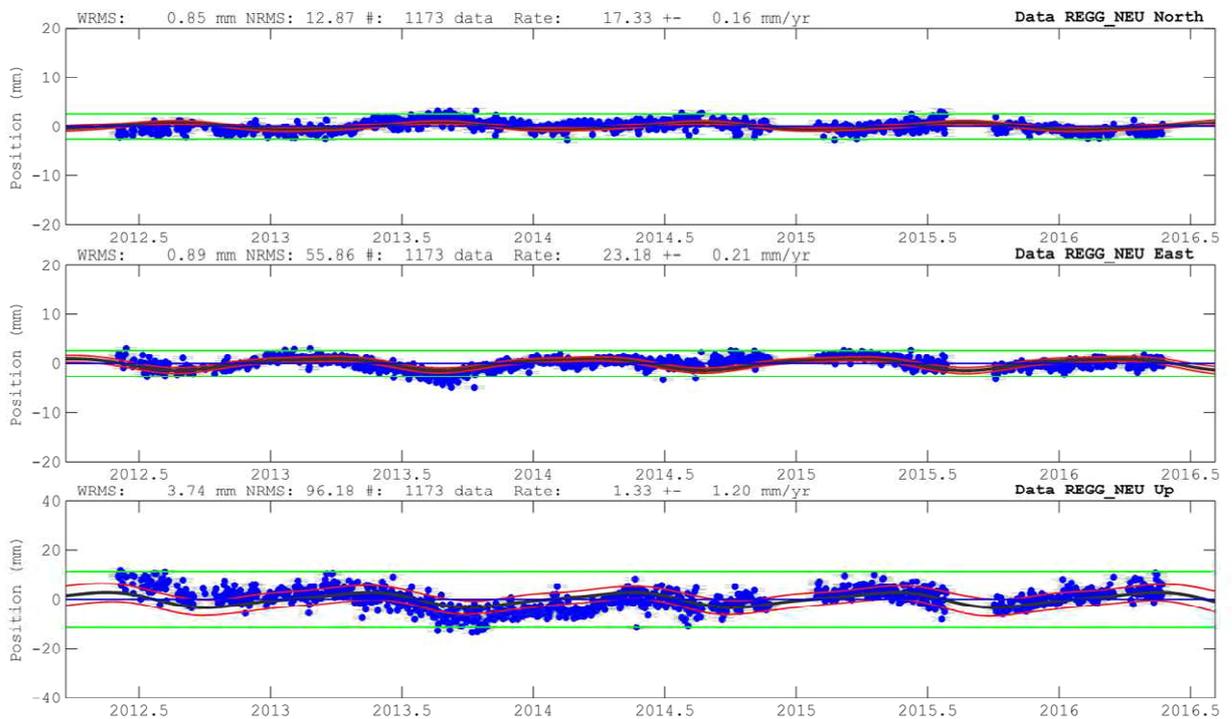
<b>Detrend of RAVE_NEU North</b>	
WRMS: 0.85 mm NRMS: 9.41 #: 1296 data	
Mean	62.32 +- 0.12 mm
<b>Rate</b>	<b>18.54 +- 0.10 mm/yr</b>
Annual Cos	-0.16 +- 0.17 mm
Annual Sin	-0.34 +- 0.17 mm
SemiAnnual Cos	0.09 +- 0.17 mm
SemiAnnual Sin	0.04 +- 0.17 mm
<b>Detrend of RAVE_NEU East</b>	
WRMS: 0.69 mm NRMS: 19.36 #: 1295 data	
Mean	92.35 +- 0.08 mm
<b>Rate</b>	<b>22.75 +- 0.07 mm/yr</b>
Annual Cos	-0.42 +- 0.12 mm
Annual Sin	-0.46 +- 0.12 mm
SemiAnnual Cos	0.17 +- 0.11 mm
SemiAnnual Sin	0.15 +- 0.12 mm
<b>Detrend of RAVE_NEU Up</b>	
WRMS: 3.44 mm NRMS: 87.41 #: 1295 data	
Mean	-10.08 +- 1.11 mm
<b>Rate</b>	<b>-5.22 +- 0.97 mm/yr</b>
Annual Cos	-0.82 +- 1.57 mm
Annual Sin	1.56 +- 1.60 mm
SemiAnnual Cos	0.11 +- 1.57 mm
SemiAnnual Sin	-0.03 +- 1.57 mm



