

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

PRIMA FASE



RELAZIONE FINALE

Referenti per la Regione Emilia-Romagna:

Rosanna Bissoli, Responsabile del Servizio Tutela e Risanamento Risorsa Acqua, Assessorato Ambiente e Riqualificazione Urbana.

Immacolata Pellegrino e Andrea Rapino, Servizio Tutela e Risanamento Risorsa Acqua, Assessorato Ambiente e Riqualificazione Urbana.

Hanno collaborato alla realizzazione del progetto:

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

Gabriele Bitelli e Luca Vittuari (DICAM - Università di Bologna) - Elaborazione stazioni GPS.

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

Monica Branchi (ARPA, Direzione Tecnica): elaborazioni cartografiche.

Immagine di copertina: satellite GPS III.

INDICE

1. Premessa	1
2. Analisi interferometrica	2
2.1 <i>Introduzione</i>	2
2.2 <i>Area d'indagine</i>	3
2.3 <i>Dati acquisiti</i>	3
2.4 <i>Definizione dei siti</i>	3
2.5 <i>Elaborazione siti ed allineamento</i>	4
2.6 <i>Risultati</i>	5
2.7 <i>Confronto e calibrazione preliminare con i dati GPS</i>	17
3. Elaborazione delle stazioni permanenti GPS	29
3.1 <i>Introduzione</i>	29
3.2 <i>Definizione della Rete di inquadramento</i>	29
3.3 <i>Stazioni permanenti GPS analizzate</i>	30
3.4 <i>Elaborazione delle osservazioni giornaliere</i>	32
3.5 <i>Stima delle velocità di movimento</i>	34
3.6 <i>Stima delle velocità orizzontali relative</i>	53
3.7 <i>Considerazioni metodologiche e prospettive</i>	53
3.8 <i>Confronto fra i trend relativi al periodo 2002-06 e i trend delle stazioni GPS</i>	54
4. Conclusioni	57

Appendice I - Le tecniche PSInSAR™ e SqueeSAR™

Appendice II - Indici di precisione dell'analisi SqueeSAR™

1. Premessa

La Regione Emilia-Romagna con Del. n. 2120 del 27/12/2010 ha affidato ad ARPA Direzione Tecnica la realizzazione delle attività inerenti il progetto “Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola – Prima Fase”, secondo termini e modalità contenute nella convenzione approvata con lo stesso atto.

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

Per la realizzazione di tale obiettivo è stato utilizzato il metodo dell’analisi interferometrica di dati satellitari, lo stesso metodo con il quale si è proceduto nell’ambito della precedente campagna di rilievo del 2005-07. In particolare tale metodo è stato supportato dall’elaborazione di un congruo numero di stazioni permanenti GPS.

Con il presente progetto è stata svolta una **prima fase** del lavoro, inerente le seguenti attività:

1. analisi interferometrica;
2. elaborazione dei dati acquisiti da 17 stazioni permanenti GPS presenti nell’area d’indagine, inquadramento di tali stazioni nel Sistema Internazionale EUREF e calibrazione preliminare dell’analisi interferometrica;

Ad una fase successiva, la cui attuazione sarà oggetto di una seconda convenzione, è demandata la conclusione del lavoro, tramite verifica e validazione dei dati interferometrici e realizzazione della cartografia delle velocità di movimento verticale del suolo relativa al periodo 2006-2011.

2. Analisi interferometrica

2.1 Introduzione

Nel 2007 Arpa, su incarico della Regione Emilia-Romagna e in collaborazione con il DISTART dell'Università di Bologna, realizzò la carta delle velocità di movimento verticale del suolo, periodo 2002-06, relativa all'intera pianura emiliano-romagnola¹. Per l'elaborazione di tale cartografia venne eseguito un rilievo utilizzando, per la prima volta a scala regionale, il metodo dell'analisi interferometrica di dati radar satellitari, con tecnica PSInSARTM, supportato da misure di livellazione geometrica di alta precisione². In particolare, vennero elaborate immagini acquisite dai satelliti ERS1 ed ERS2 in geometria discendente nel periodo 1992-2000, immagini acquisite dal satellite ENVISAT in geometria sia ascendente sia discendente nel periodo 2002-2006 ed immagini acquisite dal satellite RSAT1 (RADARSAT-1) in geometria ascendente nel periodo 2003-2005.

Con il presente lavoro, si è proceduto ad aggiornare le conoscenze geometriche sul fenomeno della subsidenza già acquisite con il precedente rilievo, tramite l'elaborazione con tecnica SqueeSARTM (algoritmo PSInSARTM di seconda generazione), di immagini radar acquisite dal satellite RSAT1 nel periodo 2006-2011.

Al fine di calibrare l'analisi interferometrica, si è prevista l'elaborazione di un congruo numero di stazioni permanenti GPS. L'utilizzo delle stazioni GPS era già stato preso in considerazione in sede di progettazione del precedente rilievo, ma fu momentaneamente accantonato in ragione dell'esiguità di stazioni esistenti, tale da non poter garantire una corretta calibrazione dei dati interferometrici. L'aumentata disponibilità di stazioni permanenti GPS negli ultimi anni, fa sì che tali dati possano essere ora proficuamente utilizzati in sostituzione delle livellazioni geometriche.

La presente attività, in particolare, è stata suddivisa in due fasi. Nella prima fase si sono effettuate le elaborazioni SqueeSARTM dei dati radar acquisiti sull'area d'indagine al fine di:

- individuare e localizzare i punti di misura (PS e DS)³ presenti;
- stimare le velocità medie annue di spostamento dei PS e dei DS (in mm/anno) nel periodo analizzato;
- stimare le serie storiche di spostamento dei PS e dei DS (in mm) rispetto ad un riferimento.

Nella seconda fase si è proceduto ad una calibrazione **preliminare** dei risultati dell'analisi SqueeSARTM, tramite dati di movimento verticale, ottenuti dall'elaborazione di sei stazioni permanenti GPS, opportunamente selezionate rispetto alle 17 stazioni complessivamente elaborate.

¹ Regione Emilia-Romagna - Arpa Emilia-Romagna (2007), *Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola. Analisi interferometrica*, Bologna, Arpa Emilia-Romagna.

² Regione Emilia-Romagna - Arpa Emilia-Romagna (2005), *Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola. Stralcio di attività finalizzate alla misura di una rete di livellazione a supporto dell'analisi interferometrica*, Bologna, Arpa Emilia-Romagna.

Regione Emilia-Romagna - Arpa Emilia-Romagna (2006), *Rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola. II° Stralcio di attività finalizzate alla misura di una rete di livellazione a supporto dell'analisi interferometrica*, Bologna, Arpa Emilia-Romagna.

³ PS – Permanent Scatterer, DS – Distributed Scatterer, cfr. Appendice I.

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 circa **13.200 km²**.



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

2.3 Dati acquisiti

Per l'analisi completa di tutta l'area d'indagine sono state utilizzate immagini RSAT1 acquisite in geometria ascendente da tre orbite satellitari parallele (track) nel periodo gennaio 2006 - maggio 2011. La frequenza nominale di acquisizione del sensore RSAT1 dell'Agenzia Spaziale Canadese è di 24 giorni.

In Tabella 1 è riportato, per ogni specifica track, il numero di immagini presenti nell'archivio RSAT1 al 1 marzo 2011.

Track n°	Numero immagini in archivio al 1 marzo 2011
4	69
147	70
247	70

Tab. 1 - Dataset RSAT1 ascendenti presenti in archivio sull'area d'indagine.

Le immagini effettivamente utilizzate nelle singole elaborazioni SqueeSAR™ sono risultate inferiori rispetto a quanto presente in archivio: alcune immagini sono risultate non producibili dal fornitore dei dati satellitari, altre sono state scartate in fase di elaborazione, perché non soddisfacenti i requisiti di qualità richiesti dalla tecnica SqueeSAR™.

2.4 Definizione dei siti

Sulla base della copertura delle immagini acquisite e in funzione dei requisiti di estensione massima dell'area elaborabile con tecnica SqueeSAR™, sono stati definiti **sette siti** su cui effettuare le singole elaborazioni SqueeSAR™.

In Tabella 2 per ogni sito scelto, sono specificate le caratteristiche dei rispettivi *dataset*.

Nome Sito	Satellite - Geometria	Track n°	Numero immagini <i>dataset</i> elaborato	Periodo coperto
Ravenna	RSAT1-ascendente	4	65	16/01/2006-15/05/2011
Comacchio	RSAT1-ascendente	4	67	16/01/2006-15/05/2011
Bologna	RSAT1-ascendente	247	70	09/01/2006-07/05/2011
Reggio Emilia	RSAT1-ascendente	247	70	09/01/2006-07/05/2011
Fidenza	RSAT1-ascendente	147	68	02/01/2006-30/04/2011
Piacenza	RSAT1-ascendente	147	68	02/01/2006-30/04/2011
Rimini	RSAT1-discendente	154	60	03/01/2006-01/05/2011

Tab. 2 - Caratteristiche dei siti elaborati con tecnica SqueeSAR™.

2.5 Elaborazione siti ed allineamento

Definiti i singoli siti, i relativi *dataset* sono stati elaborati a piena risoluzione (il dato finale viene invece sottocampionato su griglia spaziale di 100x100m).

Di fatto ogni elaborazione costituisce un'analisi indipendente, tuttavia i siti elaborati sono stati allineati su layer geografico comune (ortofoto servite dalla piattaforma Microsoft Virtual Earth, accessibile tramite licenza ESRI-ArcMap) e le aree di sovrapposizione sono state utilizzate per stimare e rimuovere le differenze di velocità media tra i vari siti, dovute ai punti di riferimento locali, consentendo di fatto di riferire tutti i siti ad un ipotetico punto di riferimento comune.

Successivamente, i siti sono stati poi proiettati nel sistema di riferimento WGS1984-UTM 32N, previa verifica con ArcMap dell'allineamento tramite ortofoto. E' seguito quindi il sottocampionamento su griglia spaziale di 100x100m, effettuato selezionando il punto di misura a più alta coerenza (cfr. Appendice II) per ogni cella, ed il ritaglio sull'area d'indagine (Figura 2).

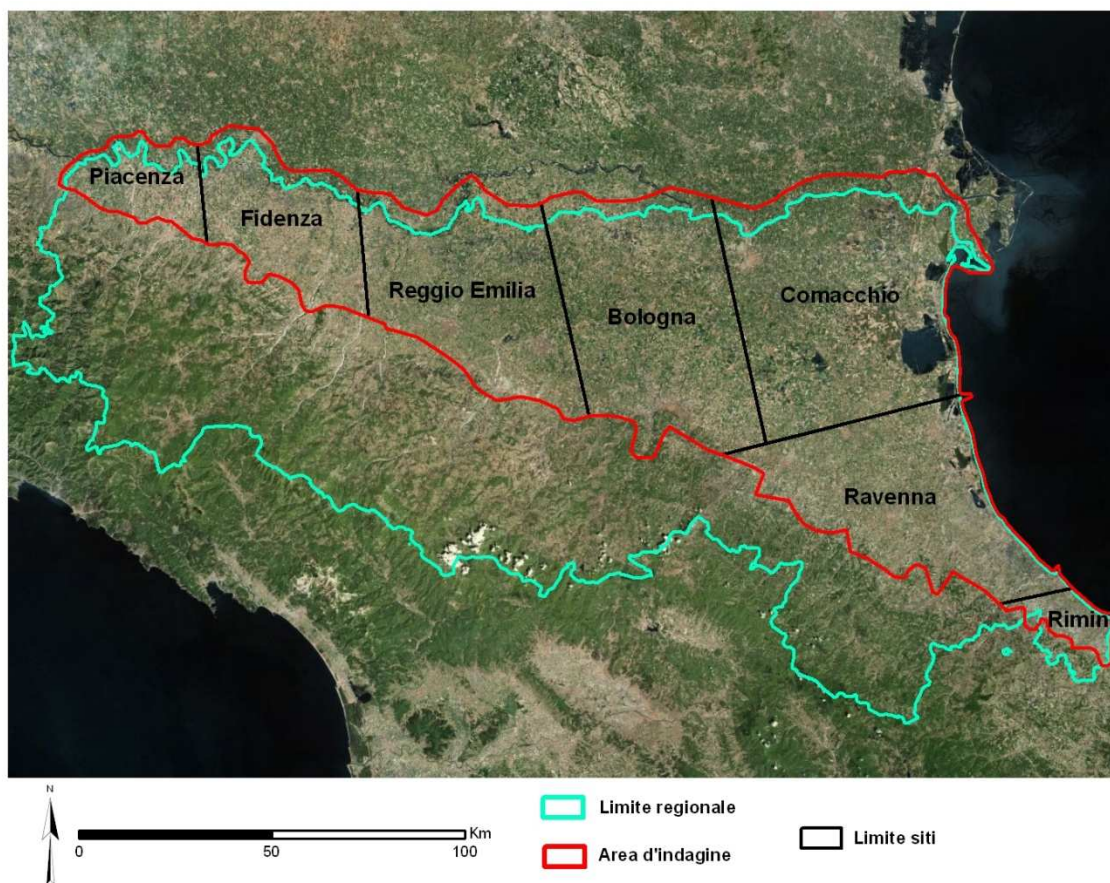


Fig. 2 - Estensione e denominazione dei 7 siti elaborati.

2.6 Risultati

L'elaborazione dei 7 *dataset* ha portato all'individuazione di un totale di circa **318.600 punti di misura**. In Tabella 3 sono riportati il numero di punti individuati e l'estensione per ognuno dei 7 siti elaborati.

Per ogni punto è stata calcolata la velocità media nel periodo monitorato e le singole serie storiche di spostamento.

Si ricorda che le misure sono effettuate lungo la **linea di vista del satellite** (LOS - Line of sight). In Tabella *Tab.* 3 sono riportati gli angoli di vista per ogni sito elaborato.

Va sottolineato inoltre che la sola analisi delle velocità medie non fornisce informazioni complete sull'andamento dei movimenti del terreno, ma deve essere integrata con l'analisi delle serie storiche di spostamento per poter individuare possibili movimenti non lineari, cambi di velocità, trend stagionali ed accelerazioni.

In Figura 3, Figura 4, Figura 5, Figura 6, Figura 7, Figura 8 e Figura 9 sono mostrate le distribuzioni dei punti di misura individuati per tutti i siti elaborati, visualizzati per velocità media stimata nel periodo monitorato.

In Figura 10 è mostrata una visione d'insieme dei dati SqueeSAR™, visualizzati per velocità media annua lungo la **linea di vista del satellite**.

In Figura 11 e Figura 12 è evidenziata l'area di Bologna con alcune serie storiche dei movimenti verticali.

Si ricorda che la precisione delle misure è descritta dalla **deviazione standard**: minore è la deviazione standard, maggiore è la precisione delle misure. Nel caso dell'analisi SqueeSAR™

la deviazione standard della velocità media dei punti di misura è calcolata rispetto al punto di riferimento locale ed aumenta con la distanza fisica tra il PS/DS ed il punto di riferimento (cfr. Appendice II). I **valori di deviazione standard** delle velocità medie ottenute sono mostrate insieme alle velocità medie e sono risultati compresi per tutti i siti entro **1,4 mm/anno**.

Nome Sito	Geometria	N° punti individuati	Estensione (km²)	δ	θ
Ravenna	Ascendente	68.469	≈ 2.380	32,44°	11,61°
Comacchio	Ascendente	55.024	≈ 3.550	32,04°	12,37°
Bologna	Ascendente	66.640	≈ 2.800	33,03°	8,99°
Reggio Emilia	Ascendente	71.507	≈ 2.290	34,65°	11,60°
Fidenza	Ascendente	32.089	≈ 1.370	32,95°	13,11°
Piacenza	Ascendente	15.436	≈ 650	32,90°	12,39°
Rimini	Discendente	9460	≈ 270	32,94°	12,76°

Tab. 3 - Punti di misura, estensione e angoli di vista del satellite per ognuno dei 7 siti elaborati.

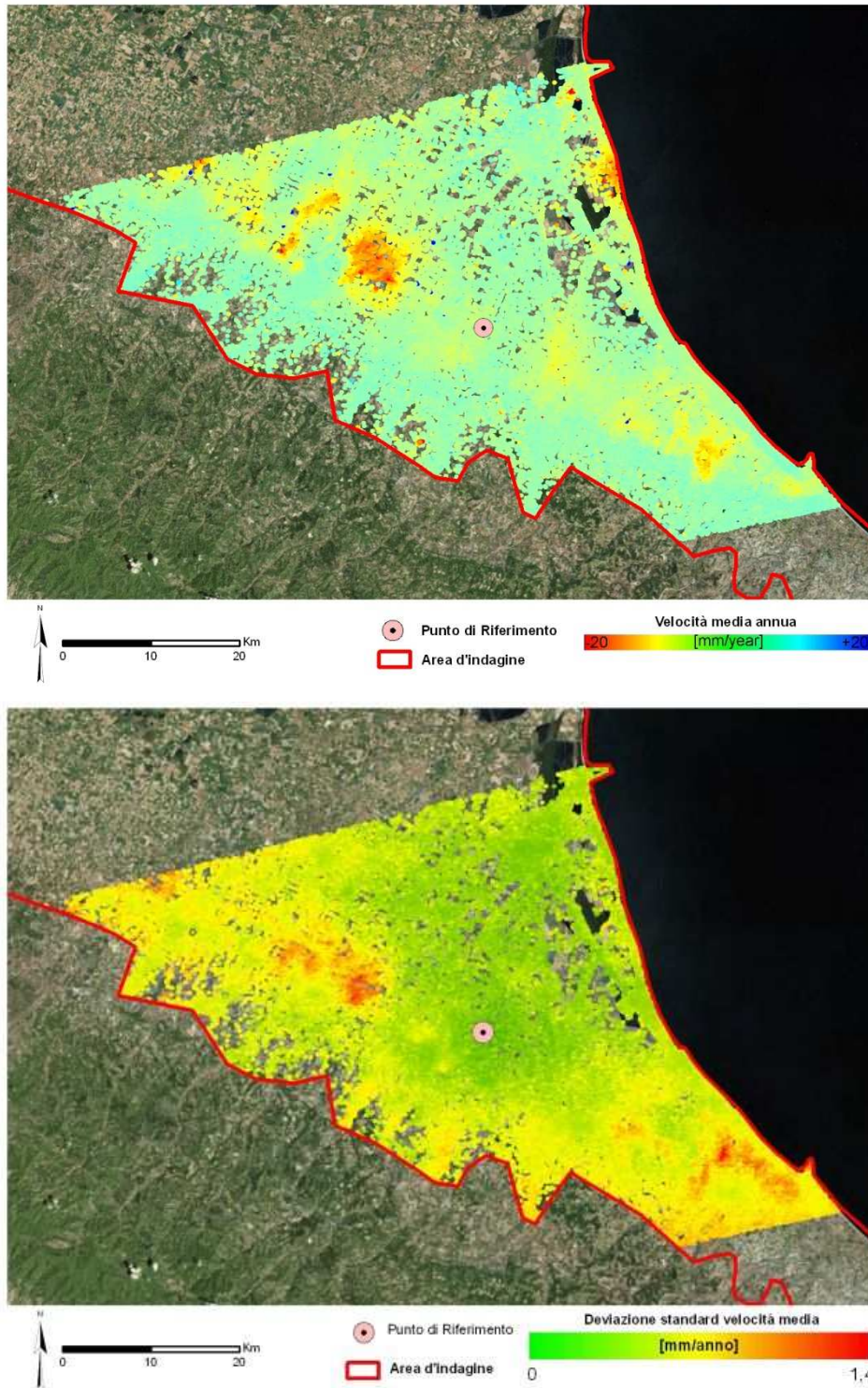


Fig. 3 - Velocità media (in alto) e deviazione standard della velocità (in basso) per il sito di Ravenna.

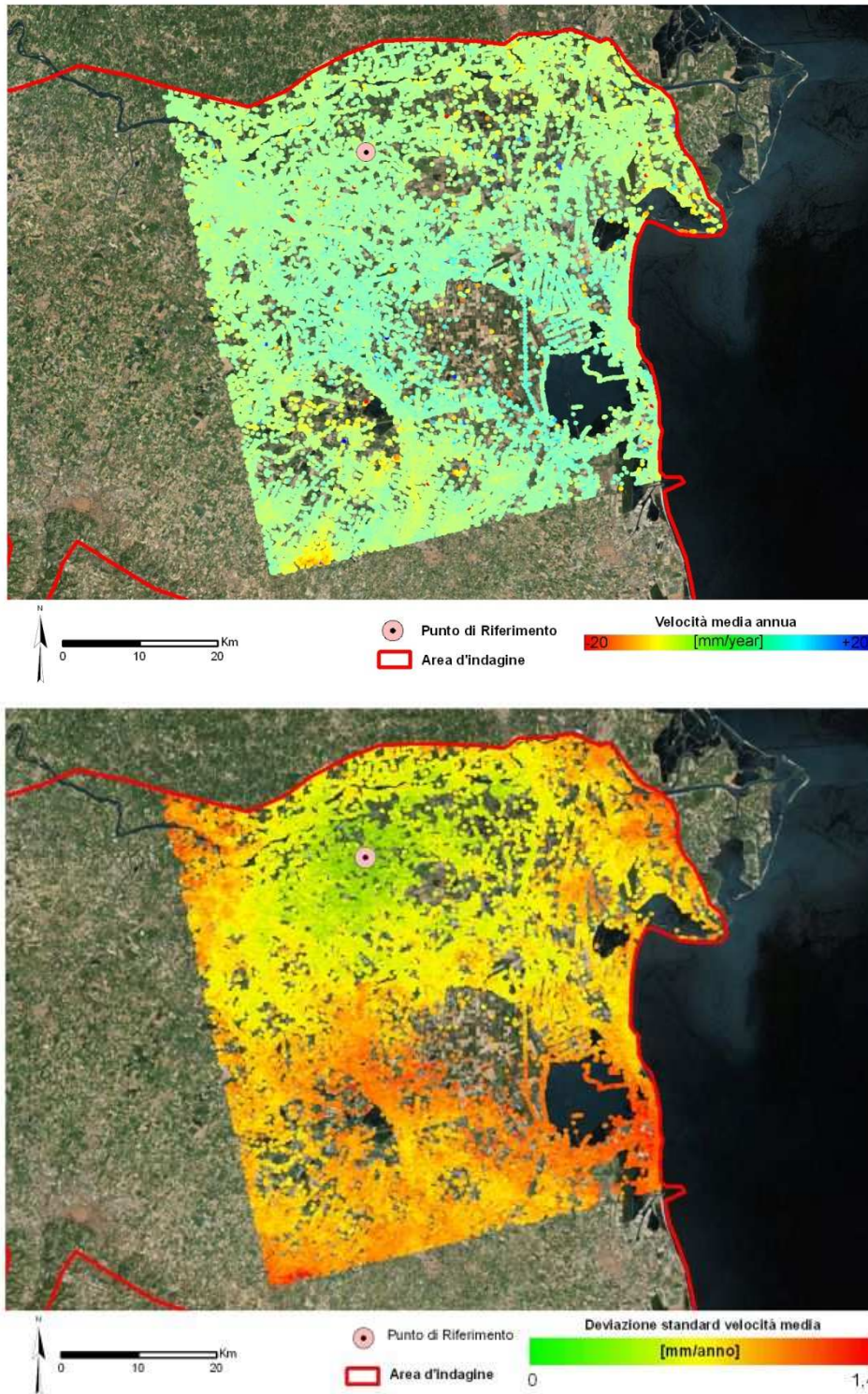


Fig. 4 - Velocità media (in alto) e deviazione standard della velocità (in basso) per il sito di Comacchio.