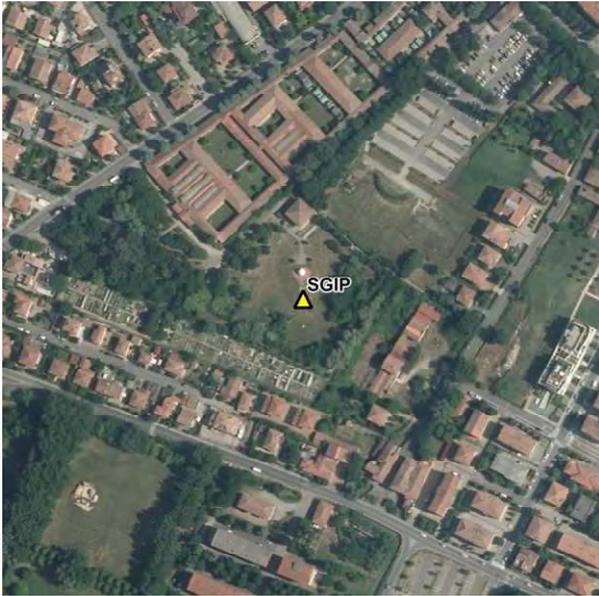
# MONOGRAFIA 21- REGG



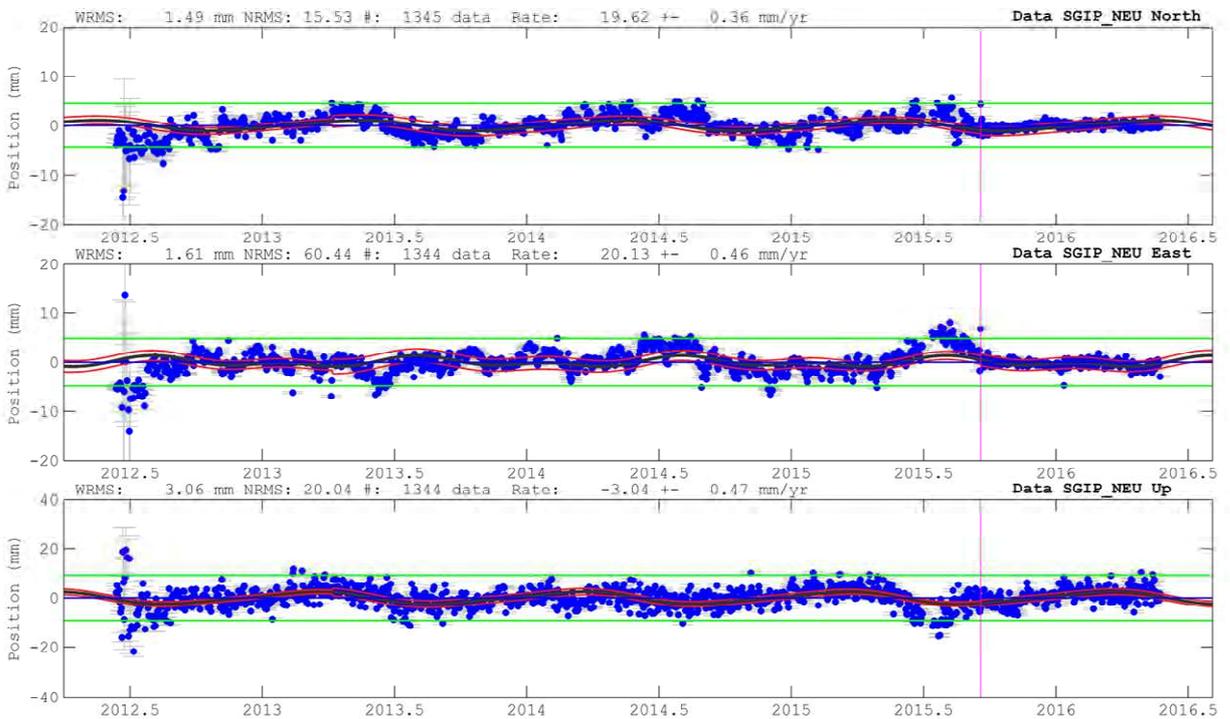
<b>Detrend of REGG_NEU North</b>	
WRMS: 0.85 mm NRMS: 12.87 #:	1173 data
Mean	62.43 +- 0.17 mm
<b>Rate</b>	<b>17.33 +- 0.16 mm/yr</b>
Annual Cos	-0.54 +- 0.25 mm
Annual Sin	-0.48 +- 0.25 mm
SemiAnnual Cos	-0.08 +- 0.25 mm
SemiAnnual Sin	0.08 +- 0.24 mm
<b>Detrend of REGG_NEU East</b>	
WRMS: 0.89 mm NRMS: 55.86 #:	1173 data
Mean	75.76 +- 0.23 mm
<b>Rate</b>	<b>23.18 +- 0.21 mm/yr</b>
Annual Cos	0.57 +- 0.32 mm
Annual Sin	0.95 +- 0.32 mm
SemiAnnual Cos	-0.00 +- 0.31 mm
SemiAnnual Sin	-0.26 +- 0.31 mm
<b>Detrend of REGG_NEU Up</b>	
WRMS: 3.74 mm NRMS: 96.18 #:	1173 data
Mean	-6.64 +- 1.30 mm
<b>Rate</b>	<b>1.33 +- 1.20 mm/yr</b>
Annual Cos	-1.00 +- 1.86 mm
Annual Sin	2.57 +- 1.86 mm
SemiAnnual Cos	0.59 +- 1.83 mm
SemiAnnual Sin	-0.42 +- 1.80 mm