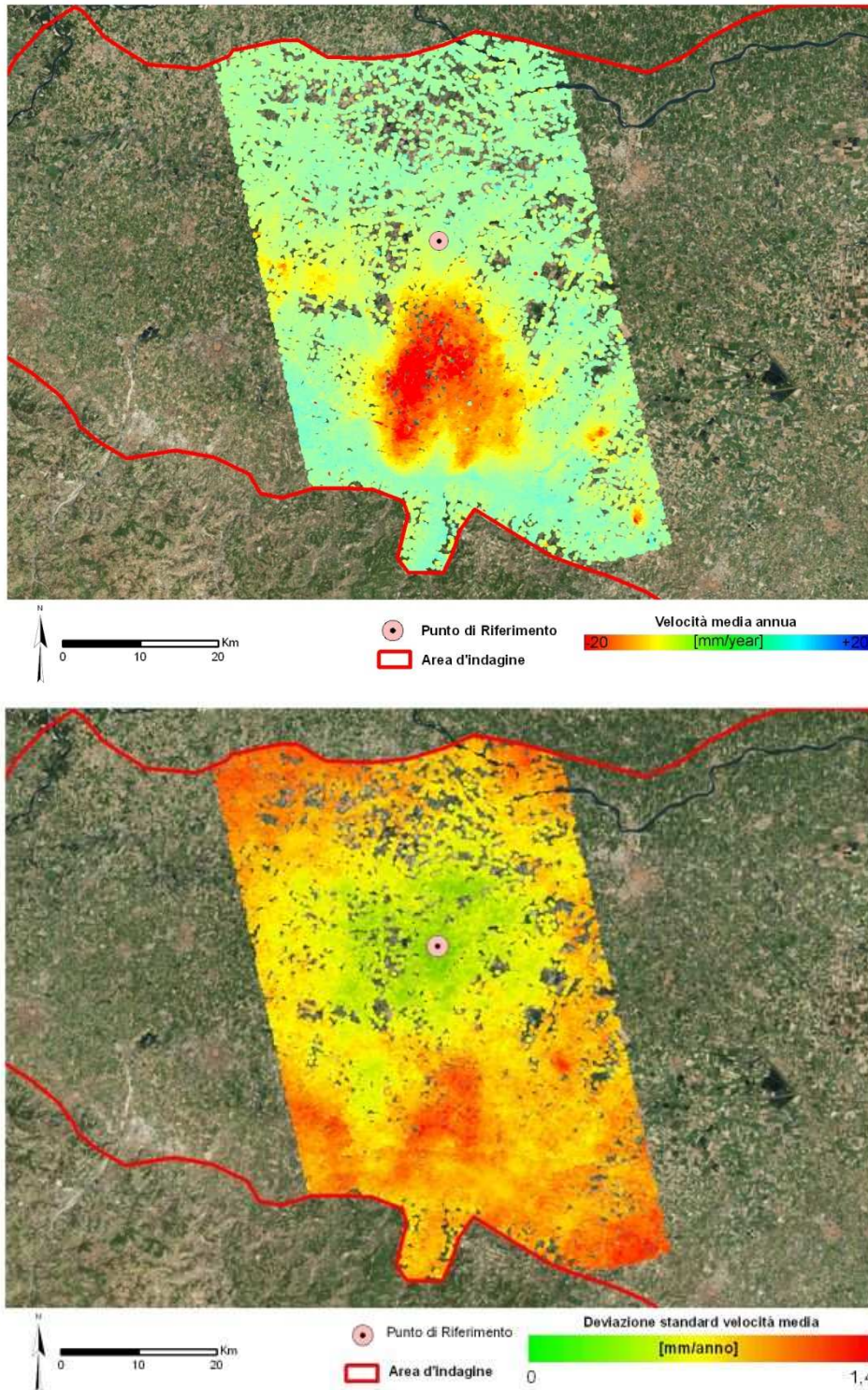


Fig. 5 - Velocità media (in alto) e deviazione standard della velocità (in basso) per il sito di Bologna.

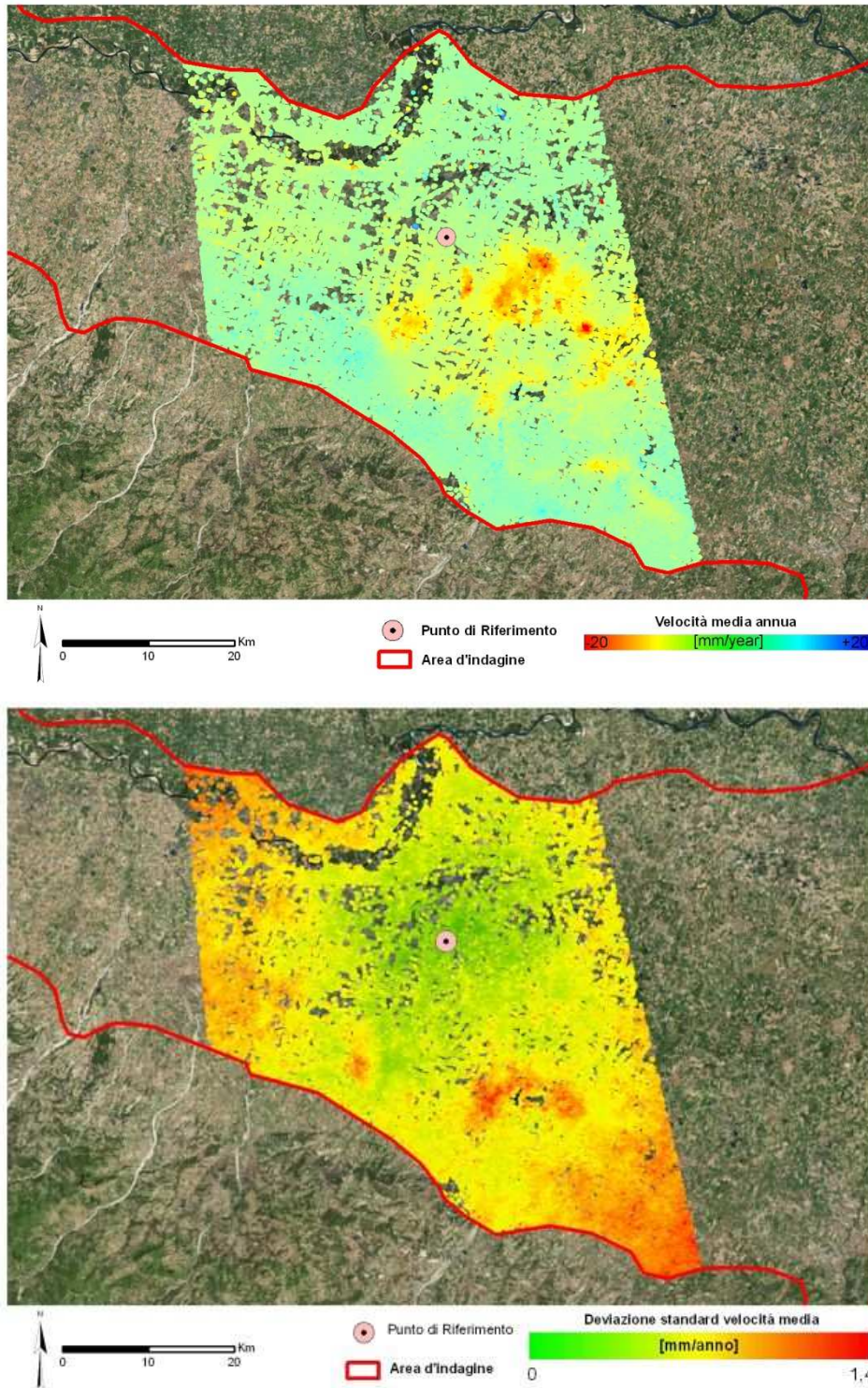


Fig. 6 - Velocità media (in alto) e deviazione standard della velocità (in basso) per il sito di Reggio Emilia.

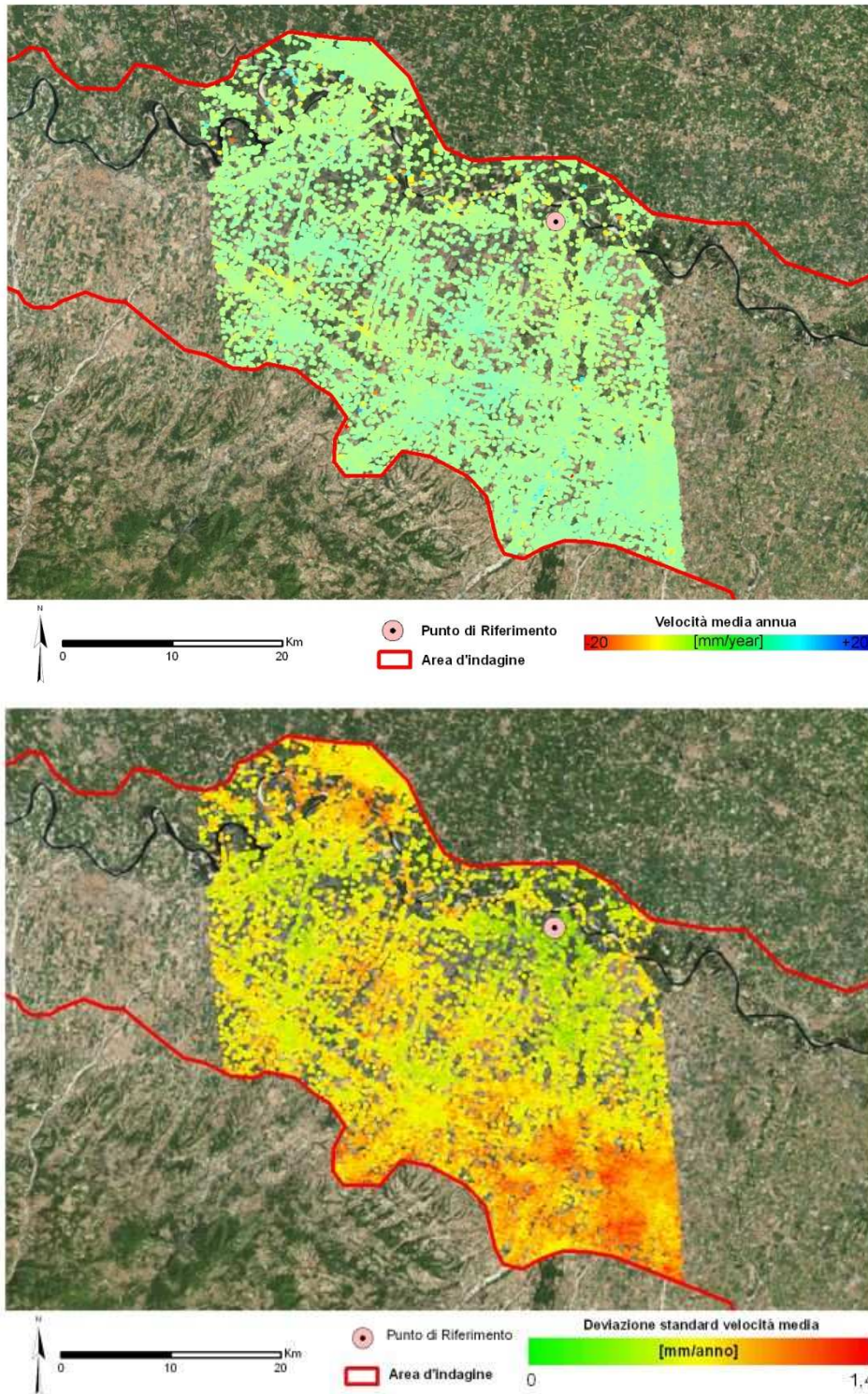


Fig. 7 - Velocità media (in alto) e deviazione standard della velocità (in basso) per il sito di Fidenza.

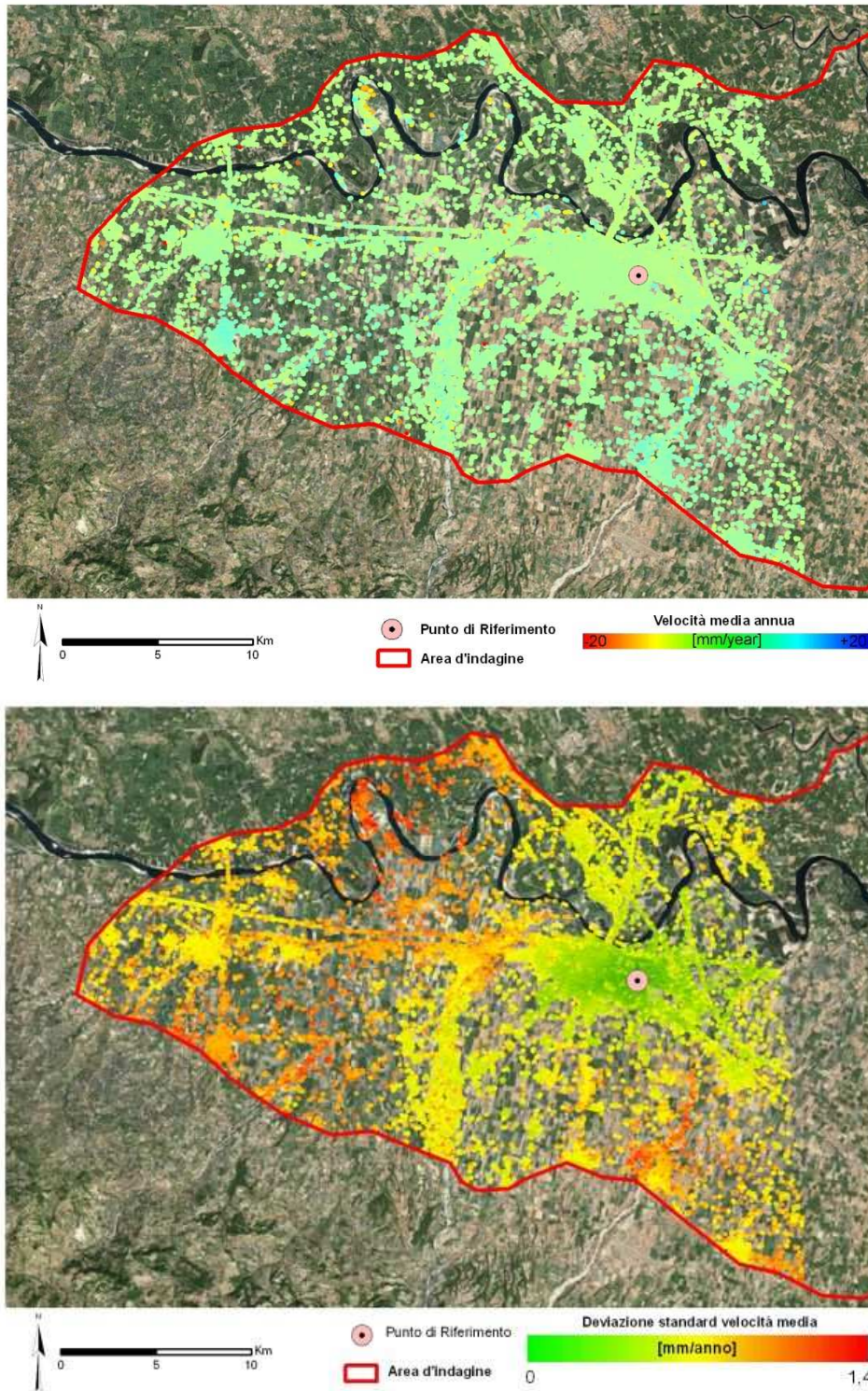


Fig. 8 - Velocità media (in alto) e deviazione standard della velocità (in basso) per il sito di Piacenza.

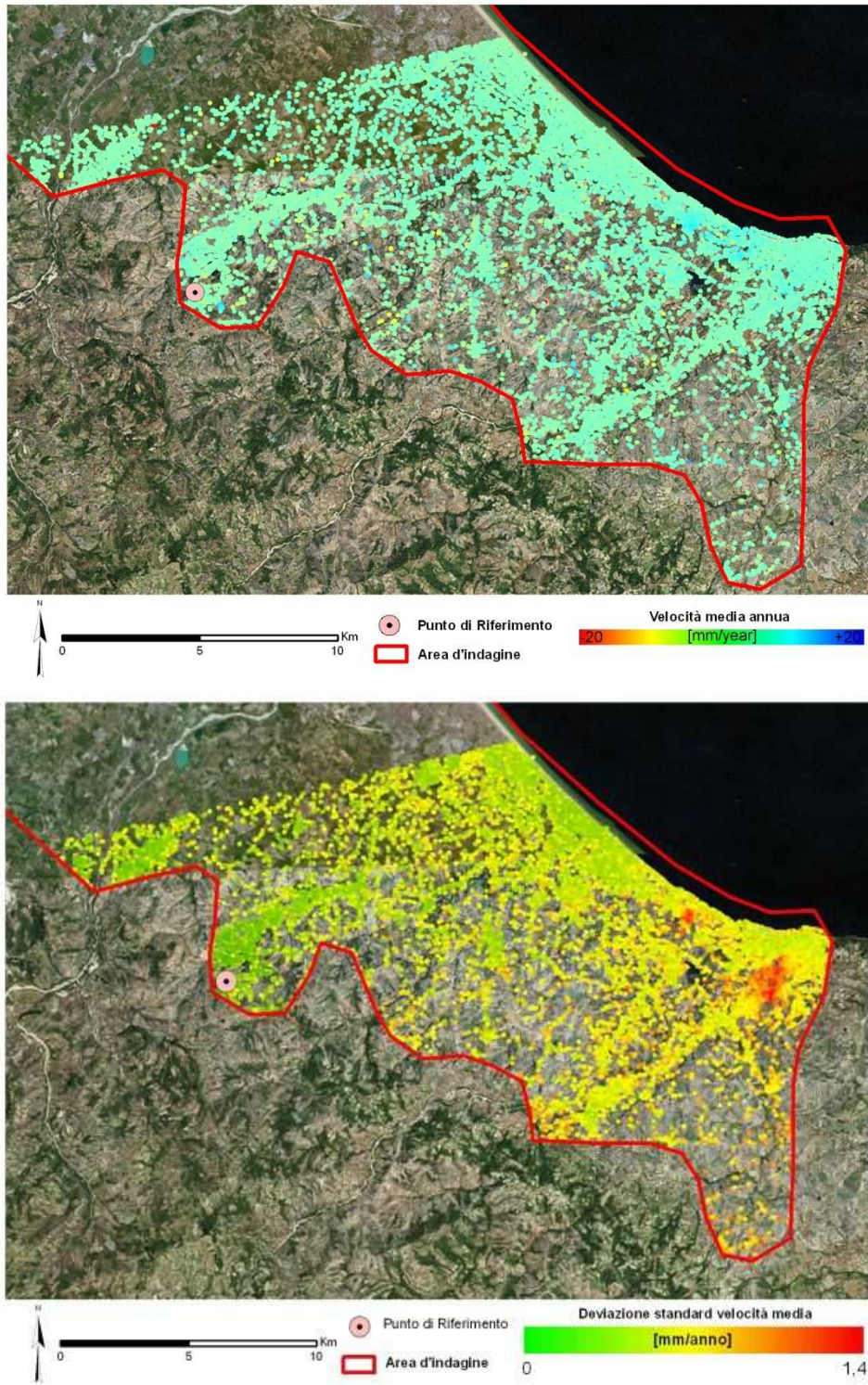


Fig. 9 - Velocità media (in alto) e deviazione standard della velocità (in basso) per il sito di Rimini.

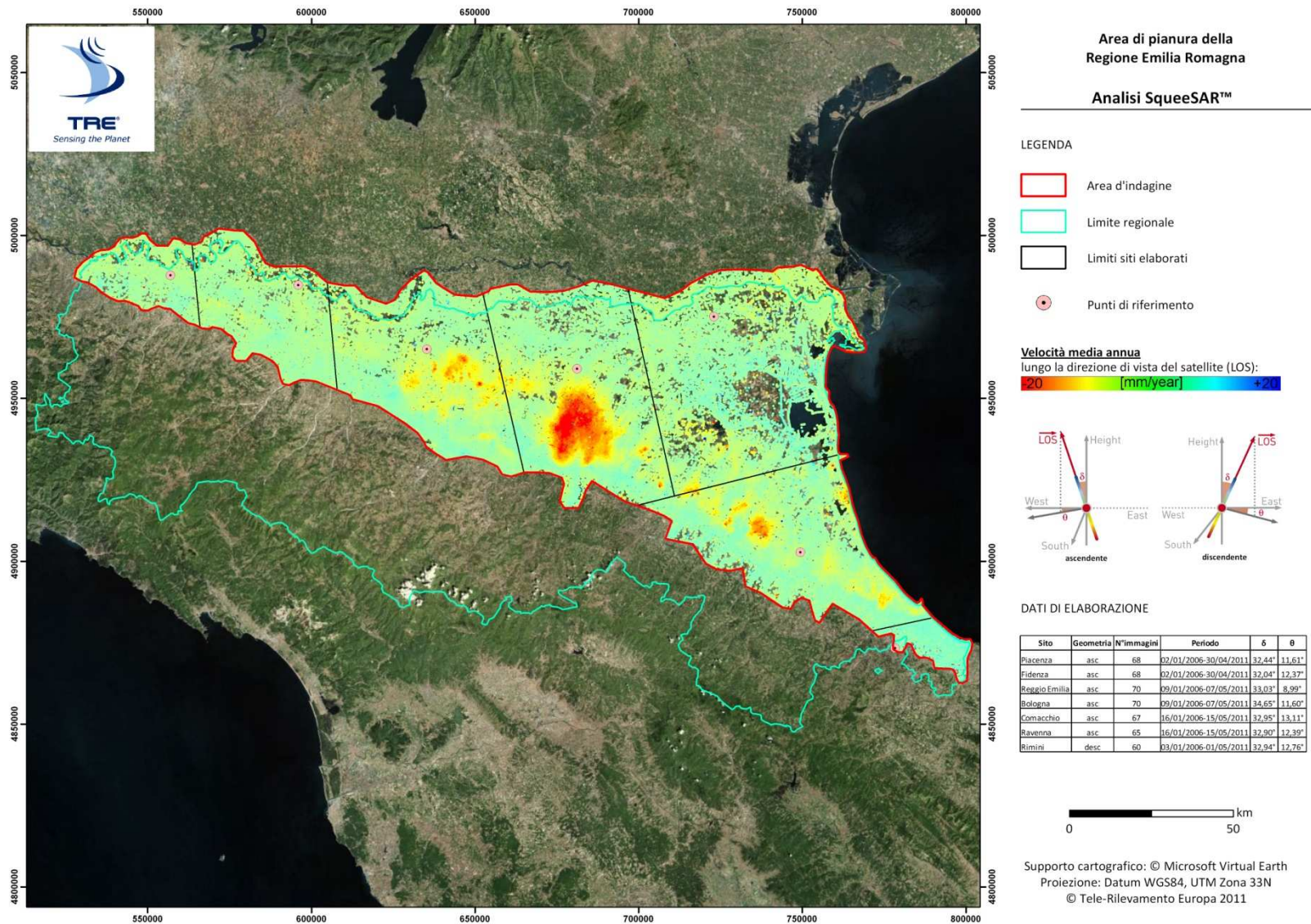


Fig. 10 - Visione d'insieme dei 7 siti elaborati: sono mostrati i punti di misura individuati con l'analisi SqueeSAR™, visualizzati per velocità media annua. Si ricorda che ogni elaborazione è indipendente e che le misure sono ottenute lungo la linea di vista del satellite.