**MONOGRAFIA 22- SGIP**



<b>Detrend of SGIP_NEU North</b>	
WRMS:	1.49 mm NRMS: 15.54 #: 1348 data
Mean	90.54 +- 0.74 mm
<b>Rate</b>	<b>19.62 +- 0.36 mm/yr</b>
Annual Cos	-0.55 +- 0.32 mm
Annual Sin	0.90 +- 0.28 mm
SemiAnnual Cos	-0.14 +- 0.28 mm
SemiAnnual Sin	-0.07 +- 0.28 mm
Break 2015	9 19 1 17
<b>Detrend of SGIP_NEU East</b>	
WRMS:	1.62 mm NRMS: 60.64 #: 1347 data
Mean	80.55 +- 0.90 mm
<b>Rate</b>	<b>20.13 +- 0.46 mm/yr</b>
Annual Cos	-0.59 +- 0.42 mm
Annual Sin	-0.47 +- 0.35 mm
SemiAnnual Cos	0.35 +- 0.35 mm
SemiAnnual Sin	0.52 +- 0.36 mm
Break 2015	9 19 1 17
<b>Detrend of SGIP_NEU Up</b>	
WRMS:	.08 mm NRMS: 20.29 #: 1347 data
Mean	-15.65 +- 0.97 mm
<b>Rate</b>	<b>-3.04 +- 0.47 mm/yr</b>
Annual Cos	1.06 +- 0.41 mm
Annual Sin	2.11 +- 0.36 mm
SemiAnnual Cos	-0.34 +- 0.37 mm
SemiAnnual Sin	-0.24 +- 0.37 mm
Break 2015	9 19 1 17