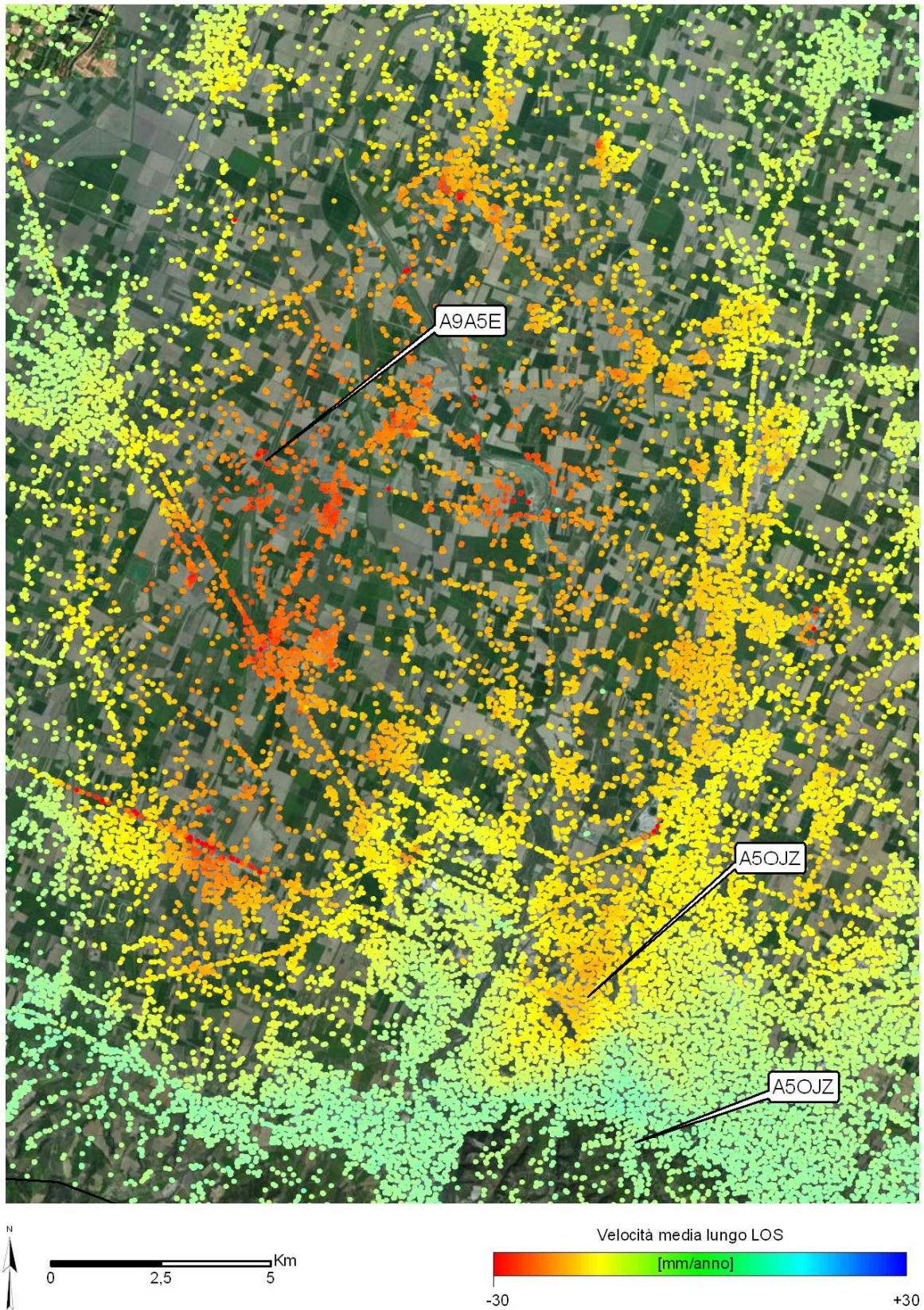


Fig. 11 - Particolare dell'area di Bologna. Sono evidenziati i punti le cui serie storiche sono riportate in Figura 12.

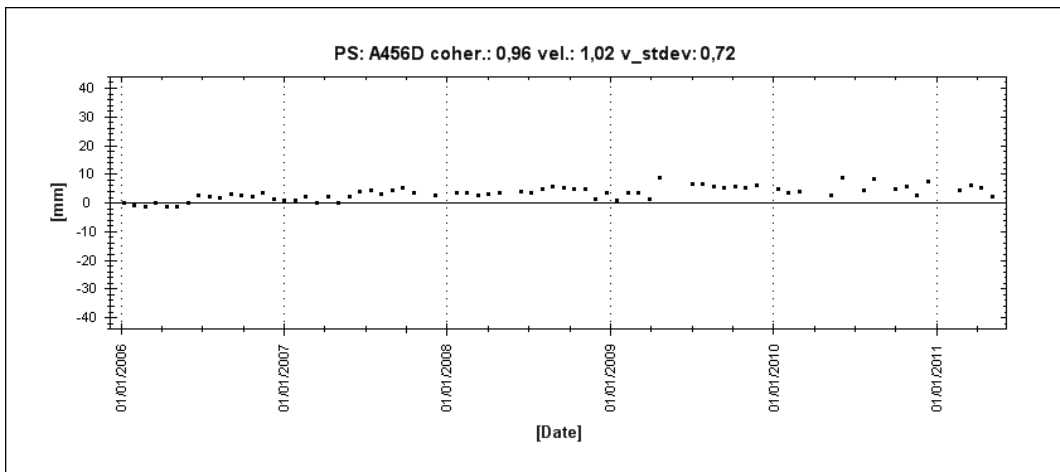
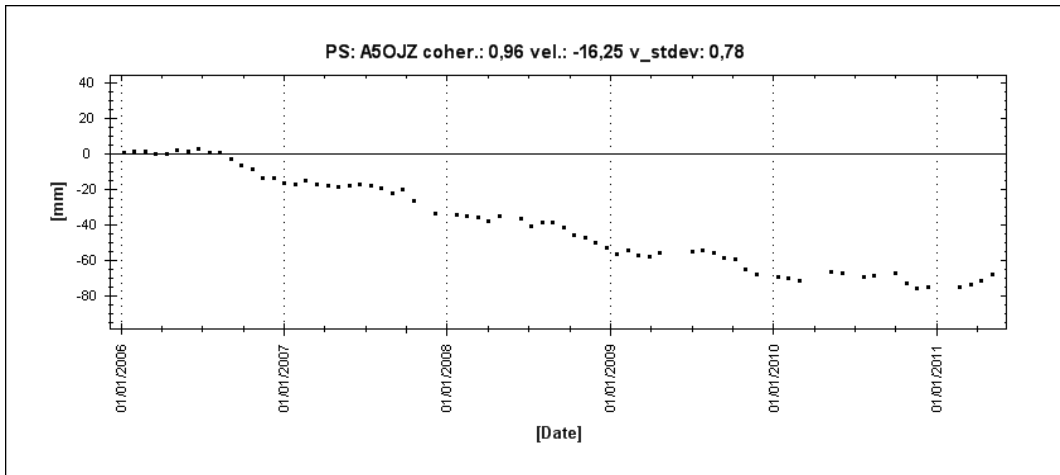
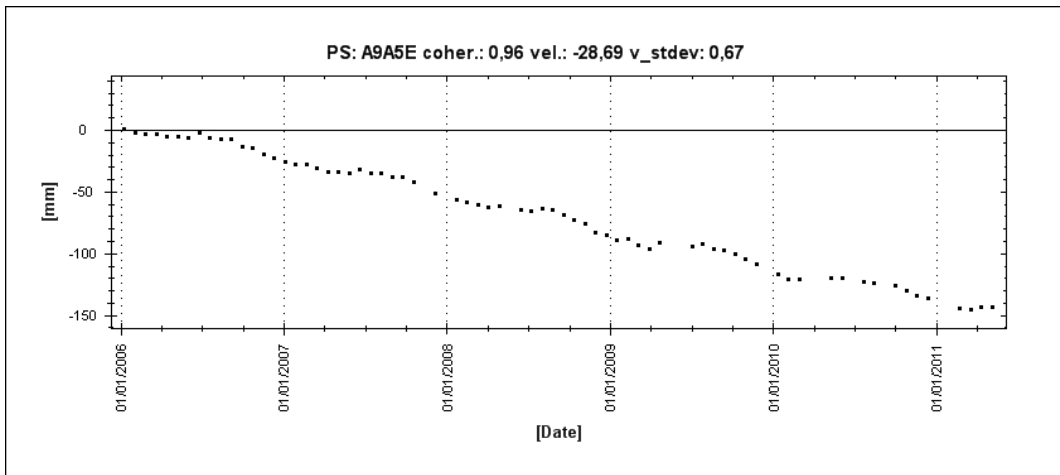


Fig. 12 - Serie storiche dei movimenti verticali per i punti evidenziati in Figura 11.

2.7 Confronto e calibrazione preliminare con i dati GPS

In via del tutto preliminare e provvisoria, i risultati dell'analisi SqueeSAR™ sono stati confrontati e calibrati con dati di velocità media di spostamento verticale di **6 stazioni permanenti GPS** presenti nell'area d'indagine (Figura 13 e Tabella 4).

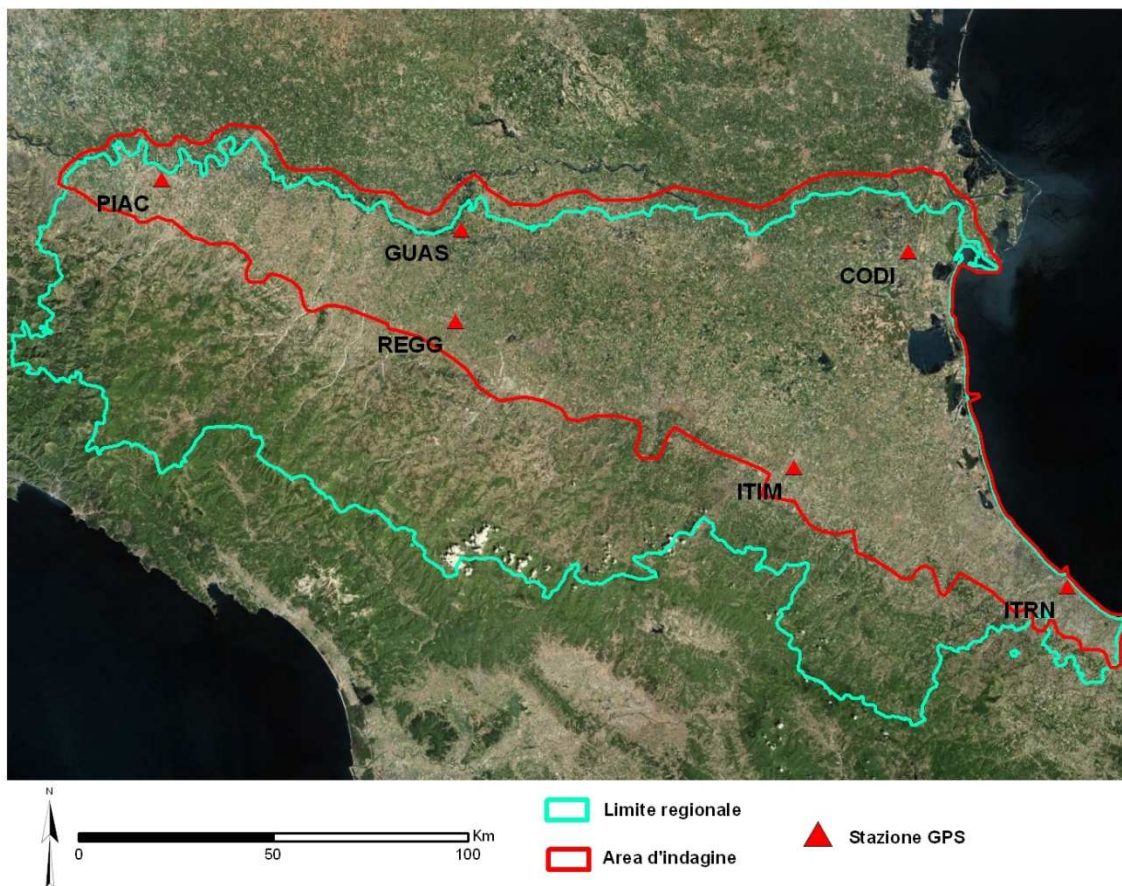


Fig. 13 - Localizzazione delle sei stazioni GPS utilizzate.

Nome stazione	Periodo monitorato	Velocità verticale media
CODI	20/08/2007 – 15/05/2011	-1.88±0.17 mm/anno
GUAS	11/02/2007 – 15/05/2011	-0.09±0.72 mm/anno
ITIM	15/02/2007 – 15/05/2011	-0.58±0.32 mm/anno
ITRN	15/02/2007 – 15/05/2011	-1.69±0.31 mm/anno
PIAC	13/08/2007 – 15/05/2011	1.03±0.66 mm/anno
REGG	01/05/2008 – 15/05/2011	-0.83±0.29 mm/anno

Tab. 4 - Dati delle 6 stazioni GPS utilizzate.

La metodologia di integrazione e calibrazione dei due dati è stata effettuata lavorando sui dati **a piena risoluzione**.

Assumendo che i movimenti del terreno nell'area in esame siano puramente verticali, per un confronto con le misure di spostamento GPS, i dati SqueeSAR™ a piena risoluzione, acquisiti lungo la **linea di vista del satellite**, sono stati **proiettati lungo la verticale**. La verifica della veridicità dell'assunzione, almeno in corrispondenza delle aree in cui le stazioni stesse sono monumentate, verrà effettuata in una seconda fase del lavoro, osservando anche le componenti orizzontali del moto.

Le velocità medie della componente di spostamento verticale delle sei stazioni GPS, sono state quindi utilizzate per calibrare il dato SqueeSAR™ a piena risoluzione. La calibrazione si è basata sulla **stima delle differenze** tra gli spostamenti misurati con tecnica SqueeSAR™ e quelli forniti dalle stazioni permanenti GPS.

Per effettuare la stima delle differenze è stato necessario definire una **corrispondenza tra le stazioni GPS ed i bersagli radar**. Date le diverse caratteristiche di queste due tecniche di monitoraggio, una corrispondenza biunivoca tra i punti di misura delle due tecniche risulta molto improbabile. Pertanto il confronto è stato effettuato selezionando sul dato SqueeSAR™ a piena risoluzione i punti di misura nell'intorno delle stazioni GPS che, per posizione e velocità media nello stesso periodo coperto dalle misure GPS, sono risultati più rappresentativi. Le velocità dei punti selezionati sono state quindi mediate, attribuendo a ciascun punto di misura un peso sulla base della sua coerenza (cfr. Appendice II). I valori così ottenuti sono stati utilizzati per il calcolo delle differenze con le misure GPS.

Si precisa che in sede di calibrazione finale - nella seconda fase del lavoro - potranno essere utilizzate anche altre procedure di confronto, al fine di ottimizzare i risultati.

In Figura 14 sono mostrati i dati a piena risoluzione nell'intorno delle stazioni GPS, evidenziando i punti di misura selezionati per il calcolo del valore medio utilizzato nel confronto con i dati GPS. Il criterio di selezione dei punti più rappresentativi, si è basato non solo sulla posizione dei punti rispetto alla stazione permanente GPS, ma anche sull'omogeneità dei valori di velocità media nel periodo coperto dalle misure GPS. In Tabella 5 sono riportate alcune statistiche relative ai punti di misura selezionati per il confronto con le misure GPS.

Dalle differenze ottenute è stato possibile individuare e rimuovere dai dati SqueeSAR™ l'effetto di una componente di velocità di bassa frequenza (un piano, Figura 15), dovuta principalmente ad errori orbitali.

In Tabella 6 sono riportate le differenze residue dopo l'eliminazione del piano stimato. Si noti che le stazioni ITIM e REGG sono quelle che presentano i residui più elevati (si allontanano maggiormente dal piano stimato).

Il campo di velocità verticale complessivo, risultante dalla calibrazione preliminare, è mostrato in Figura 16. In Figura 17, Figura 18, Figura 19 e Figura 20 sono mostrate nel dettaglio alcune delle aree ad alto tasso di subsidenza.

Per una migliore visualizzazione dei fenomeni deformativi si sono utilizzate scale cromatiche saturate diversamente: le scale più ampie permettono di caratterizzare meglio le aree con velocità di subsidenza maggiore; le scale meno ampie permettono di apprezzare anche tassi di subsidenza più bassi. In Figura 21 e Figura 22 è riportato il particolare dell'area di Bologna, con le serie storiche dei movimenti verticali degli stessi punti di misura già evidenziati sui dati SqueeSAR™ originali di Figura 11 e Figura 12.



Fig. 14 - Distribuzione dei punti di misura individuati nell'analisi SqueeSAR™ a piena risoluzione nell'intorno delle stazioni GPS; sono evidenziati in rosso i punti di misura selezionati per il confronto con i dati GPS.

Tab. 5 - Informazioni quantitative sui punti di misura selezionati per il confronto con i dati GPS. Le velocità verticali medie si riferiscono allo stesso periodo coperto dai dati GPS (diverso per ogni GPS).

Nome stazione	Velocità GPS (mm/anno)	Numero punti	Velocità verticale media (mm/anno)	Velocità verticale massima (mm/anno)	Velocità verticale minima (mm/anno)	Deviazione standard
CODI	-1.88±0.17	8	1.18	2.5	-0.32	1.12
GUAS	-0.09±0.72	8	1.66	2.43	0.76	0.59
ITIM	-0.58±0.32	3	4.86	5.8	3.97	0.92
ITRN	-1.69±0.31	5	4.1	4.76	2.9	0.75
PIAC	1.03±0.66	13	0.14	2.59	-1.7	1.08
REGG	-0.83±0.29	7	1.14	1.21	-1.91	1.14

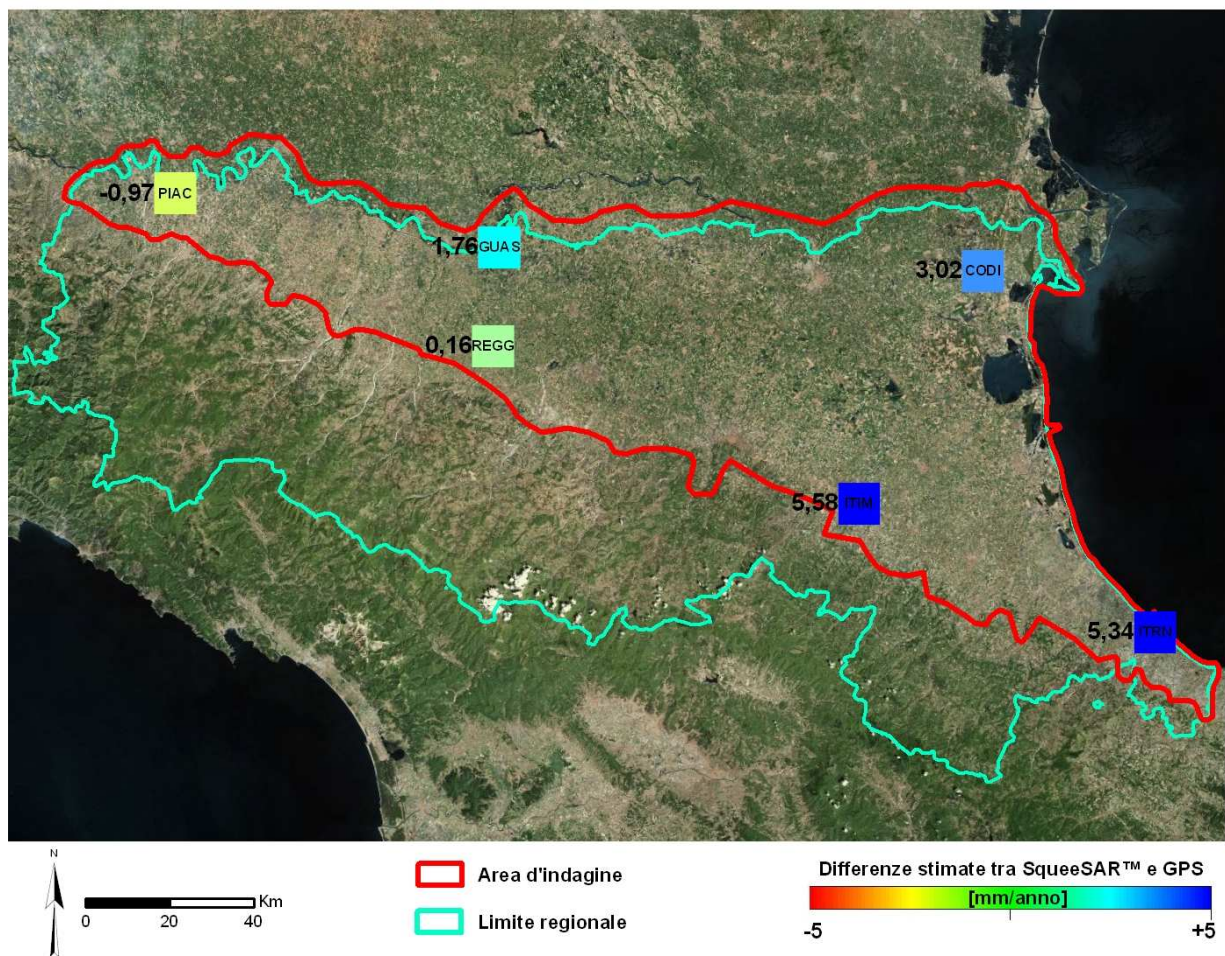


Fig. 15 - Differenze stimate tra i dati SqueeSAR™ e le sei stazioni permanenti GPS, da cui è stato possibile individuare e rimuovere l'effetto di una componente di velocità a bassa frequenza (un piano).

Nome stazione	Residui post-calibrazione (mm/anno)
CODI	-0.30
GUAS	+0.83
ITIM	+1.59
ITRN	-0.72
PIAC	-0.12
REGG	-1.27

Tab. 6 - Residui dopo la rimozione del piano (calibrazione).

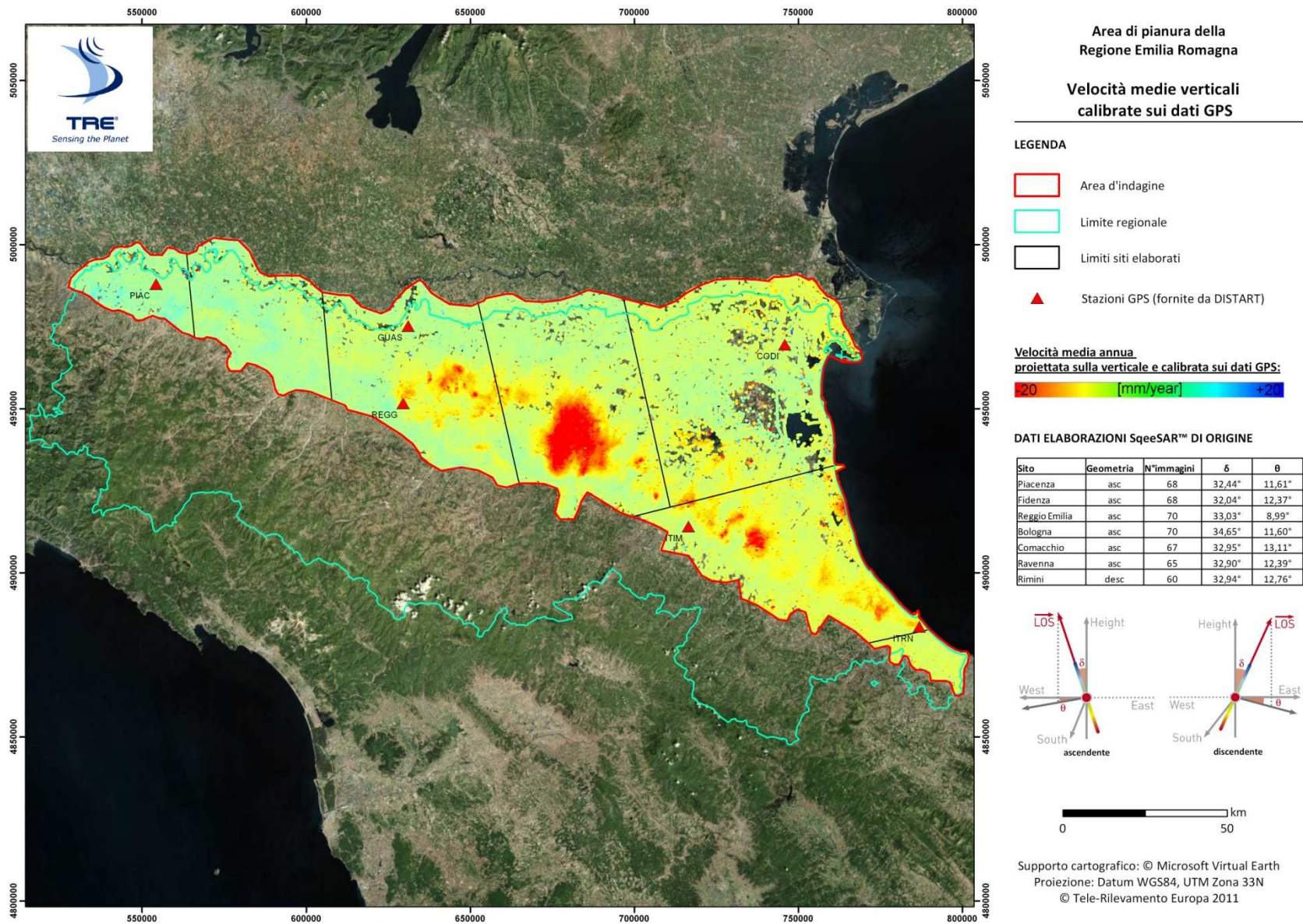


Fig. 16 - Visione d'insieme delle velocità verticali risultanti dalla calibrazione preliminare tramite sei stazioni GPS.