## Appendice II - Indici di precisione dell'analisi SqueeSAR™

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

1. La **deviazione standard della velocità** (V\_STDEV).
2. La **coerenza temporale** (COHERENCE).

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

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

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

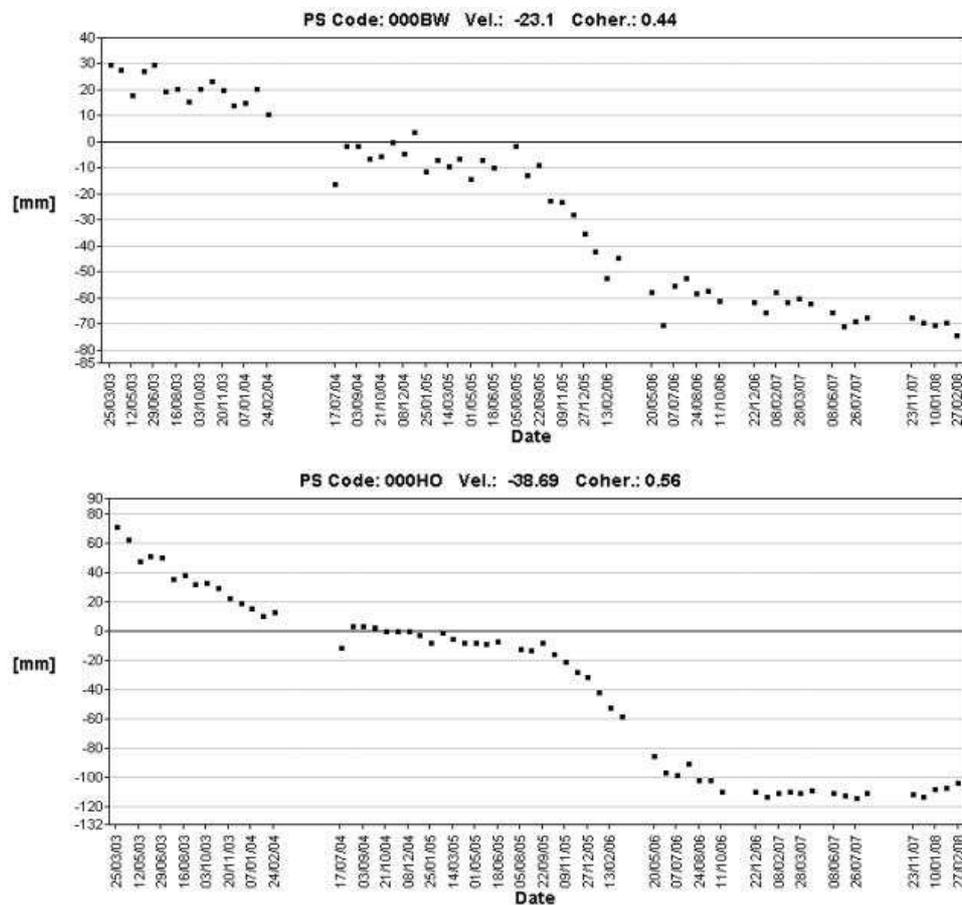
- Numero di immagini elaborate.
- Intervallo temporale tra la prima e l'ultima acquisizione.
- Eventuali lacune nell'acquisizione (ad esempio intervalli sporadici o regolari di assenza di acquisizioni).

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

I dati creati dalle analisi SqueeSAR™ vengono selezionati in base alla coerenza temporale, eliminando tutte le serie temporali che presentano una coerenza troppo bassa per garantire una interpretazione del risultato. La selezione dipende dai fattori sopra elencati, dunque varia da elaborazione ad elaborazione, ed è basata su test statistici che determinano il livello minimo di coerenza da ritenere accettabile (soglia minima di coerenza). Va infatti sottolineato che il valore assoluto della coerenza, fatti salvi i valori estremi di 0 ed 1, non assume una valenza qualitativa a sua volta assoluta, bensì relativa alla combinazione dei fattori che determinano il modello utilizzato. Questo significa che una serie temporale con, ad esempio, una coerenza temporale pari a 0.5 generata con un certo set di dati, può risultare qualitativamente diversa da

una serie temporale con la stessa coerenza, ma generata da un set di dati diverso (ad esempio contenente un numero diverso di immagini) . Ovvero il valore di coerenza temporale è sicuro indice di precisione, **purché confrontato sempre all'interno dello stesso set di dati**.

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



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