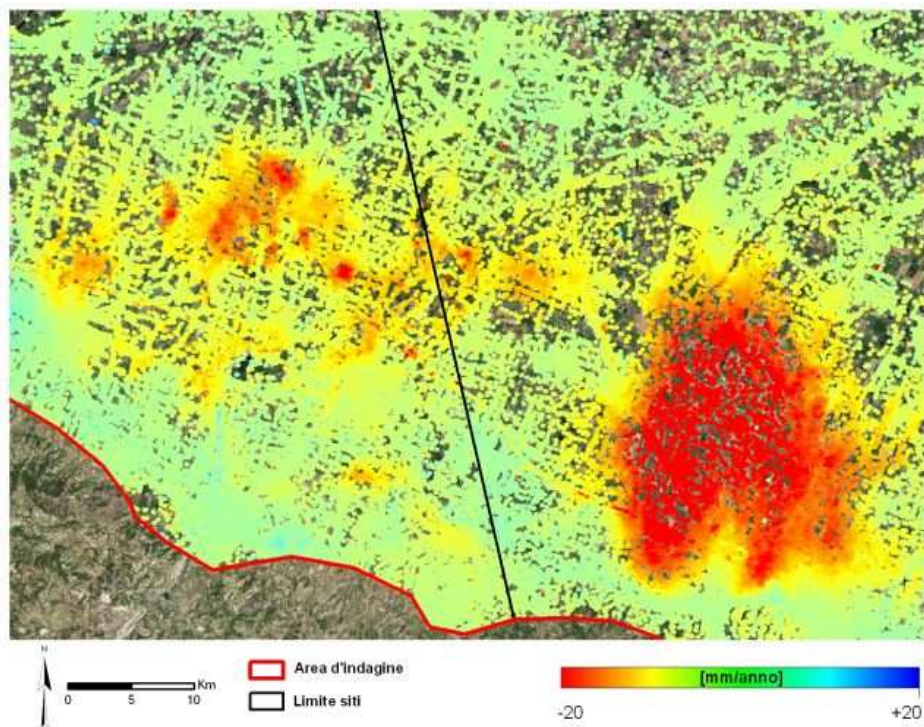
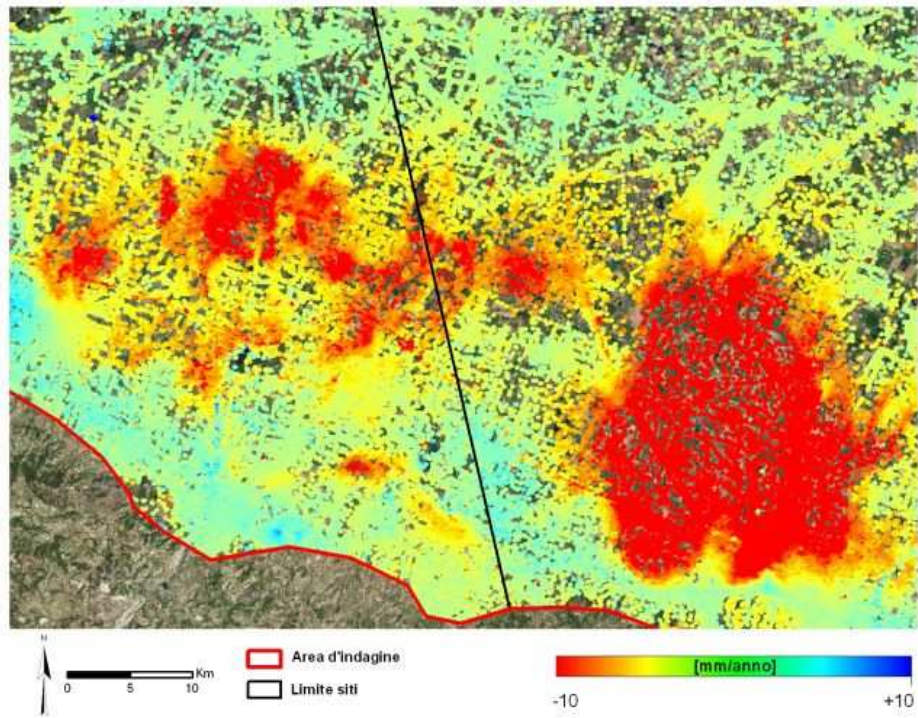


Fig. 17 - Dettaglio sui siti di Bologna e Reggio Emilia: in alto la scala cromatica è saturata a ± 10 mm/anno, in basso la scala cromatica è saturata a ± 20 mm/anno.

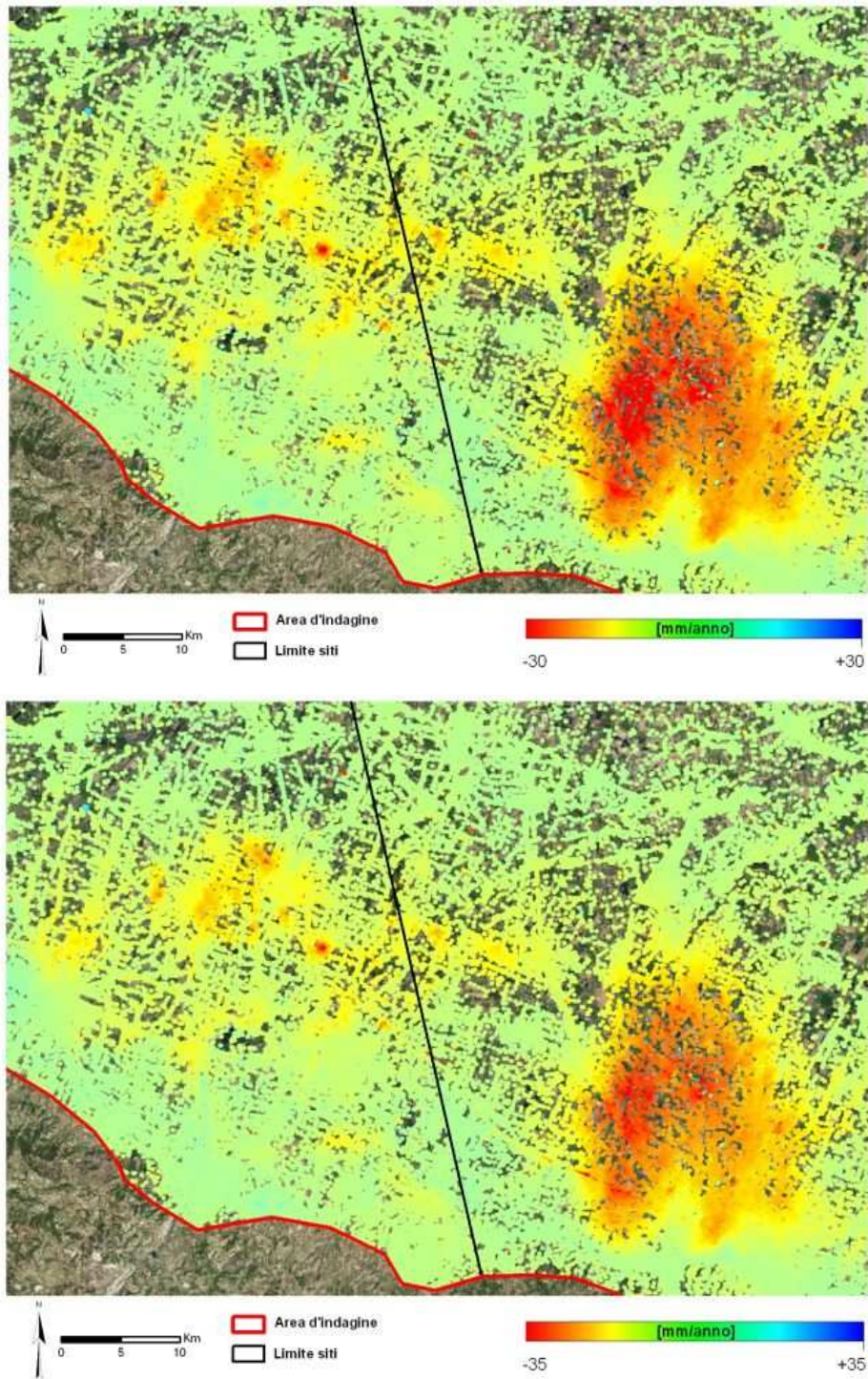


Fig. 18 - Dettaglio sui siti di Bologna e Reggio Emilia: in alto la scala cromatica è saturata a ± 30 mm/anno, in basso la scala cromatica è saturata a ± 35 mm/anno.

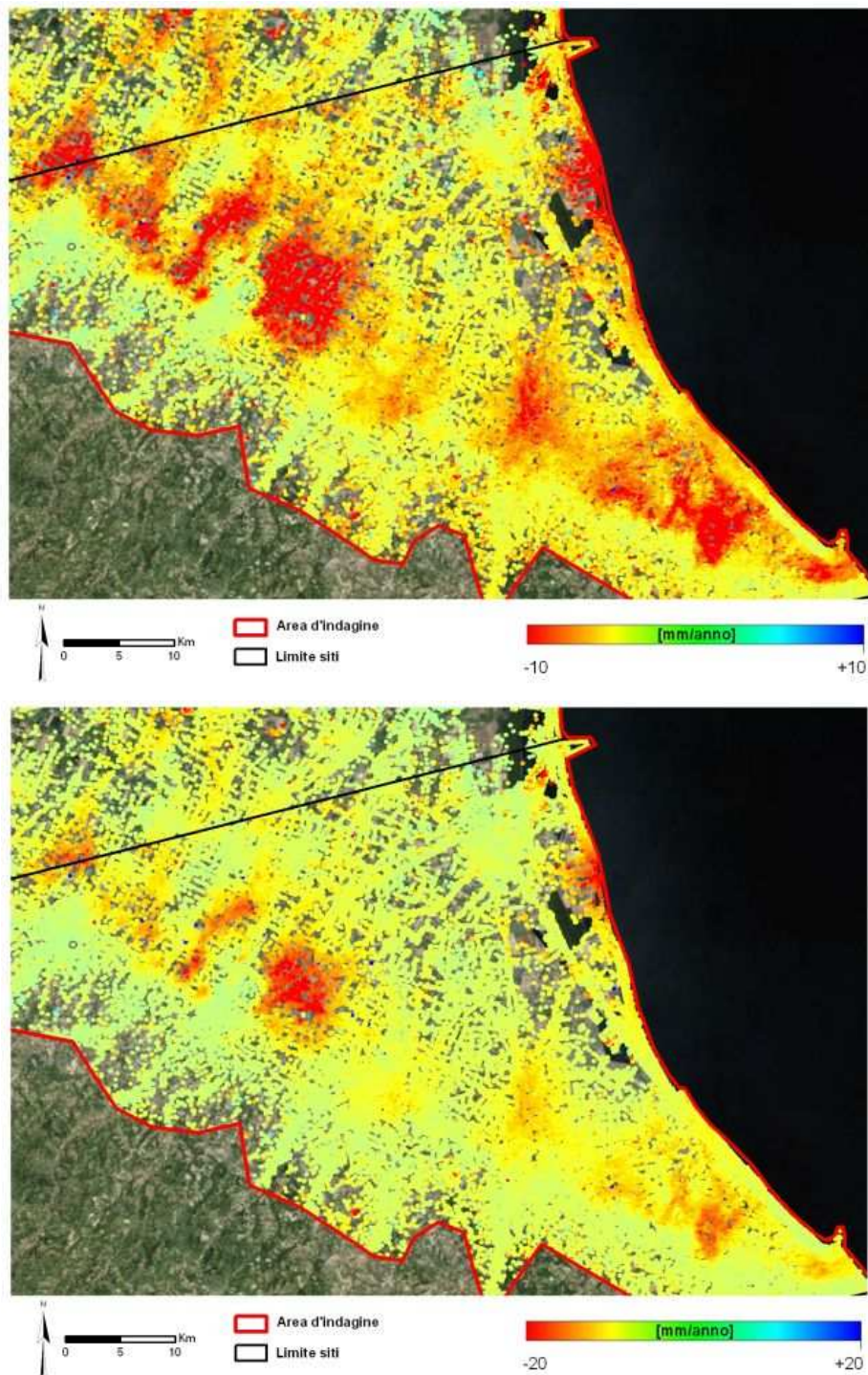


Fig. 19 - Dettaglio sul sito di Ravenna: in alto la scala cromatica è saturata a ± 10 mm/anno, in basso la scala cromatica è saturata a ± 20 mm/anno.

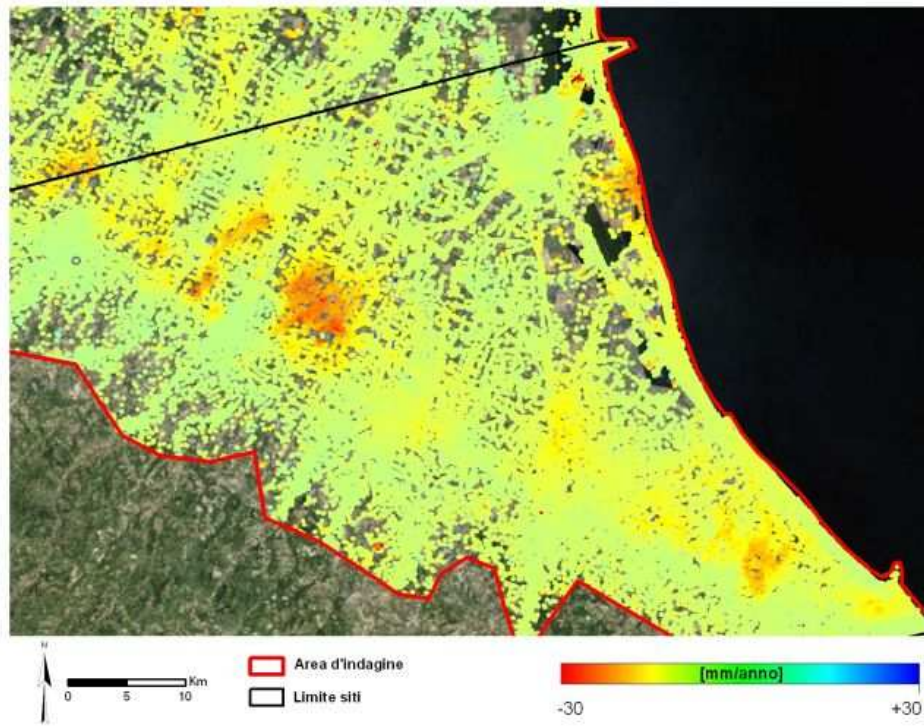


Fig. 20 - Dettaglio sul sito di Ravenna: la scala cromatica è saturata a ± 30 mm/anno.

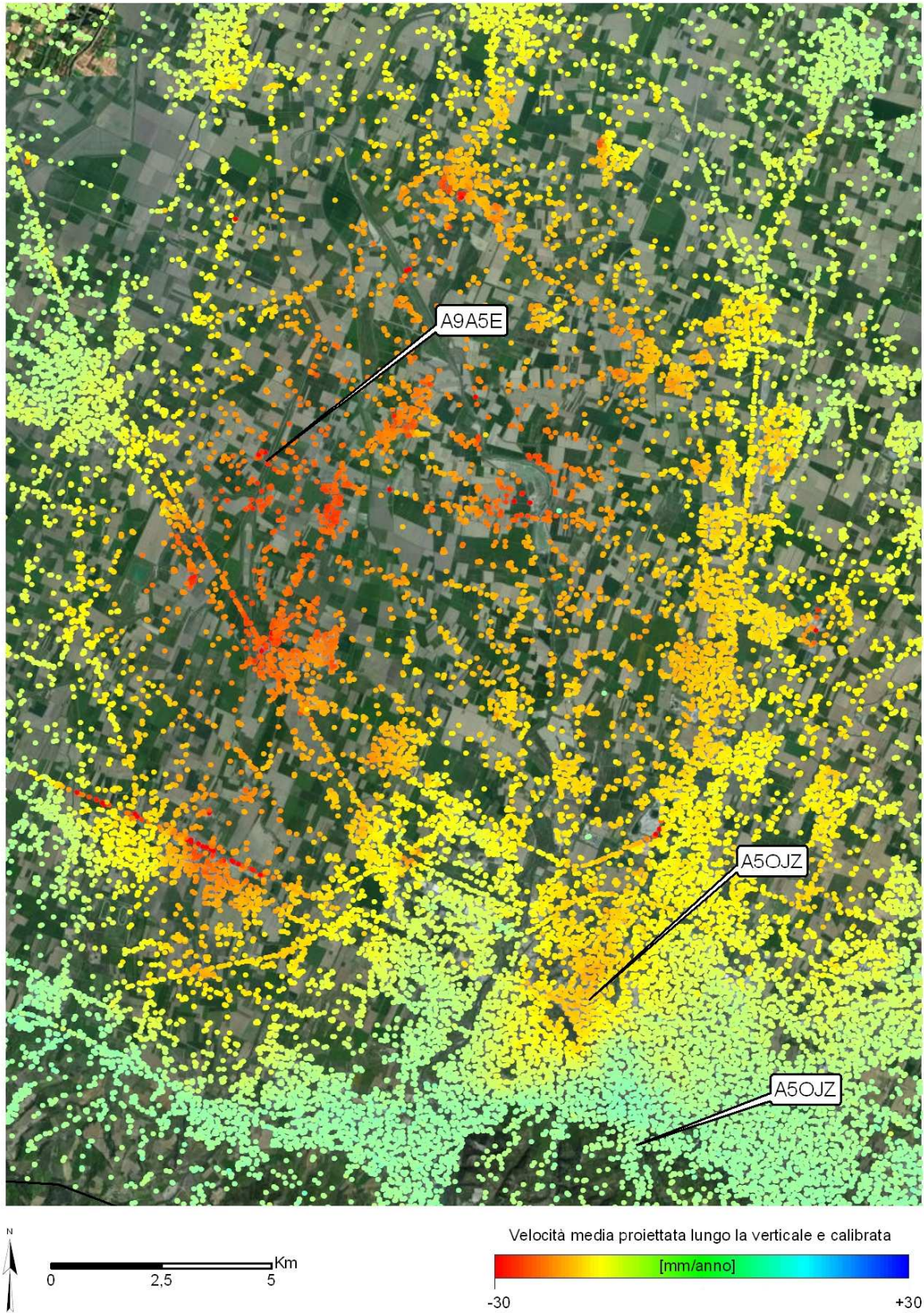


Fig. 21 - Particolare dell'area di Bologna. Sono evidenziate i punti le cui serie storiche sono riportate in Figura 22.

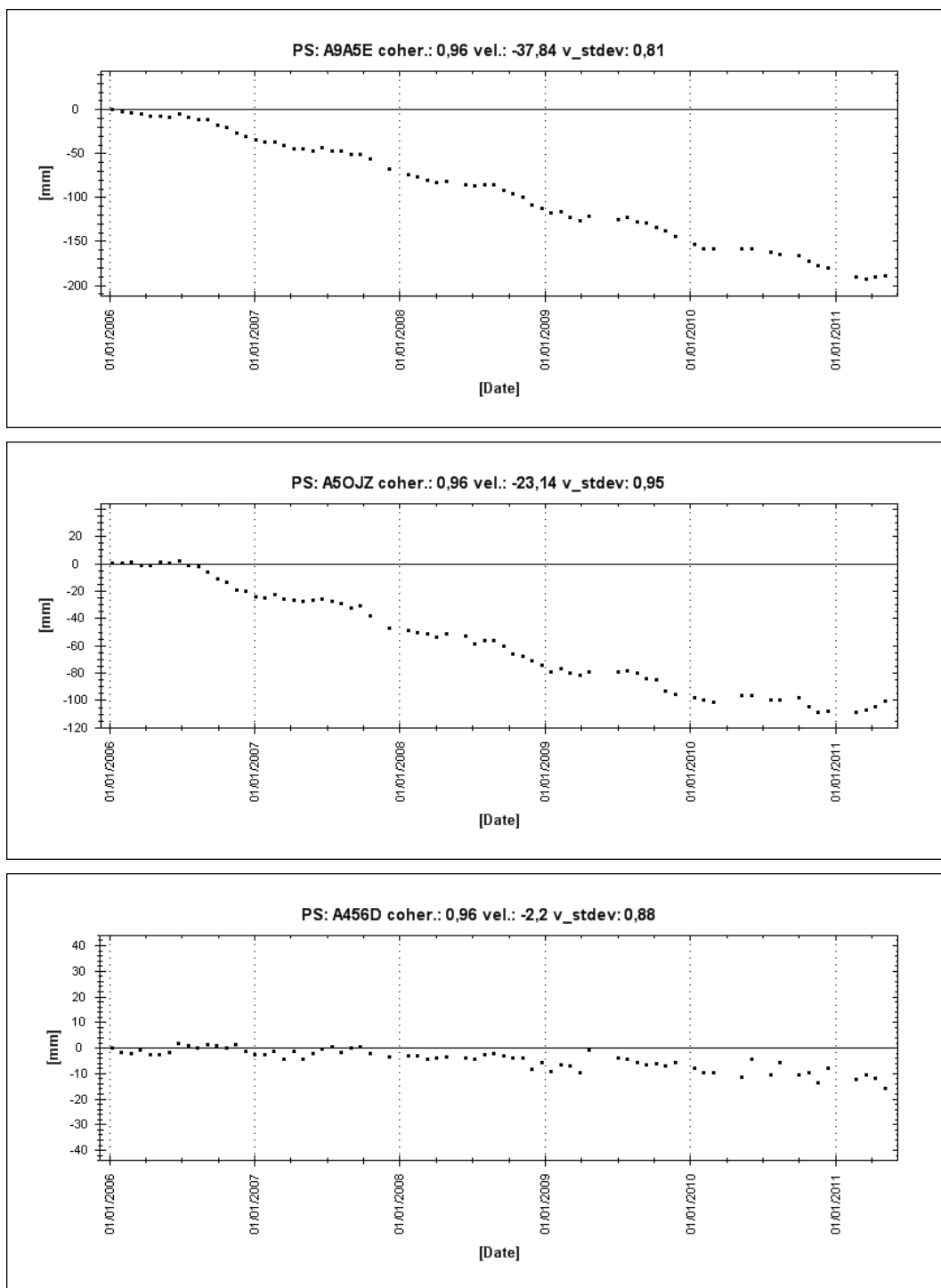


Fig. 22 - Serie storiche degli spostamenti per i punti evidenziati in Figura 21.

3. Elaborazione delle stazioni permanenti GPS

3.1 Introduzione

L'attività consiste nel calcolo di serie temporali GPS acquisite da stazioni permanenti GPS presenti nell'area d'indagine, dato essenziale ai fini della determinazione dei movimenti verticali del suolo a scala regionale mediante analisi interferometrica differenziale di immagini satellitari SAR.

Il GPS (acronimo e abbreviazione di NAVSTAR-GPS, NAVigation Satellite Time and Ranging - **G**lobal **P**ositioning **S**ystem) 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. La qualità delle variazioni delle coordinate tridimensionali nel tempo, determinate per ciascuna stazione, diviene molto elevata (qualche decimo di mm/anno) se l'acquisizione si effettua per intervalli di tempo molto prolungati (di almeno 2.5 anni).

3.2 Definizione della Rete di inquadramento

Al fine di 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 alle reti *IGS* (International GNSS Service) e/o *EUREF* (Reference Frame Sub-Commission for Europe della IAG, International Association of Geodesy) rispetto alle quali effettuare il calcolo delle posizioni giornaliere delle stazioni incognite. Sono state pertanto individuate le 13 stazioni geodetiche contraddistinte dalle sigle internazionali: *CAGL*, *GENO*, *GRAS*, *GRAZ*, *IENG*, *LAMP*, *MATE*, *MEDI*, *NOT1*, *PADO*, *SOFI*, *WTZR*, *ZIMM*, la cui ubicazione è riportata in Figura 23.

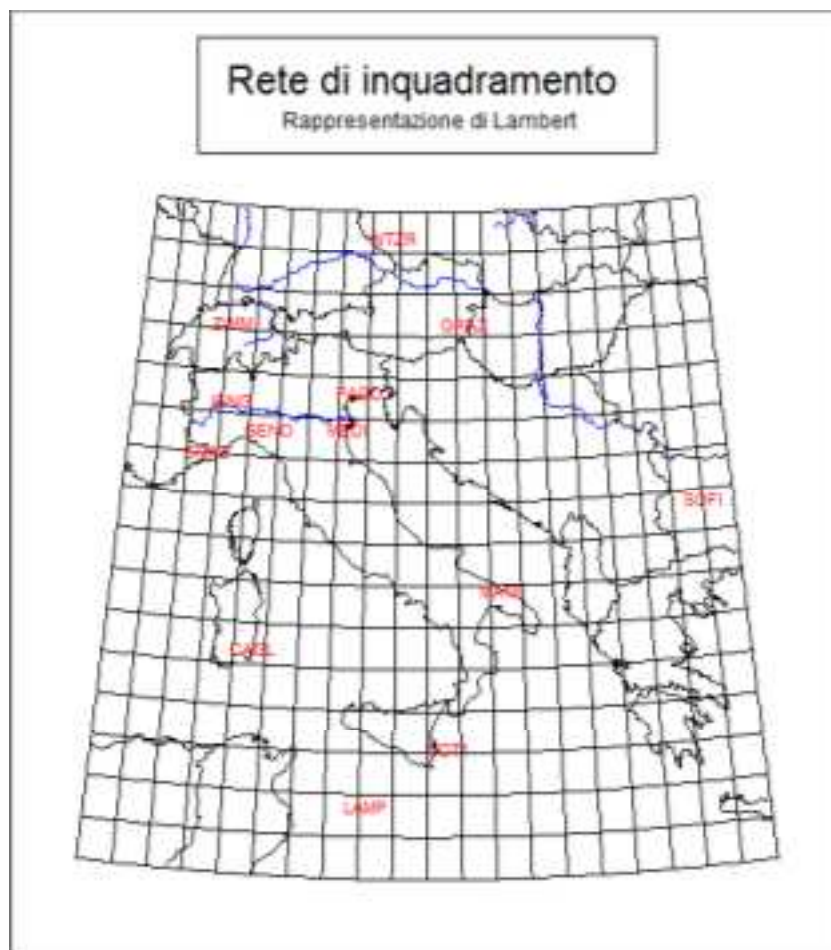


Fig. 23 - Ubicazione delle stazioni IGS e/o EUREF facenti parte della rete di inquadramento utilizzata per il calcolo delle posizioni e delle velocità delle stazioni poste nell'area di pianura della regione Emilia-Romagna.

Le acquisizioni giornaliere, effettuate con intervallo di campionamento di 30 secondi, sono state raccolte per le stazioni suddette a partire dal 2007 fino alla metà del mese di maggio 2011. Questo archivio di dati è stato poi completato con l'acquisizione delle effemeridi precise dei satelliti, i modelli ionosferici globali IGS, i parametri di orientamento terrestre, le calibrazioni assolute delle antenne dei satelliti e dei ricevitori a terra, nonché con il modello di marea adattato alle posizioni delle stazioni analizzate; è stato inoltre necessario acquisire le coordinate di riferimento e le velocità (ITRF2008) delle singole stazioni ed un elenco delle eventuali discontinuità evidenziate nei loro report file, dovute a cambi nella configurazione strumentale o modifiche nei manufatti.

3.3 Stazioni permanenti GPS analizzate

Dopo aver effettuato un preliminare censimento delle stazioni permanenti GPS presenti nell'area d'indagine, sono state individuate quelle attive da almeno tre anni per le quali potessero essere rese disponibili le acquisizioni giornaliere con intervallo di campionamento di 30 secondi.

Complessivamente sono state individuate 24 stazioni ubicate in aree di pianura; ma solo per 17 di esse sono stati resi disponibili liberamente in rete i dati di acquisizione in formato RINEX. Per le ulteriori 7 stazioni i dati sono stati archiviati e le serie temporali sono state analizzate, ma attualmente sussistono alcuni vincoli alla libera diffusione di tali dati.

Le stazioni riportate in Tabella 7 appartengono a tre diverse infrastrutture geodetiche:

- **tre** stazioni fanno parte delle reti globali scientifiche IGS-EUREF;
- **quattro** stazioni appartengono alla Rete Nazionale Integrata Gps (RING) dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, materializzata principalmente per studi di geodinamica attuale;
- **dieci** stazioni sono parte della rete di stazioni permanenti GNSS istituita dalla Società Geometri Emilia-Romagna (SoGER) per scopi tecnici, in particolare per il posizionamento topografico di precisione in tempo reale.

Va osservato che la stazione INGV di San Benedetto PO (SBPO), pur trovandosi una decina di km a nord del confine regionale, è stata utilizzata poiché è comunque situata a sud del Fiume Po, e quindi potrebbe essere ugualmente utile al fine di una integrazione con l'analisi SAR.

Tab. 7 - Posizioni e denominazioni delle stazioni permanenti GPS analizzate.

ID	Stazione	Prov.	Rete	Latitudine	Longitudine
1	BOLG	BO	RETE	N 44° 30' 00.78"	E 11° 21' 24.39"
2	MEDI	BO	IGS-EUREF	N 44° 31' 11.85"	E 11° 38' 48.54"
3	MOPS	MO		N 44° 37' 45.67"	E 10° 56' 57.10"
4	MODE	MO		RETE INGV RING	N 44° 37' 44.23"
5	PARM	PR	N 44° 45' 52.45"		E 10° 18' 43.87"
6	SBPO	MN	N 45° 03' 03.60"		E 10° 55' 11.17"
7	SGIP	BO	N 44° 38' 07.90"		E 11° 10' 57.78"
8	CODI	FE	RETE SoGER	N 44° 50' 12.03"	E 12° 06' 43.10"
9	COLL	PR		N 44° 45' 10.13"	E 10° 12' 57.52"
10	FERR	FE		N 44° 49' 40.28"	E 11° 36' 04.57"
11	GUAS	RE		N 44° 55' 03.93"	E 10° 39' 44.23"
12	ITIM	BO		N 44° 20' 50.99"	E 11° 43' 04.55"
13	ITRN	RN		N 44° 02' 53.95"	E 12° 34' 55.48"
14	PERS	BO		N 44° 38' 42.95"	E 11° 11' 23.25"
15	PIAC	PC		N 45° 02' 35.34"	E 09° 41' 23.06"
16	RAVE	RA		N 44° 24' 19.06"	E 12° 11' 30.77"
17	REGG	RE		N 44° 42' 22.94"	E 10° 38' 12.67"

Per ciascuna di queste 17 stazioni (Figura 24) sono state acquisite le osservazioni grezze effettuate dai ricevitori satellitari, basate sullo sfasamento dei segnali di codice e di fase delle portanti GPS. Come passo di campionamento è stato mantenuto quello di 30 secondi, secondo gli standard internazionali per il posizionamento statico mediante soluzioni giornaliere, anche se in realtà molte di queste stazioni effettuano misure con passo di campionamento di 1 secondo, per consentire il posizionamento in tempo reale.

Tali misure sono state opportunamente organizzate a livello informatico, assieme alle osservazioni contemporanee acquisite dalle 13 stazioni permanenti di inquadramento indicate in Figura 23.

L'approccio di calcolo si è basato su un'analisi alle doppie differenze di fase realizzata mediante software scientifico Bernese GPS V. 5.0. 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 ben consolidato che è alla base del posizionamento di alta precisione utilizzato anche per la misura delle reti globali, quale quella del servizio IGS, che contribuiscono a loro volta alla definizione del sistema di riferimento terrestre internazionale ITRF.

In questo caso i ricevitori sono fissi sui vertici da misurare per l'intera durata della sessione di osservazione e ricevono, per quanto permesso da eventuali ostacoli locali, la stessa costellazione di satelliti simultaneamente. In virtù di questo è possibile, attraverso appropriate combinazioni lineari delle osservazioni, eliminare o almeno ridurre fortemente l'effetto di alcuni sistematismi che perturbano in modo significativo le soluzioni GPS, raggiungendo accuratissime centimetriche e subcentimetriche nella stima delle posizioni giornaliere.

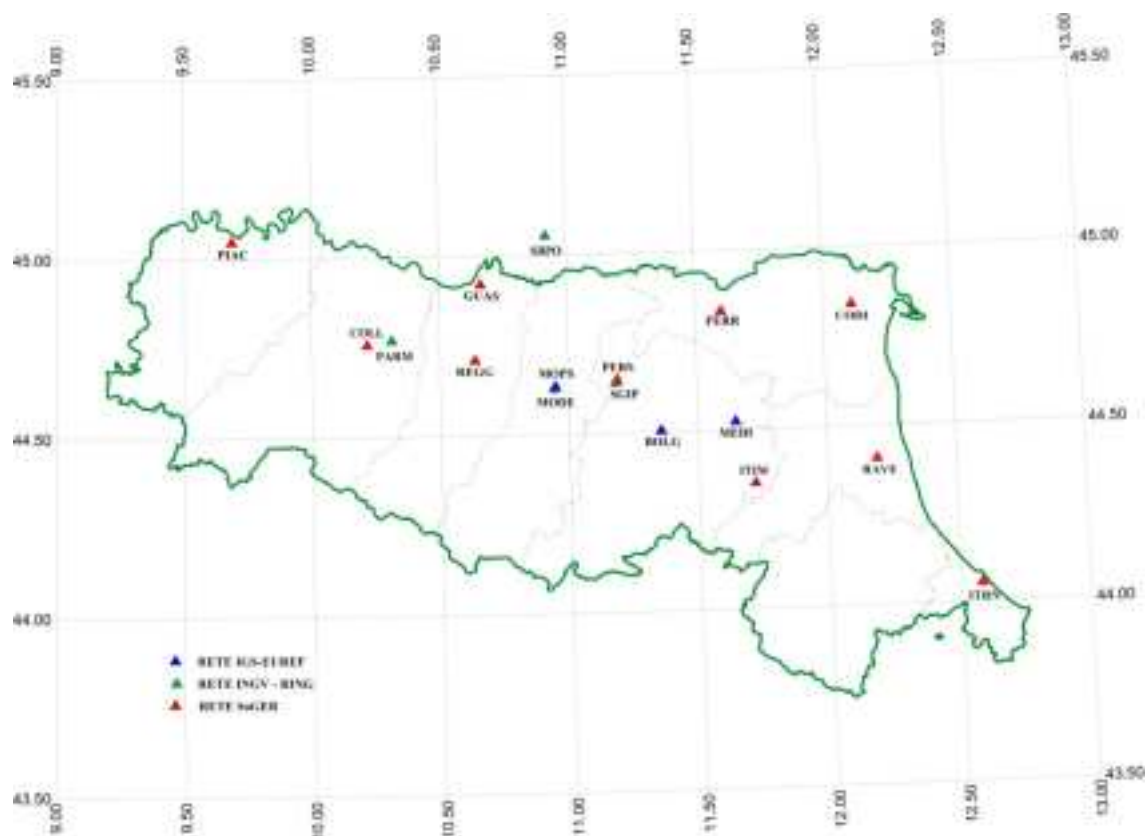


Fig. 24 - Ubicazione delle stazioni permanenti indicate in Tabella 7.

Attraverso la realizzazione di apposite procedure di calcolo automatizzate è stata analizzata per ciascuna giornata di misura degli oltre tre anni considerati 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 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 v5.0*, automatizzando l'analisi attraverso il *Bernese Processing Engine (BPE)*.

I principali parametri di elaborazione possono essere così sintetizzati:

- analisi tradizionale alle doppie differenze di fase;
- campionamento a 30s, mediante l'impiego di orbite precise e parametri di orientamento terrestre (ERP) pubblicati dalle agenzie internazionali IGS,
- angolo di cut-off fissato a 10° rispetto all'orizzonte locale;
- le stime a priori per i ritardi troposferici sono state calcolate usando la funzione mappante Dry Niell per la parte idrostatica, mentre i parametri lineari troposferici sono stati stimati con intervallo di 1-h usando la Niell mapping function 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*);
- 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 *ITRF2008* delle stazioni permanenti IGS incluse nella rete di inquadramento;

Nel corso del *processing* i dati di *output* giornalieri sono stati archiviati in appositi direttori, utilizzando un formato standard per le soluzioni denominato *Solution (Software/technique) INdependent EXchange format (SINEX)*. Terminata l'elaborazione dell'intero periodo di acquisizione sono state estratte dalle soluzioni *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 secondo le direzioni Nord, Est, 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 locale anche la matrice di varianza e covarianza associata alle soluzioni stesse.

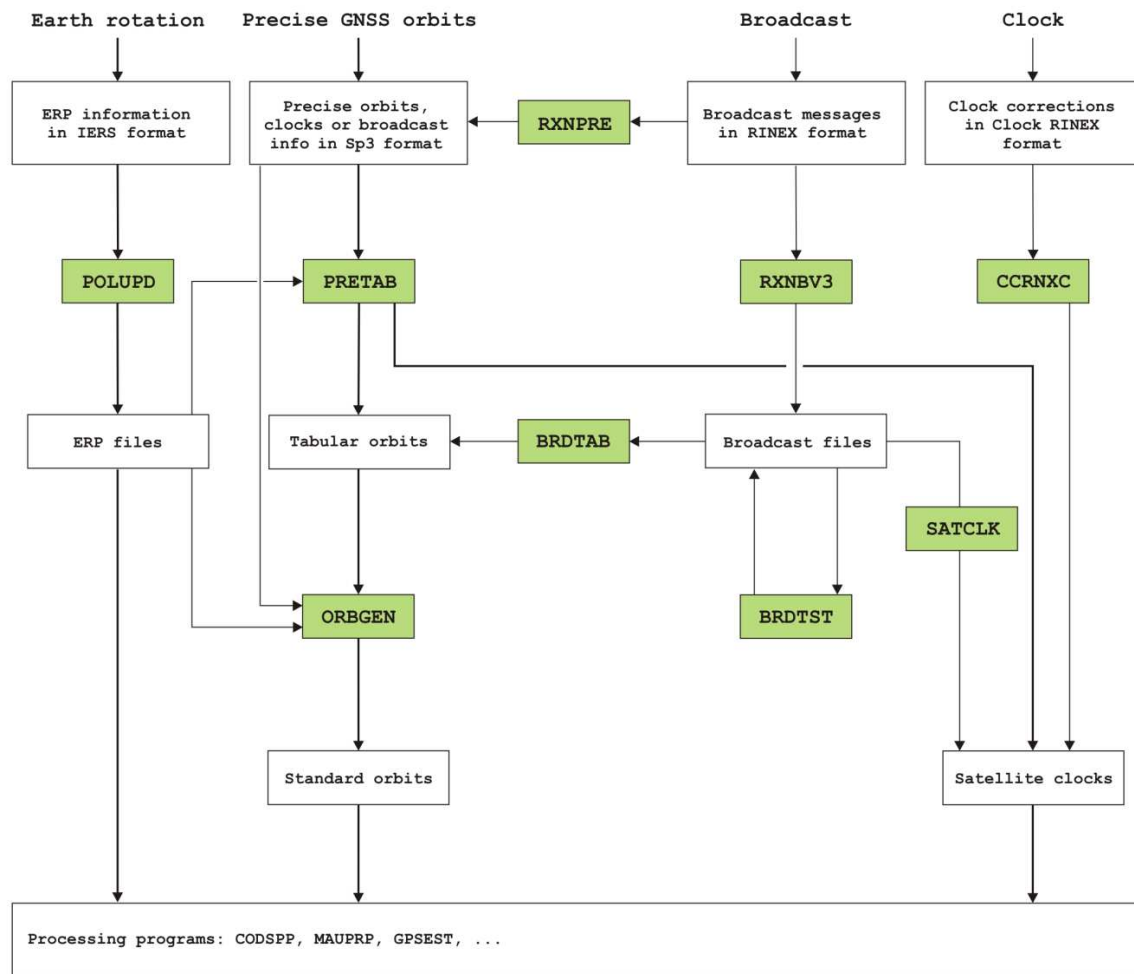


Fig. 25 - Diagramma dei diversi moduli che compongono il Software Bernese v5.0 per la preparazione dei dati di input. In colore sono indicati i principali moduli eseguibili.

3.5 Stima delle velocità di movimento

Le serie temporali così ottenute sono state trattate con un *tool* specifico 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 Nord, Est e Up, nonché il calcolo delle componenti periodiche con frequenza annuale e semi-annuale.

Nel seguito si riportano le analisi di dettaglio effettuate per ognuna delle 17 stazioni elaborate. In particolare in ciascuna stazione sono riportate le analisi effettuate dei residui *detrended* delle serie temporali, secondo le componenti Nord, Est, Up; sono evidenziate in rosso le velocità orizzontali e verticali ottenute dall'analisi delle serie temporali calcolate nel sistema geocentrico ITRF2008 e trasformate nel sistema geodetico locale. Le velocità planimetriche così stimate sono in gran parte espressione delle velocità di deriva continentale della placca euroasiatica.

In particolare, per l'analisi delle serie temporali delle stazioni BOLG (Bologna) e ITRN (Rimini), è stato necessario inserire rispettivamente due discontinuità per la stazione BOLG e una per la stazione ITRN (indicate nei grafici da linee verticali verdi). Per la stazione BOLG sono state assunte le discontinuità presenti nell'analisi della rete EUREF Permanent Network (EPN) <http://epncb.oma.be/>, mentre per la stazione di Rimini dopo una verifica presso i

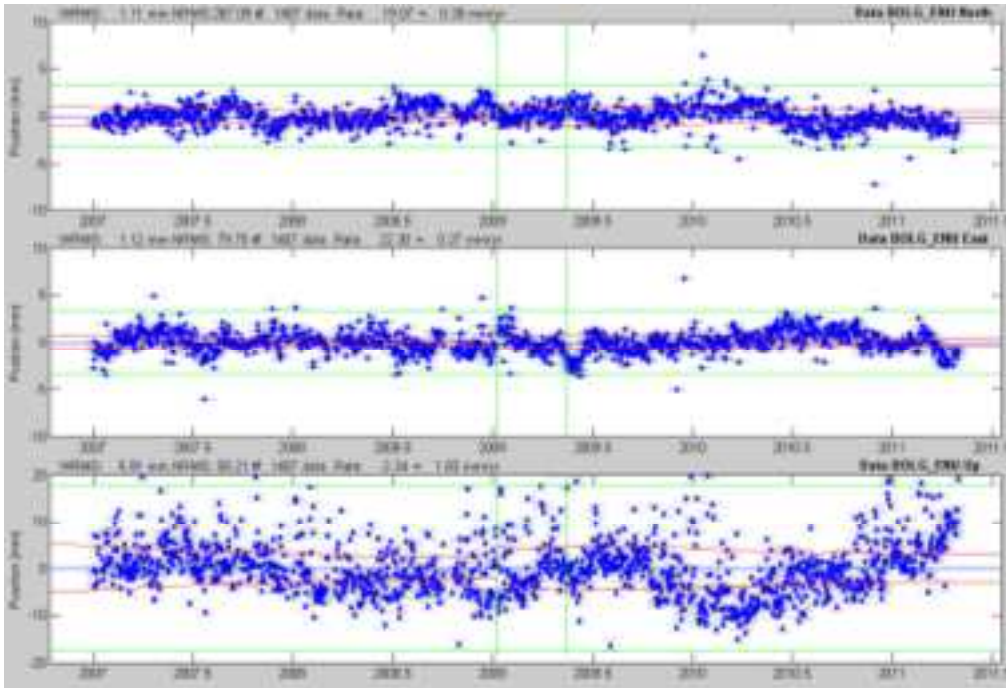
gestori della rete SoGER. Per entrambe le stazioni le discontinuità sono state causate da attività di manutenzione presso il manufatto di sostegno dell' antenna.

Nella Tabella 8 si riporta un estratto delle velocità, secondo la componente verticale, stimate per le diverse stazioni.

Codice Stazione	Velocità di movimento verticale (mm/anno)
BOLG	-2.34 ± 1.83
CODI	-1.88 ± 0.18
COLL	0.48 ± 0.50
FERR	0.92 ± 0.24
GUAS	-0.09 ± 0.57
ITIM	-0.58 ± 0.29
ITRN	-1.69 ± 0.33
MEDI	-1.28 ± 0.21
MODE	-3.58 ± 1.95
MOPS	-1.69 ± 1.72
PARM	2.95 ± 0.44
PERS	-8.08 ± 0.36
PIAC	1.03 ± 0.66
RAVE	-4.78 ± 0.37
REGG	-0.83 ± 0.35
SBPO	1.13 ± 0.25
SGIP	-4.96 ± 0.25

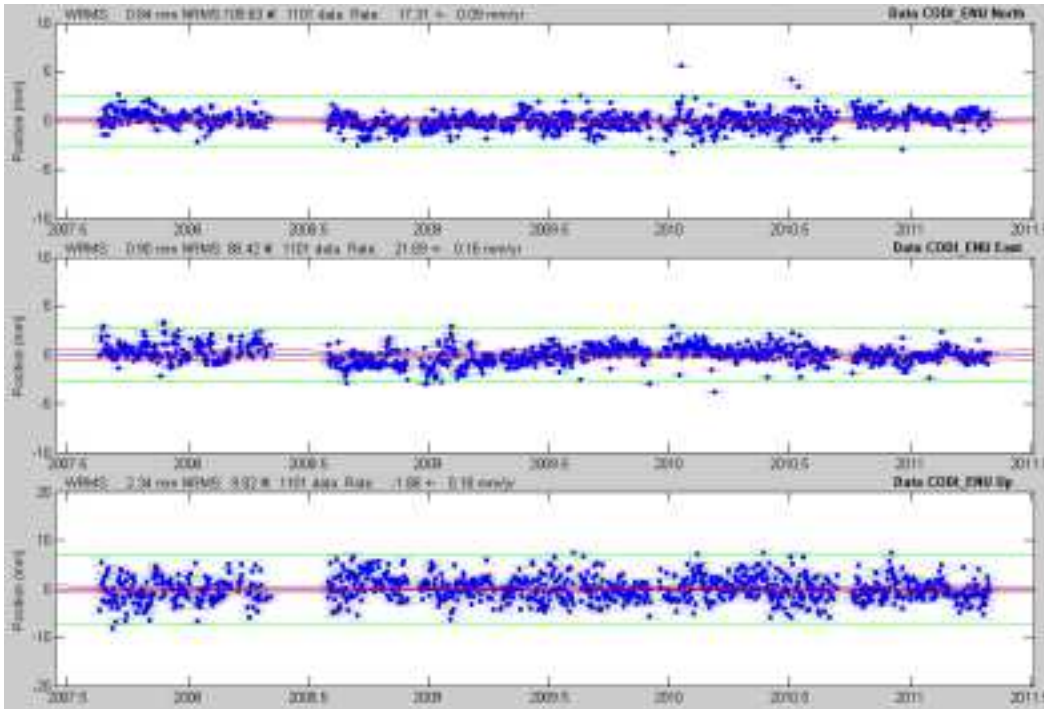
Tab. 8 - Velocità verticali stimate dall'analisi delle serie temporali GPS nel periodo analizzato.

Stazione BOLG (Bologna)



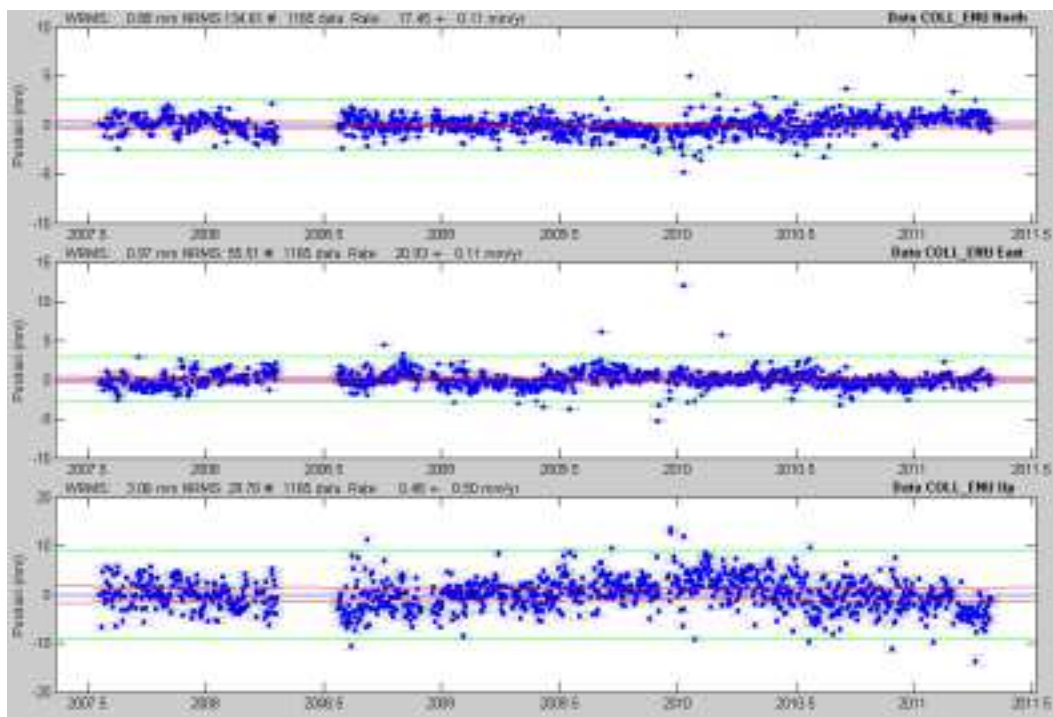
<p>Computing Realistic Sigmas RealSigma white dchi 28.626486 NRMS Realistic 267.09; Correlation time 128.00 days Detrend of BOLG_ENU North WRMS: 1.11 mm NRMS:267.09 #: 1407 data Mean -2.56 +- 0.54 mm Rate 19.07 +- 0.38 mm/yr Annual Cos 0.13 +- 0.29 mm Annual Sin -0.26 +- 0.30 mm SemiAnnual Cos -0.09 +- 0.29 mm SemiAnnual Sin 0.01 +- 0.29 mm Break 2009 1 8 6 1 0.29 +- 0.89 mm Break 2009 5 14 6 30 -1.55 +- 0.86 mm</p>	<p>Computing Realistic Sigmas RealSigma white dchi 10.683413 NRMS Realistic 79.70; Correlation time 64.00 days Detrend of BOLG_ENU East WRMS: 1.12 mm NRMS: 79.70 #: 1407 data Mean -3.27 +- 0.40 mm Rate 22.30 +- 0.27 mm/yr Annual Cos 2.40 +- 0.22 mm Annual Sin 0.83 +- 0.22 mm SemiAnnual Cos -0.18 +- 0.21 mm SemiAnnual Sin -0.36 +- 0.21 mm Break 2009 1 8 6 1 -2.01 +- 0.63 mm Break 2009 5 14 6 30 4.05 +- 0.63 mm</p>
<p>Computing Realistic Sigmas RealSigma white dchi 6.146431 NRMS Realistic 58.21; Correlation time 128.00 days Detrend of BOLG_ENU Up WRMS: 5.91 mm NRMS: 58.21 #: 1407 data Mean 41.31 +- 2.67 mm Rate -2.34 +- 1.83 mm/yr Annual Cos -0.93 +- 1.46 mm Annual Sin 1.73 +- 1.47 mm SemiAnnual Cos 0.51 +- 1.42 mm SemiAnnual Sin 1.16 +- 1.40 mm Break 2009 1 8 6 1 13.87 +- 4.19 mm Break 2009 5 14 6 30 -54.57 +- 4.21 mm</p>	

Stazione CODI (Codigoro)



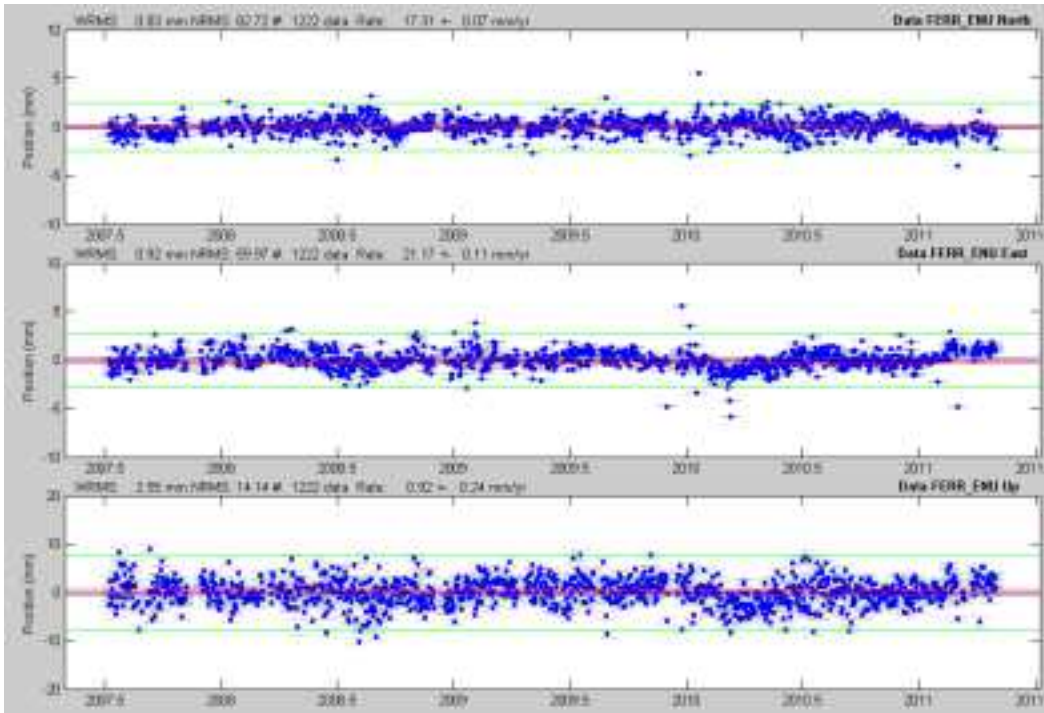
<p>Computing Realistic Sigmas</p> <p>RealSigma white dchi 23.267718</p> <p>NRMS Realistic 109.63; Correlation time 64.00 days</p> <p>Detrend of CODI_ENU North</p> <p>WRMS: 0.84 mm NRMS:109.63 #: 1101 data</p> <p>Mean 1.77 +- 0.10 mm</p> <p>Rate 17.31 +- 0.09 mm/yr</p> <p>Annual Cos -1.49 +- 0.15 mm</p> <p>Annual Sin 0.35 +- 0.14 mm</p> <p>SemiAnnual Cos 0.27 +- 0.14 mm</p> <p>SemiAnnual Sin -0.02 +- 0.13 mm</p>	<p>Computing Realistic Sigmas</p> <p>RealSigma white dchi 9.178309</p> <p>NRMS Realistic 88.42; Correlation time 128.00 days</p> <p>Detrend of CODI_ENU East</p> <p>WRMS: 0.90 mm NRMS: 88.42 #: 1101 data</p> <p>Mean 4.92 +- 0.18 mm</p> <p>Rate 21.69 +- 0.16 mm/yr</p> <p>Annual Cos 0.84 +- 0.27 mm</p> <p>Annual Sin -0.19 +- 0.25 mm</p> <p>SemiAnnual Cos -0.10 +- 0.25 mm</p> <p>SemiAnnual Sin -0.07 +- 0.25 mm</p>
<p>Computing Realistic Sigmas</p> <p>RealSigma white dchi 3.162972</p> <p>NRMS Realistic 9.82; Correlation time 32.00 days</p> <p>Detrend of CODI_ENU Up</p> <p>WRMS: 2.34 mm NRMS: 9.82 #: 1101 data</p> <p>Mean -3.91 +- 0.20 mm</p> <p>Rate -1.88 +- 0.18 mm/yr</p> <p>Annual Cos -1.09 +- 0.30 mm</p> <p>Annual Sin -0.79 +- 0.27 mm</p> <p>SemiAnnual Cos 0.17 +- 0.28 mm</p> <p>SemiAnnual Sin 0.76 +- 0.27 mm</p>	

Stazione COLL (Collecchio)



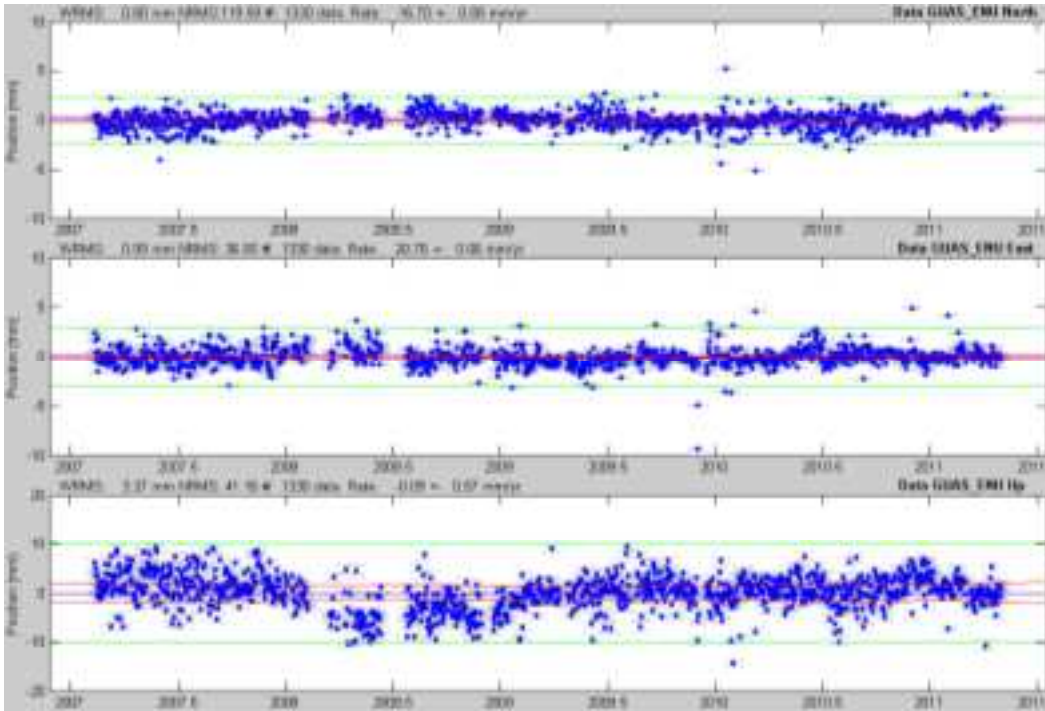
<pre> Computing Realistic Sigmas RealSigma white dchi 23.883844 NRMS Realistic 134.61; Correlation time 64.00 days Detrend of COLL_ENU North WRMS: 0.88 mm NRMS:134.61 #: 1165 data Mean 1.36 +- 0.12 mm Rate 17.45 +- 0.11 mm/yr Annual Cos 0.01 +- 0.18 mm Annual Sin 0.25 +- 0.16 mm SemiAnnual Cos -0.05 +- 0.16 mm SemiAnnual Sin -0.01 +- 0.16 mm </pre>	<pre> Computing Realistic Sigmas RealSigma white dchi 10.136657 NRMS Realistic 55.51; Correlation time 64.00 days Detrend of COLL_ENU East WRMS: 0.97 mm NRMS: 55.51 #: 1165 data Mean 6.28 +- 0.13 mm Rate 20.93 +- 0.11 mm/yr Annual Cos -0.30 +- 0.19 mm Annual Sin -1.31 +- 0.17 mm SemiAnnual Cos -0.04 +- 0.18 mm SemiAnnual Sin 0.08 +- 0.18 mm </pre>
<pre> Computing Realistic Sigmas RealSigma white dchi 3.897950 NRMS Realistic 29.70; Correlation time 128.00 days Detrend of COLL_ENU Up WRMS: 3.06 mm NRMS: 29.70 #: 1165 data Mean -4.01 +- 0.57 mm Rate 0.48 +- 0.50 mm/yr Annual Cos -0.94 +- 0.86 mm Annual Sin 2.13 +- 0.77 mm SemiAnnual Cos 0.23 +- 0.78 mm SemiAnnual Sin -0.65 +- 0.79 mm </pre>	

Stazione FERR (Ferrara)



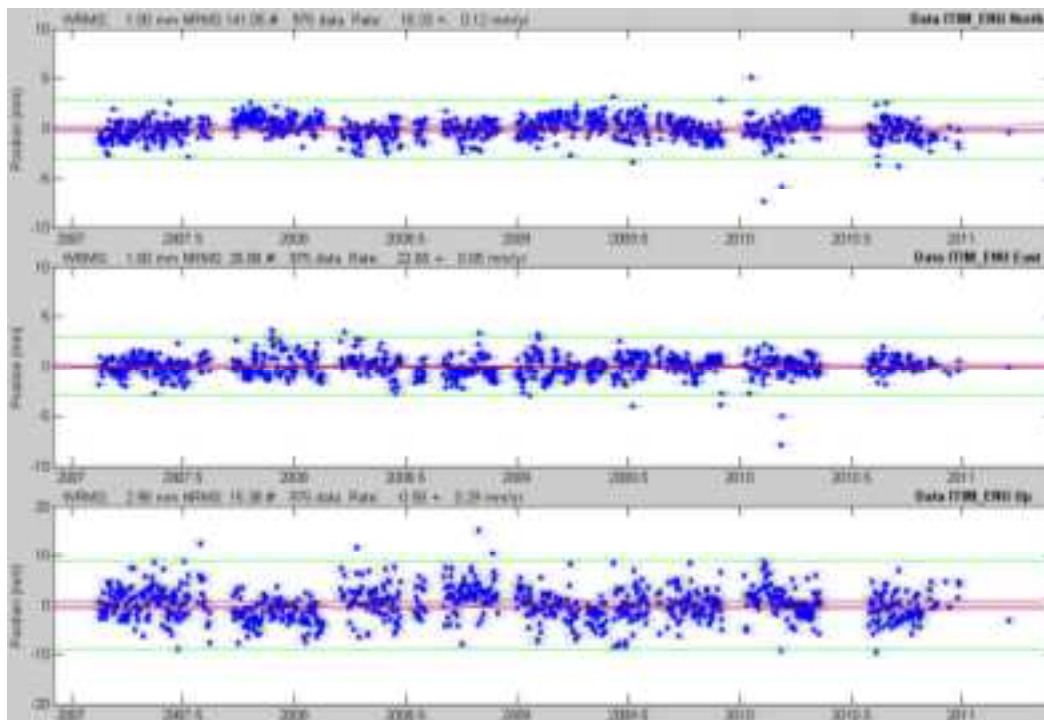
<p>Computing Realistic Sigmas</p> <p>RealSigma white dchi 23.641034</p> <p>NRMS Realistic 82.72; Correlation time 32.00 days</p> <p>Detrend of FERR_ENU North</p> <p>WRMS: 0.83 mm NRMS: 82.72 #: 1222 data</p> <p>Mean 2.57 +- 0.07 mm</p> <p>Rate 17.31 +- 0.07 mm/yr</p> <p>Annual Cos -0.67 +- 0.10 mm</p> <p>Annual Sin -0.42 +- 0.10 mm</p> <p>SemiAnnual Cos 0.16 +- 0.10 mm</p> <p>SemiAnnual Sin 0.23 +- 0.10 mm</p>	<p>Computing Realistic Sigmas</p> <p>RealSigma white dchi 9.755327</p> <p>NRMS Realistic 59.97; Correlation time 64.00 days</p> <p>Detrend of FERR_ENU East</p> <p>WRMS: 0.92 mm NRMS: 59.97 #: 1222 data</p> <p>Mean 4.31 +- 0.12 mm</p> <p>Rate 21.17 +- 0.11 mm/yr</p> <p>Annual Cos -0.07 +- 0.18 mm</p> <p>Annual Sin -0.42 +- 0.17 mm</p> <p>SemiAnnual Cos 0.04 +- 0.17 mm</p> <p>SemiAnnual Sin -0.08 +- 0.17 mm</p>
<p>Computing Realistic Sigmas</p> <p>RealSigma white dchi 3.439114</p> <p>NRMS Realistic 14.14; Correlation time 64.00 days</p> <p>Detrend of FERR_ENU Up</p> <p>WRMS: 2.55 mm NRMS: 14.14 #: 1222 data</p> <p>Mean -3.96 +- 0.26 mm</p> <p>Rate 0.92 +- 0.24 mm/yr</p> <p>Annual Cos -1.72 +- 0.38 mm</p> <p>Annual Sin -0.13 +- 0.37 mm</p> <p>SemiAnnual Cos 0.15 +- 0.36 mm</p> <p>SemiAnnual Sin 0.77 +- 0.38 mm</p>	

Stazione GUAS (Guastalla)



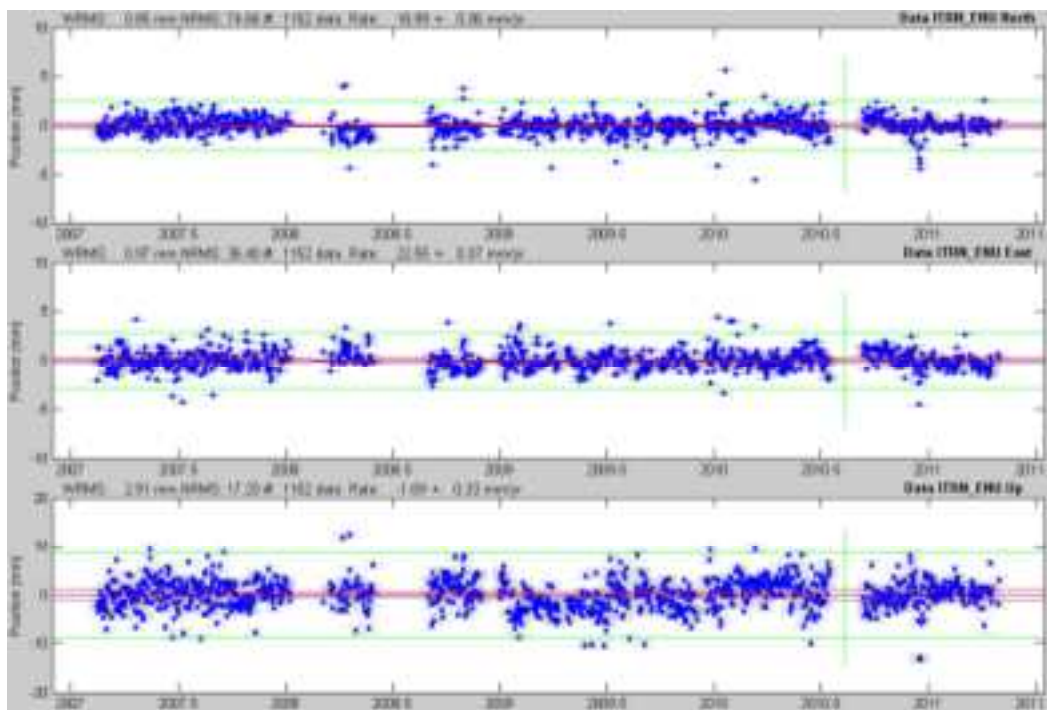
<p>Computing Realistic Sigmas</p> <p>RealSigma white dchi 23.548485</p> <p>NRMS Realistic 119.59; Correlation time 128.00 days</p> <p>Detrend of GUAS_ENU North</p> <p>WRMS: 0.80 mm NRMS:119.59 #: 1330 data</p> <p>Mean -2.12 +- 0.10 mm</p> <p>Rate 16.70 +- 0.08 mm/yr</p> <p>Annual Cos -0.58 +- 0.15 mm</p> <p>Annual Sin -0.38 +- 0.13 mm</p> <p>SemiAnnual Cos -0.01 +- 0.14 mm</p> <p>SemiAnnual Sin 0.13 +- 0.14 mm</p>	<p>Computing Realistic Sigmas</p> <p>RealSigma white dchi 11.479632</p> <p>NRMS Realistic 36.05; Correlation time 32.00 days</p> <p>Detrend of GUAS_ENU East</p> <p>WRMS: 0.99 mm NRMS: 36.05 #: 1330 data</p> <p>Mean 0.48 +- 0.07 mm</p> <p>Rate 20.76 +- 0.06 mm/yr</p> <p>Annual Cos 1.19 +- 0.11 mm</p> <p>Annual Sin -0.08 +- 0.10 mm</p> <p>SemiAnnual Cos 0.01 +- 0.10 mm</p> <p>SemiAnnual Sin -0.24 +- 0.10 mm</p>
<p>Computing Realistic Sigmas</p> <p>RealSigma white dchi 3.743475</p> <p>NRMS Realistic 41.16; Correlation time 128.00 days</p> <p>Detrend of GUAS_ENU Up</p> <p>WRMS: 3.37 mm NRMS: 41.16 #: 1330 data</p> <p>Mean 1.19 +- 0.72 mm</p> <p>Rate -0.09 +- 0.57 mm/yr</p> <p>Annual Cos -0.85 +- 1.06 mm</p> <p>Annual Sin 1.41 +- 0.98 mm</p> <p>SemiAnnual Cos 0.14 +- 1.01 mm</p> <p>SemiAnnual Sin 0.35 +- 1.01 mm</p>	

Stazione ITIM (Imola)



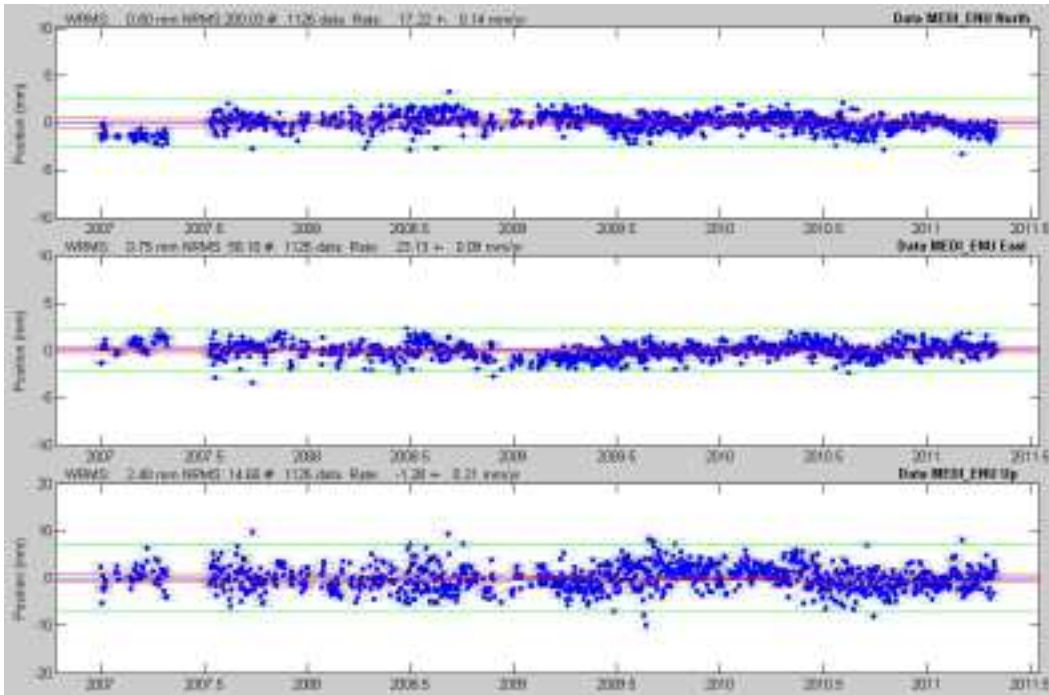
<p>Computing Realistic Sigmas</p> <p>RealSigma white dchi 29.211974</p> <p>NRMS Realistic 141.05; Correlation time 64.00 days</p> <p>Detrend of ITIM_ENU North</p> <p>WRMS: 1.00 mm NRMS:141.05 #: 975 data</p> <p>Mean -7.72 +/- 0.13 mm</p> <p>Rate 18.33 +/- 0.12 mm/yr</p> <p>Annual Cos 0.21 +/- 0.19 mm</p> <p>Annual Sin -0.69 +/- 0.17 mm</p> <p>SemiAnnual Cos -0.12 +/- 0.18 mm</p> <p>SemiAnnual Sin 0.16 +/- 0.18 mm</p>	<p>Computing Realistic Sigmas</p> <p>RealSigma white dchi 11.345370</p> <p>NRMS Realistic 26.86; Correlation time 4.00 days</p> <p>Detrend of ITIM_ENU East</p> <p>WRMS: 1.00 mm NRMS: 26.86 #: 975 data</p> <p>Mean -10.36 +/- 0.06 mm</p> <p>Rate 22.65 +/- 0.05 mm/yr</p> <p>Annual Cos -0.76 +/- 0.09 mm</p> <p>Annual Sin 0.71 +/- 0.08 mm</p> <p>SemiAnnual Cos -0.19 +/- 0.08 mm</p> <p>SemiAnnual Sin -0.03 +/- 0.08 mm</p>
<p>Computing Realistic Sigmas</p> <p>RealSigma white dchi 4.016924</p> <p>NRMS Realistic 15.38; Correlation time 32.00 days</p> <p>Detrend of ITIM_ENU Up</p> <p>WRMS: 2.98 mm NRMS: 15.38 #: 975 data</p> <p>Mean -1.28 +/- 0.32 mm</p> <p>Rate -0.58 +/- 0.29 mm/yr</p> <p>Annual Cos -2.47 +/- 0.48 mm</p> <p>Annual Sin -0.40 +/- 0.42 mm</p> <p>SemiAnnual Cos -0.35 +/- 0.44 mm</p> <p>SemiAnnual Sin 0.41 +/- 0.45 mm</p>	

Stazione ITRN (Rimini)



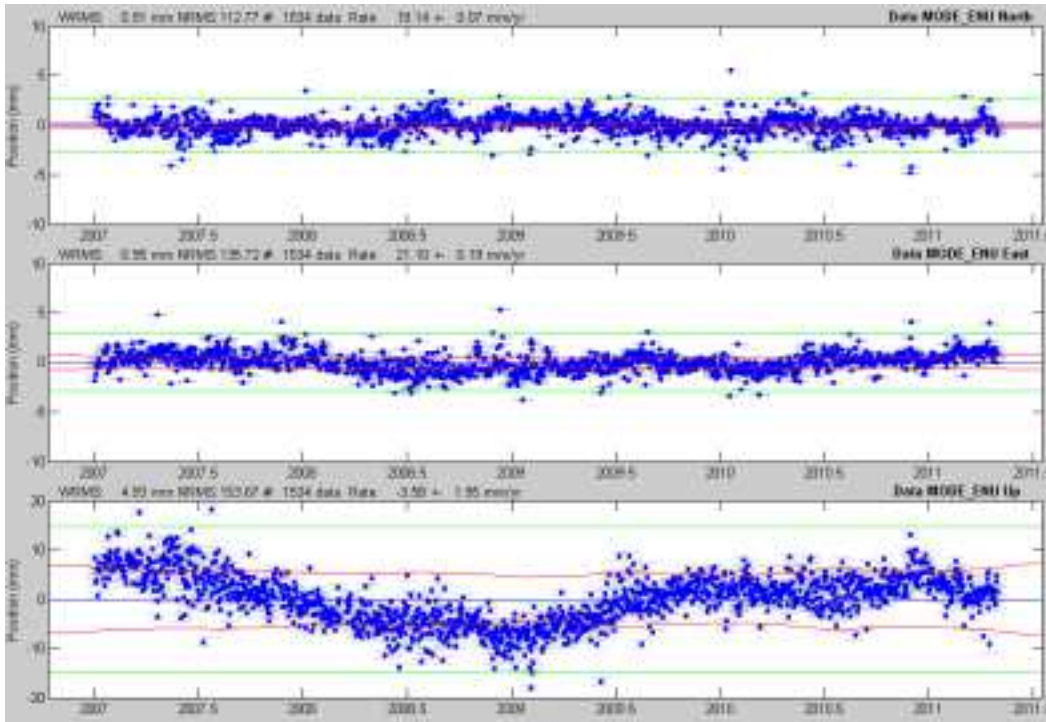
<p>Computing Realistic Sigmas Realsigma white dchi 25.888026 NRMS Realistic 74.66; Correlation time 32.00 days Detrend of ITRN_ENU North WRMS: 0.85 mm NRMS: 74.66 #: 1152 data Mean -1.11 +- 0.07 mm Rate 18.99 +- 0.06 mm/yr Annual Cos 0.63 +- 0.10 mm Annual Sin 0.25 +- 0.09 mm SemiAnnual Cos 0.06 +- 0.09 mm SemiAnnual Sin 0.02 +- 0.09 mm Break 2010 8 12 1 43 252.84 +- 0.23 mm</p>	<p>Computing Realistic Sigmas Realsigma white dchi 11.752728 NRMS Realistic 36.40; Correlation time 16.00 days Detrend of ITRN_ENU East WRMS: 0.97 mm NRMS: 36.40 #: 1152 data Mean -1.24 +- 0.08 mm Rate 22.55 +- 0.07 mm/yr Annual Cos 2.26 +- 0.11 mm Annual Sin 0.50 +- 0.09 mm SemiAnnual Cos -0.14 +- 0.09 mm SemiAnnual Sin -0.36 +- 0.10 mm Break 2010 8 12 1 43 -252.41 +- 0.22 mm</p>
<p style="text-align: center;">Computing Realistic Sigmas Realsigma white dchi 3.735736 NRMS Realistic 17.20; Correlation time 64.00 days Detrend of ITRN_ENU Up WRMS: 2.91 mm NRMS: 17.20 #: 1152 data Mean 0.33 +- 0.39 mm Rate -1.69 +- 0.33 mm/yr Annual Cos -0.94 +- 0.51 mm Annual Sin 0.11 +- 0.44 mm SemiAnnual Cos 0.01 +- 0.44 mm SemiAnnual Sin -0.21 +- 0.47 mm Break 2010 8 12 1 43 111.62 +- 1.11 mm</p>	

Stazione MEDI (Medicina)



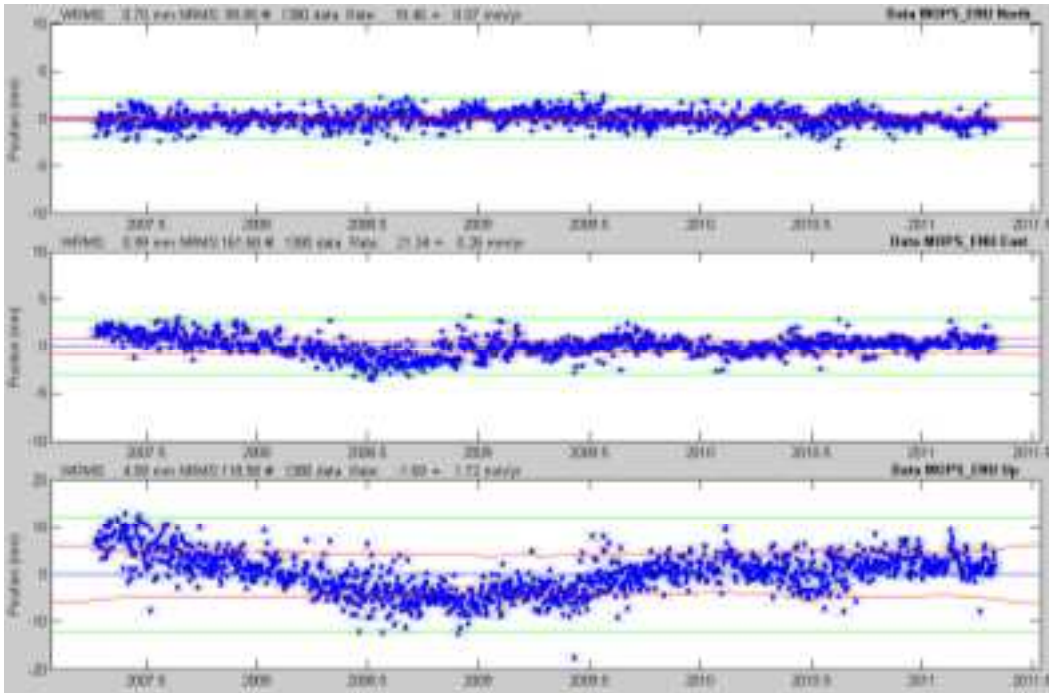
<p>Computing Realistic Sigmas RealSigma white dchi 22.131162 NRMS Realistic 200.03; Correlation time 128.00 days Detrend of MEDI_ENU North WRMS: 0.80 mm NRMS:200.03 #: 1126 data Mean 2.71 +- 0.16 mm Rate 17.22 +- 0.14 mm/yr Annual Cos -0.03 +- 0.24 mm Annual Sin -0.93 +- 0.21 mm SemiAnnual Cos -0.27 +- 0.22 mm SemiAnnual Sin -0.07 +- 0.23 mm</p>	<p>Computing Realistic Sigmas RealSigma white dchi 8.781468 NRMS Realistic 58.10; Correlation time 64.00 days Detrend of MEDI_ENU East WRMS: 0.75 mm NRMS: 58.10 #: 1125 data Mean 1.03 +- 0.11 mm Rate 23.13 +- 0.09 mm/yr Annual Cos -0.53 +- 0.16 mm Annual Sin 1.60 +- 0.14 mm SemiAnnual Cos 0.30 +- 0.15 mm SemiAnnual Sin -0.16 +- 0.15 mm</p>
<p>Computing Realistic Sigmas RealSigma white dchi 3.447380 NRMS Realistic 14.65; Correlation time 64.00 days Detrend of MEDI_ENU Up WRMS: 2.40 mm NRMS: 14.65 #: 1125 data Mean 4.02 +- 0.26 mm Rate -1.28 +- 0.21 mm/yr Annual Cos -0.36 +- 0.38 mm Annual Sin -1.57 +- 0.34 mm SemiAnnual Cos -0.48 +- 0.36 mm SemiAnnual Sin 0.43 +- 0.36 mm</p>	

Stazione MODE (Modena)



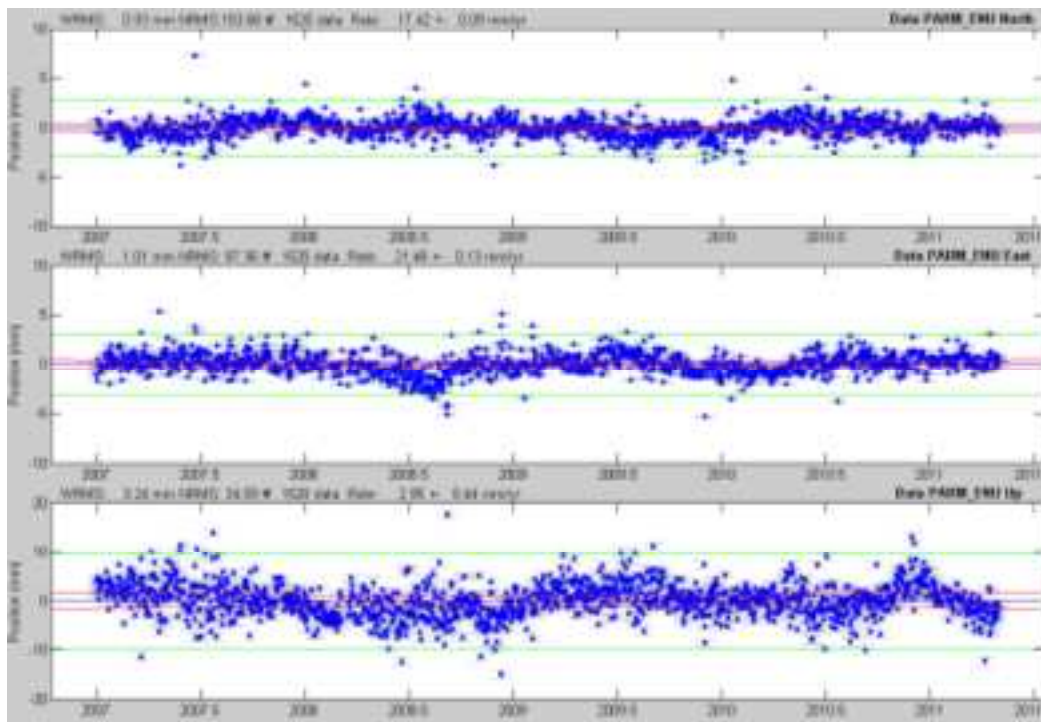
<p>Computing Realistic Sigmas RealSigma white dchi 25.181026 NRMS Realistic 112.77; Correlation time 32.00 days Detrend of MODE_ENU North WRMS: 0.91 mm NRMS:112.77 # 1534 data Mean -6.17 +- 0.08 mm Rate 19.14 +- 0.07 mm/yr Annual Cos -1.24 +- 0.12 mm Annual Sin 0.61 +- 0.11 mm SemiAnnual Cos 0.12 +- 0.11 mm SemiAnnual Sin 0.04 +- 0.11 mm</p>	<p>Computing Realistic Sigmas RealSigma white dchi 9.235195 NRMS Realistic 135.72; Correlation time 256.00 days Detrend of MODE_ENU East WRMS: 0.95 mm NRMS:135.72 # 1534 data Mean -5.17 +- 0.25 mm Rate 21.10 +- 0.19 mm/yr Annual Cos -0.82 +- 0.36 mm Annual Sin -0.31 +- 0.34 mm SemiAnnual Cos -0.01 +- 0.34 mm SemiAnnual Sin 0.12 +- 0.35 mm</p>
<p>Computing Realistic Sigmas RealSigma white dchi 3.784432 NRMS Realistic 153.67; Correlation time 512.00 days Detrend of MODE_ENU Up WRMS: 4.93 mm NRMS:153.67 # 1534 data Mean -1.87 +- 2.47 mm Rate -3.58 +- 1.95 mm/yr Annual Cos -2.04 +- 3.59 mm Annual Sin 0.69 +- 3.41 mm SemiAnnual Cos -0.35 +- 3.44 mm SemiAnnual Sin 0.42 +- 3.48 mm</p>	

Stazione MOPS (Modena)



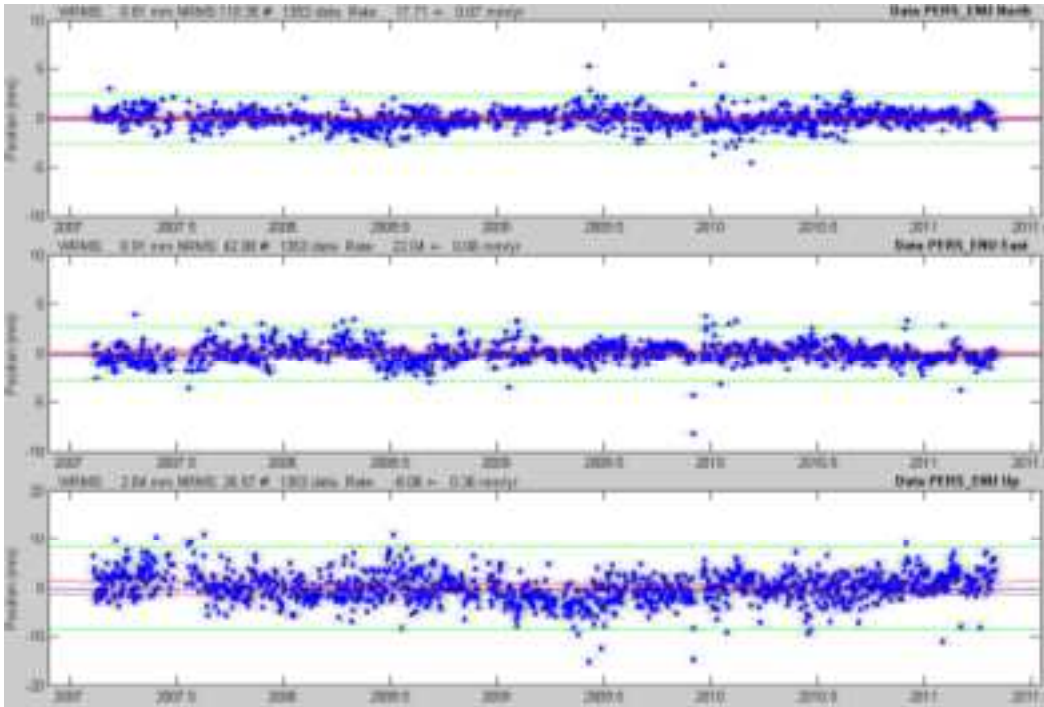
<p>Computing Realistic Sigmas Realsigma white dchi 21.150752 NRMS Realistic 99.85; Correlation time 64.00 days Detrend of MOPS_ENU North WRMS: 0.70 mm NRMS: 99.85 #: 1380 data Mean -1.72 +- 0.08 mm Rate 18.46 +- 0.07 mm/yr Annual Cos 0.25 +- 0.11 mm Annual Sin -0.01 +- 0.10 mm SemiAnnual Cos 0.05 +- 0.11 mm SemiAnnual Sin 0.02 +- 0.11 mm</p>	<p>Computing Realistic Sigmas Realsigma white dchi 8.543602 NRMS Realistic 161.68; Correlation time 256.00 days Detrend of MOPS_ENU East WRMS: 0.99 mm NRMS: 161.68 #: 1380 data Mean -1.89 +- 0.31 mm Rate 21.34 +- 0.26 mm/yr Annual Cos -0.65 +- 0.45 mm Annual Sin -0.67 +- 0.42 mm SemiAnnual Cos 0.02 +- 0.43 mm SemiAnnual Sin 0.10 +- 0.43 mm</p>
<p>Computing Realistic Sigmas Realsigma white dchi 3.561215 NRMS Realistic 118.58; Correlation time 512.00 days Detrend of MOPS_ENU Up WRMS: 4.09 mm NRMS: 118.58 #: 1380 data Mean -0.86 +- 1.99 mm Rate -1.69 +- 1.72 mm/yr Annual Cos -2.22 +- 2.92 mm Annual Sin -0.14 +- 2.75 mm SemiAnnual Cos -0.12 +- 2.80 mm SemiAnnual Sin -0.27 +- 2.82 mm</p>	

Stazione PARM (Parma)



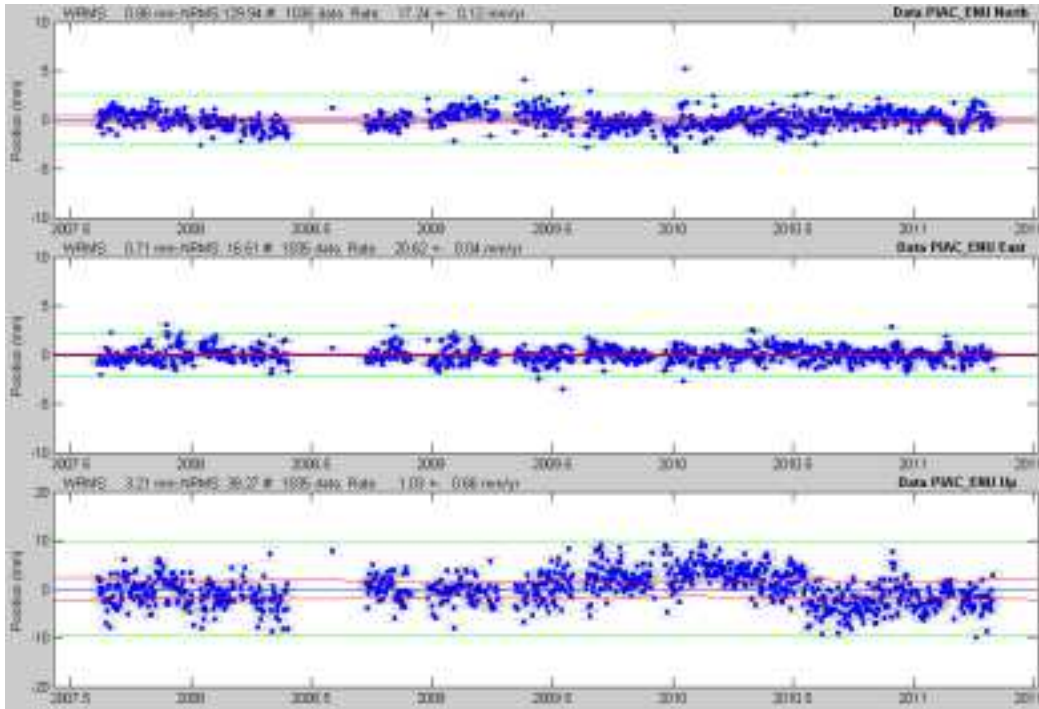
<p>Computing Realistic Sigmas</p> <p>Realsigma white dchi 24.658627</p> <p>NRMS Realistic 153.68; Correlation time 64.00 days</p> <p>Detrend of PARM_ENU North</p> <p>WRMS: 0.93 mm NRMS:153.68 #: 1520 data</p> <p>Mean -3.72 +- 0.11 mm</p> <p>Rate 17.42 +- 0.09 mm/yr</p> <p>Annual Cos 1.45 +- 0.16 mm</p> <p>Annual Sin 1.16 +- 0.16 mm</p> <p>SemiAnnual Cos 0.32 +- 0.16 mm</p> <p>SemiAnnual Sin -0.25 +- 0.16 mm</p>	<p>Computing Realistic Sigmas</p> <p>Realsigma white dchi 9.709354</p> <p>NRMS Realistic 87.36; Correlation time 128.00 days</p> <p>Detrend of PARM_ENU East</p> <p>WRMS: 1.01 mm NRMS: 87.36 #: 1520 data</p> <p>Mean -2.80 +- 0.17 mm</p> <p>Rate 21.48 +- 0.13 mm/yr</p> <p>Annual Cos -0.18 +- 0.24 mm</p> <p>Annual Sin -0.60 +- 0.23 mm</p> <p>SemiAnnual Cos -0.18 +- 0.23 mm</p> <p>SemiAnnual Sin -0.09 +- 0.24 mm</p>
<p>Computing Realistic Sigmas</p> <p>Realsigma white dchi 3.943746</p> <p>NRMS Realistic 34.59; Correlation time 128.00 days</p> <p>Detrend of PARM_ENU Up</p> <p>WRMS: 3.24 mm NRMS: 34.59 #: 1520 data</p> <p>Mean -6.08 +- 0.56 mm</p> <p>Rate 2.95 +- 0.44 mm/yr</p> <p>Annual Cos -3.33 +- 0.81 mm</p> <p>Annual Sin 3.81 +- 0.77 mm</p> <p>SemiAnnual Cos 0.81 +- 0.78 mm</p> <p>SemiAnnual Sin 0.90 +- 0.79 mm</p>	

Stazione PERS (San Giovanni In Persiceto)



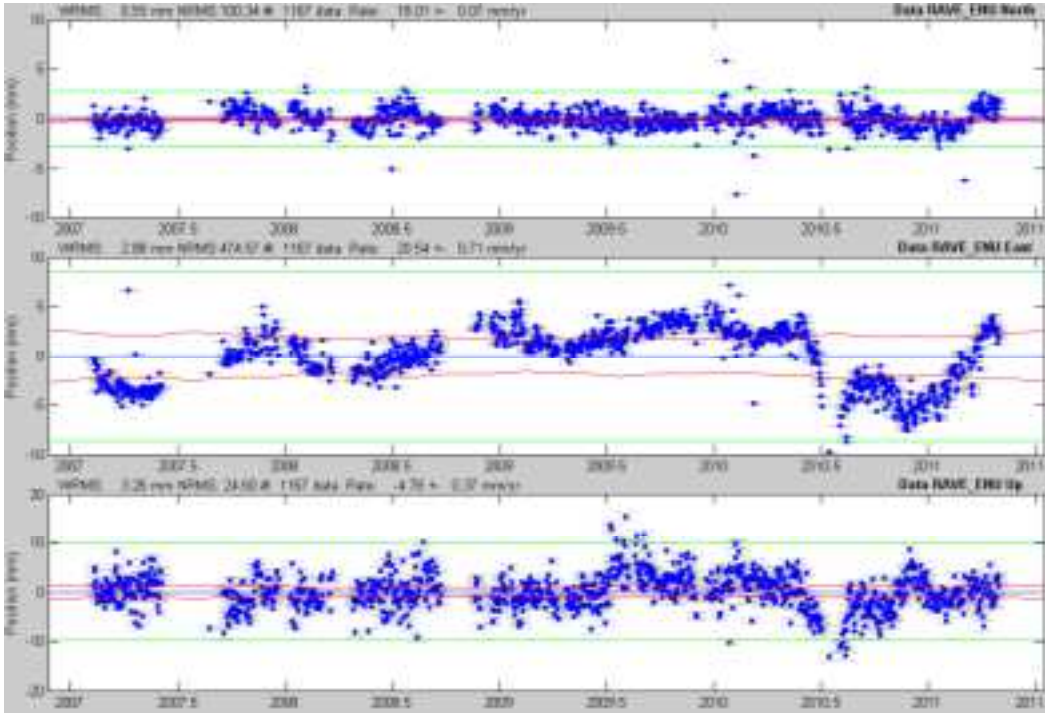
<pre> Computing Realistic Sigmas RealSigma white dchi 23.261637 NRMS Realistic 110.35; Correlation time 64.00 days Detrend of PERS_ENU North WRMS: 0.81 mm NRMS:110.35 #: 1353 data Mean -3.40 +- 0.09 mm Rate 17.71 +- 0.07 mm/yr Annual Cos -1.04 +- 0.13 mm Annual Sin -0.23 +- 0.12 mm SemiAnnual Cos -0.01 +- 0.12 mm SemiAnnual Sin 0.15 +- 0.12 mm </pre>	<pre> Computing Realistic Sigmas RealSigma white dchi 9.782486 NRMS Realistic 42.08; Correlation time 32.00 days Detrend of PERS_ENU East WRMS: 0.91 mm NRMS: 42.08 #: 1353 data Mean -0.11 +- 0.08 mm Rate 22.04 +- 0.06 mm/yr Annual Cos 1.78 +- 0.12 mm Annual Sin -0.15 +- 0.11 mm SemiAnnual Cos -0.11 +- 0.11 mm SemiAnnual Sin -0.26 +- 0.11 mm </pre>
<pre> Computing Realistic Sigmas RealSigma white dchi 3.573072 NRMS Realistic 26.57; Correlation time 128.00 days Detrend of PERS_ENU Up WRMS: 2.84 mm NRMS: 26.57 #: 1353 data Mean 9.19 +- 0.46 mm Rate -8.08 +- 0.36 mm/yr Annual Cos -0.95 +- 0.68 mm Annual Sin 0.53 +- 0.62 mm SemiAnnual Cos 0.19 +- 0.64 mm SemiAnnual Sin 0.05 +- 0.64 mm </pre>	

Stazione PIAC (Piacenza)



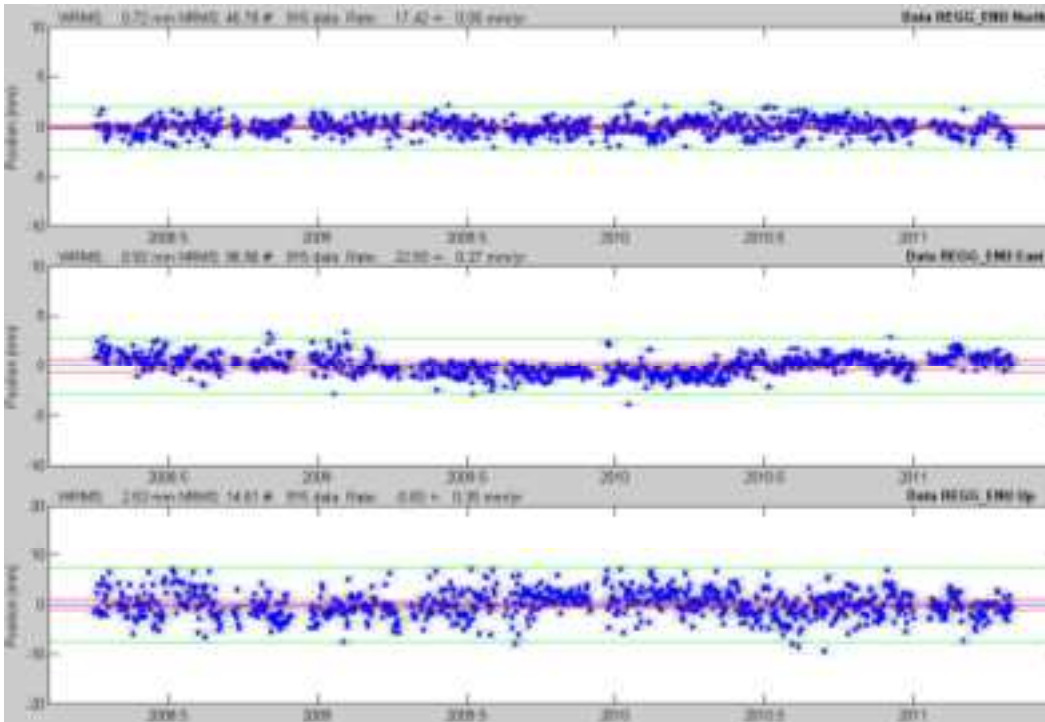
<p>Computing Realistic Sigmas</p> <p>RealSigma white dchi 19.921501</p> <p>NRMS Realistic 129.94; Correlation time 64.00 days</p> <p>Detrend of PIAC_ENU North</p> <p>WRMS: 0.86 mm NRMS:129.94 #: 1035 data</p> <p>Mean 1.79 +- 0.14 mm</p> <p>Rate 17.24 +- 0.12 mm/yr</p> <p>Annual Cos -0.91 +- 0.20 mm</p> <p>Annual Sin 0.24 +- 0.18 mm</p> <p>SemiAnnual Cos 0.21 +- 0.18 mm</p> <p>SemiAnnual Sin 0.40 +- 0.18 mm</p>	<p>Computing Realistic Sigmas</p> <p>RealSigma white dchi 7.172481</p> <p>NRMS Realistic 16.51; Correlation time 4.00 days</p> <p>Detrend of PIAC_ENU East</p> <p>WRMS: 0.71 mm NRMS: 16.51 #: 1035 data</p> <p>Mean 4.79 +- 0.04 mm</p> <p>Rate 20.62 +- 0.04 mm/yr</p> <p>Annual Cos -0.70 +- 0.06 mm</p> <p>Annual Sin -0.09 +- 0.06 mm</p> <p>SemiAnnual Cos 0.07 +- 0.06 mm</p> <p>SemiAnnual Sin -0.18 +- 0.06 mm</p>
<p>Computing Realistic Sigmas</p> <p>RealSigma white dchi 3.510346</p> <p>NRMS Realistic 38.27; Correlation time 128.00 days</p> <p>Detrend of PIAC_ENU Up</p> <p>WRMS: 3.21 mm NRMS: 38.27 #: 1035 data</p> <p>Mean -2.21 +- 0.80 mm</p> <p>Rate 1.03 +- 0.66 mm/yr</p> <p>Annual Cos -1.78 +- 1.21 mm</p> <p>Annual Sin 0.73 +- 1.05 mm</p> <p>SemiAnnual Cos 0.12 +- 1.08 mm</p> <p>SemiAnnual Sin 0.08 +- 1.09 mm</p>	

Stazione RAVE (Ravenna)



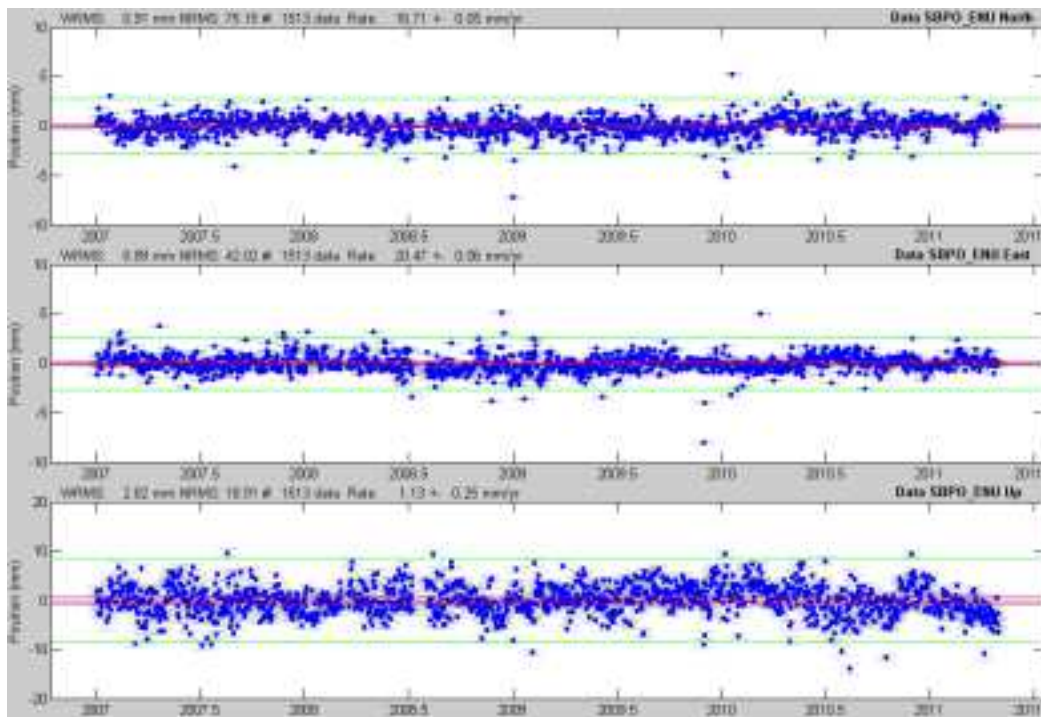
<p>Computing Realistic Sigmas</p> <p>RealSigma white dchi 24.061214</p> <p>NRMS Realistic 100.34; Correlation time 32.00 days</p> <p>Detrend of RAVE_ENU North</p> <p>WRMS: 0.93 mm NRMS:100.34 #: 1167 data</p> <p>Mean -0.79 +- 0.09 mm</p> <p>Rate 18.01 +- 0.07 mm/yr</p> <p>Annual Cos -0.00 +- 0.14 mm</p> <p>Annual Sin -0.14 +- 0.12 mm</p> <p>SemiAnnual Cos -0.03 +- 0.13 mm</p> <p>SemiAnnual Sin -0.17 +- 0.13 mm</p>	<p>Computing Realistic Sigmas</p> <p>RealSigma white dchi 12.246402</p> <p>NRMS Realistic 474.57; Correlation time 128.00 days</p> <p>Detrend of RAVE_ENU East</p> <p>WRMS: 2.88 mm NRMS:474.57 #: 1167 data</p> <p>Mean -3.15 +- 0.92 mm</p> <p>Rate 20.54 +- 0.71 mm/yr</p> <p>Annual Cos -1.86 +- 1.37 mm</p> <p>Annual Sin 0.91 +- 1.23 mm</p> <p>SemiAnnual Cos -0.31 +- 1.28 mm</p> <p>SemiAnnual Sin 0.00 +- 1.25 mm</p>
<p>Computing Realistic Sigmas</p> <p>RealSigma white dchi 3.631323</p> <p>NRMS Realistic 24.60; Correlation time 64.00 days</p> <p>Detrend of RAVE_ENU Up</p> <p>WRMS: 3.26 mm NRMS:24.60 #: 1167 data</p> <p>Mean -0.28 +- 0.48 mm</p> <p>Rate -4.78 +- 0.37 mm/yr</p> <p>Annual Cos -1.82 +- 0.71 mm</p> <p>Annual Sin 0.61 +- 0.64 mm</p> <p>SemiAnnual Cos -0.27 +- 0.66 mm</p> <p>SemiAnnual Sin 0.35 +- 0.65 mm</p>	

Stazione REGG (Reggio nell'Emilia)



<p>Computing Realistic Sigmas RealSigma white dchi 21.604552 NRMS Realistic 45.78; Correlation time 8.00 days Detrend of REGG_ENU North WRMS: 0.72 mm NRMS: 45.78 #: 915 data Mean 6.69 +- 0.04 mm Rate 17.42 +- 0.05 mm/yr Annual Cos -0.96 +- 0.06 mm Annual Sin -0.30 +- 0.06 mm SemiAnnual Cos 0.07 +- 0.06 mm SemiAnnual Sin 0.15 +- 0.06 mm</p>	<p>Computing Realistic Sigmas RealSigma white dchi 8.962233 NRMS Realistic 96.56; Correlation time 128.00 days Detrend of REGG_ENU East WRMS: 0.92 mm NRMS: 96.56 #: 915 data Mean 9.56 +- 0.23 mm Rate 22.93 +- 0.27 mm/yr Annual Cos 0.58 +- 0.34 mm Annual Sin 1.08 +- 0.31 mm SemiAnnual Cos -0.06 +- 0.32 mm SemiAnnual Sin -0.44 +- 0.32 mm</p>
<p>Computing Realistic Sigmas RealSigma white dchi 3.279570 NRMS Realistic 14.61; Correlation time 64.00 days Detrend of REGG_ENU Up WRMS: 2.53 mm NRMS: 14.61 #: 915 data Mean -8.23 +- 0.31 mm Rate -0.83 +- 0.35 mm/yr Annual Cos -0.31 +- 0.45 mm Annual Sin 2.91 +- 0.42 mm SemiAnnual Cos 0.13 +- 0.43 mm SemiAnnual Sin -0.07 +- 0.43 mm</p>	

Stazione SBPO (San Benedetto Po)



```

Computing Realistic Sigmas
RealSigma white dchi 22.602357
NRMS Realistic 75.15; Correlation time 16.00 days
Detrend of SBPO_ENU North
WRMS: 0.91 mm NRMS: 75.15 #: 1513 data
Mean -2.73 +- 0.06 mm
Rate 16.71 +- 0.05 mm/yr
Annual Cos -0.39 +- 0.09 mm
Annual Sin -0.23 +- 0.09 mm
SemiAnnual Cos 0.08 +- 0.09 mm
SemiAnnual Sin 0.22 +- 0.09 mm
    
```

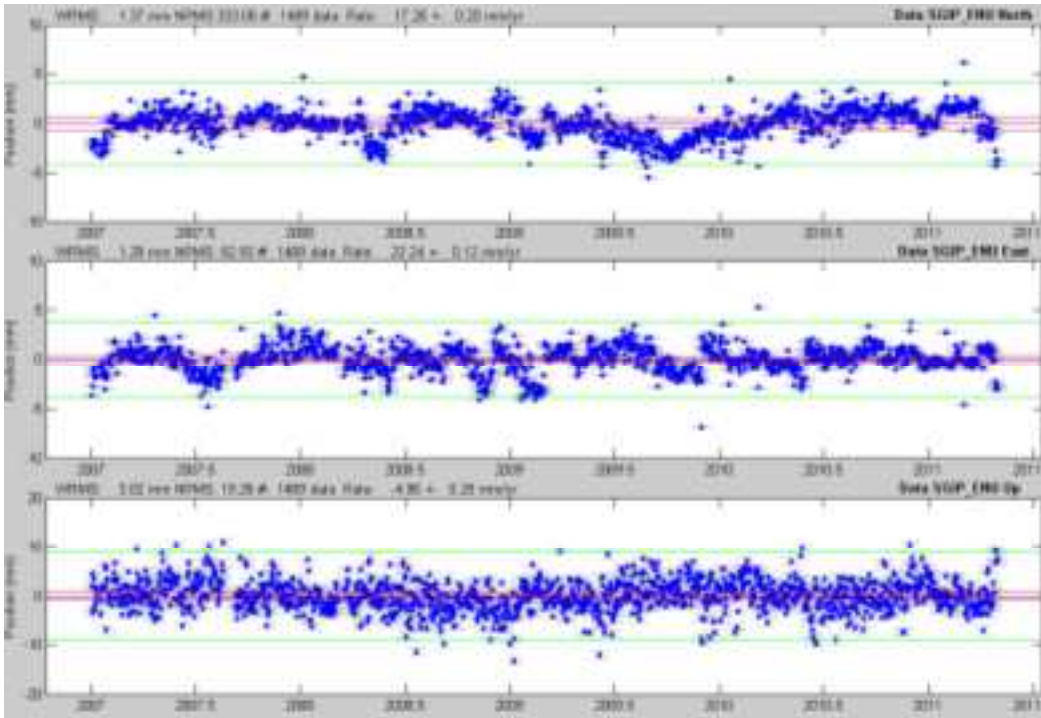
```

Computing Realistic Sigmas
RealSigma white dchi 10.203168
NRMS Realistic 42.02; Correlation time 64.00 days
Detrend of SBPO_ENU East
WRMS: 0.89 mm NRMS: 42.02 #: 1513 data
Mean -3.08 +- 0.08 mm
Rate 20.47 +- 0.06 mm/yr
Annual Cos -0.09 +- 0.11 mm
Annual Sin -0.16 +- 0.11 mm
SemiAnnual Cos -0.03 +- 0.11 mm
SemiAnnual Sin -0.07 +- 0.11 mm
    
```

```

Computing Realistic Sigmas
RealSigma white dchi 3.447993
NRMS Realistic 18.91; Correlation time 64.00 days
Detrend of SBPO_ENU Up
WRMS: 2.82 mm NRMS: 18.91 #: 1513 data
Mean -0.73 +- 0.32 mm
Rate 1.13 +- 0.25 mm/yr
Annual Cos -0.00 +- 0.46 mm
Annual Sin 1.16 +- 0.44 mm
SemiAnnual Cos 0.46 +- 0.44 mm
SemiAnnual Sin -0.35 +- 0.44 mm
    
```

Stazione SGIP (San Giovanni In Persiceto)



<p>Computing Realistic Sigmas RealSigma white dchi 25.074992 NRMS Realistic 333.06; Correlation time 64.00 days Detrend of SGIP_ENU North WRMS: 1.37 mm NRMS:333.06 #: 1489 data Mean -4.37 +- 0.25 mm Rate 17.26 +- 0.20 mm/yr Annual Cos 0.31 +- 0.35 mm Annual Sin 0.57 +- 0.34 mm SemiAnnual Cos 0.19 +- 0.34 mm SemiAnnual Sin 0.15 +- 0.34 mm</p>	<p>Computing Realistic Sigmas RealSigma white dchi 10.440328 NRMS Realistic 82.92; Correlation time 32.00 days Detrend of SGIP_ENU East WRMS: 1.29 mm NRMS: 82.92 #: 1489 data Mean -5.12 +- 0.15 mm Rate 22.24 +- 0.12 mm/yr Annual Cos 0.35 +- 0.22 mm Annual Sin -0.24 +- 0.21 mm SemiAnnual Cos 0.23 +- 0.21 mm SemiAnnual Sin 0.05 +- 0.21 mm</p>
<p>Computing Realistic Sigmas RealSigma white dchi 3.751155 NRMS Realistic 19.26; Correlation time 64.00 days Detrend of SGIP_ENU Up WRMS: 3.02 mm NRMS: 19.26 #: 1489 data Mean 8.01 +- 0.32 mm Rate -4.96 +- 0.25 mm/yr Annual Cos 0.24 +- 0.46 mm Annual Sin 1.32 +- 0.44 mm SemiAnnual Cos 0.20 +- 0.44 mm SemiAnnual Sin 0.47 +- 0.45 mm</p>	

3.6 Stima delle velocità orizzontali relative

Applicando il Teorema di Eulero ogni movimento traslazionale su di 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 tanto maggiore quanto maggiore è la 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 attraverso la 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 è stato pertanto sottratto il moto di rotazione di un polo euleriano desunto per il territorio della regione Emilia-Romagna a partire dalle velocità misurate in 25 stazioni permanenti. In Tabella 9 si riportano le velocità stimate attraverso il moto di rotazione di un polo euleriano e le velocità residue relative.

Tab. 9 - Velocità orizzontali stimate attraverso il polo euleriano e velocità orizzontali residue.

Codice Stazione	V nord polo (mm/anno)	V est polo (mm/anno)	V nord residua (mm/anno)	V est residua (mm/anno)
BOLG	17.70	21.69	-1.37	-0.61
CODI	18.03	21.52	0.72	-0.17
COLL	17.19	21.19	-0.26	0.26
FERR	17.80	21.42	0.49	0.25
GUAS	17.39	21.12	0.69	0.36
ITIM	17.85	21.92	-0.48	-0.73
ITRN	18.23	22.40	-0.76	-0.15
MEDI	17.82	21.73	0.60	-1.40
MODE	17.51	21.47	-1.63	0.37
MOPS	17.51	21.47	-0.95	0.13
PARM	17.23	21.20	-0.19	-0.28
PERS	17.62	21.51	-0.09	-0.53
PIAC	16.95	20.79	-0.29	0.17
RAVE	18.06	21.96	0.05	1.42
REGG	17.38	21.33	-0.04	-1.60
SBPO	17.50	21.05	0.79	0.58
SGIP	17.62	21.52	0.36	-0.72

3.7 Considerazioni metodologiche e prospettive

La metodologia di rilievo GPS statico, basata sull'impiego di ricevitori di classe geodetica in acquisizione permanente, permette di ottenere stime di velocità di movimento con precisioni

superiori al mm/anno. Certamente l'alta sensibilità strumentale, per essere significativa dal punto di vista del fenomeno di movimento osservato, deve essere accompagnata da una idonea monumentazione del supporto di ciascuna antenna di misura, da complesse procedure di calcolo scientifico utilizzabili in modo ricorsivo (per il calcolo ad esempio delle posizioni giornaliere) e da software specialistici per l'analisi delle serie temporali e per la stima dei parametri di velocità di movimento ricercati.

Le tecniche satellitari di posizionamento globale di alta precisione GNSS (Global Navigation Satellite System) consentono quindi di studiare, in modo indipendente da misure topografiche classiche a terra, le velocità verticali e orizzontali di spostamento della struttura di supporto delle antenne. Questi metodi di misura consentono di far evolvere il concetto stesso di **punto di riferimento** all'interno di una rete geodetica, storicamente assunto a priori come fisso ed immutabile nel tempo, sulla base di considerazioni di generica stabilità del contesto geologico strutturale dell'area. Al contrario, un punto di riferimento determinato mediante una stazione permanente GPS, permette di definire una posizione di controllo entro un robusto sistema di riferimento, internazionalmente riconosciuto, nonché di misurare le velocità di variazione della sua posizione nel tempo.

Le serie temporali analizzate nell'ambito di questo lavoro, sono state in gran parte desunte dalle acquisizioni di stazioni permanenti GPS realizzate per scopi tecnici in Emilia-Romagna. Le monumentazioni di queste stazioni, in genere, sono costituite da staffe metalliche ancorate alle murature di edifici. Questo tipo di materializzazione risente inevitabilmente degli eventuali effetti di movimento locale della singola struttura di ancoraggio, in funzione, ad esempio, della profondità delle fondazioni o della rigidità, ma nel loro complesso le 17 stazioni selezionate hanno mostrato una buona affidabilità nell'evidenziare i movimenti cercati. Si deve considerare infatti che, utilizzando tali punti di controllo in appoggio alle tecniche interferometriche SAR basate su scatteratori permanenti, l'altissima densità di punti misurati a livello areale dalle tecniche PS-InSAR, permetterà di discriminare eventuali variazioni locali di velocità in piccole aree, e molto probabilmente saranno disponibili uno o più scatteratori permanenti o direttamente sulle strutture stesse o nelle immediate vicinanze degli edifici sui quali sono collocate le stazioni permanenti GPS (cfr Figura 14). In questo modo l'integrazione tra le indicazioni di movimento pressoché "assolute" desunte dal GPS e quelle relative misurate dalle tecniche interferometriche SAR, permetterà di descrivere, con elevata precisione, il quadro complessivo dei movimenti verticali in corso nell'area d'indagine.

3.8 Confronto fra i trend relativi al periodo 2002-06 e i trend delle stazioni GPS

Sulla base delle velocità di movimento verticale del suolo risultanti dall'elaborazione delle 17 stazioni GPS, si è proceduto ad un confronto tra queste e le velocità di movimento verticale, desumibili dal *grid* (cella di 100x100 m) elaborato tramite i dati derivanti dall'analisi interferometrica relativa al periodo 2002-06. In sostanza si è interrogato il *grid*, utilizzato per l'elaborazione della cartografia a curve isocinetiche 2002-06, in corrispondenza di quelle celle all'interno delle quali ricadono le stazioni GPS. Si tratta quindi di un confronto fra un dato rilevato puntualmente (stazione GPS) e un dato mediato (*grid*), tuttavia si ritiene possa comunque esprimere, in via preliminare, una tendenza che, nel prosieguo del lavoro (seconda fase), potrà essere molto meglio definita.

I valori riportati in Tabella 10 e Figura 26 mettono in evidenza, **in corrispondenza delle stazioni GPS**, una generale riduzione della subsidenza nel periodo più recente, talora con differenze piuttosto significative, come nel caso di Bologna (stazione GPS nei pressi di Porta Zamboni) con una riduzione di quasi un ordine di grandezza, ma anche Codigoro, Ferrara e

Imola riducono notevolmente i loro precedenti tassi di subsidenza con valori attuali riconducibili a subsidenza naturale. Un aumento dell'abbassamento, seppure molto contenuto e diversificato, è riscontrabile invece nelle due stazioni GPS presenti a Modena.

Tab. 10 - Confronto fra i trend relativi al periodo 2002-06 e i trend relativi alle stazioni GPS elaborate.

Codice Stazione	Toponimo	Velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2002-06 (mm/anno)	Velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2006-11 (mm/anno)
BOLG	Bologna	-12,99	-2,34
CODI	Codigoro	-8,05	-1,88
COLL	Collecchio	-1,61	0,48
FERR	Ferrara	-4,23	0,92
GUAS	Guastalla	-2,10	-0,09
ITIM	Imola	-4,96	-0,58
ITRN	Rimini	-3,08	-1,69
MEDI	Medicina	-3,53	-1,28
MODE	Modena	0,15	-3,58
MOPS	Modena	0,15	-1,69
PARM	Parma	-3,10	2,95
PERS	San Giovanni in Persiceto	-6,99	-8,08
PIAC	Piacenza	0,83	1,03
RAVE	Ravenna	-6,19	-4,78
REGG	Reggio nell'Emilia	-3,29	-0,83
SBPO	San Benedetto Po	-3,28	1,13
SGIP	San Giovanni in Persiceto	-6,33	-4,96

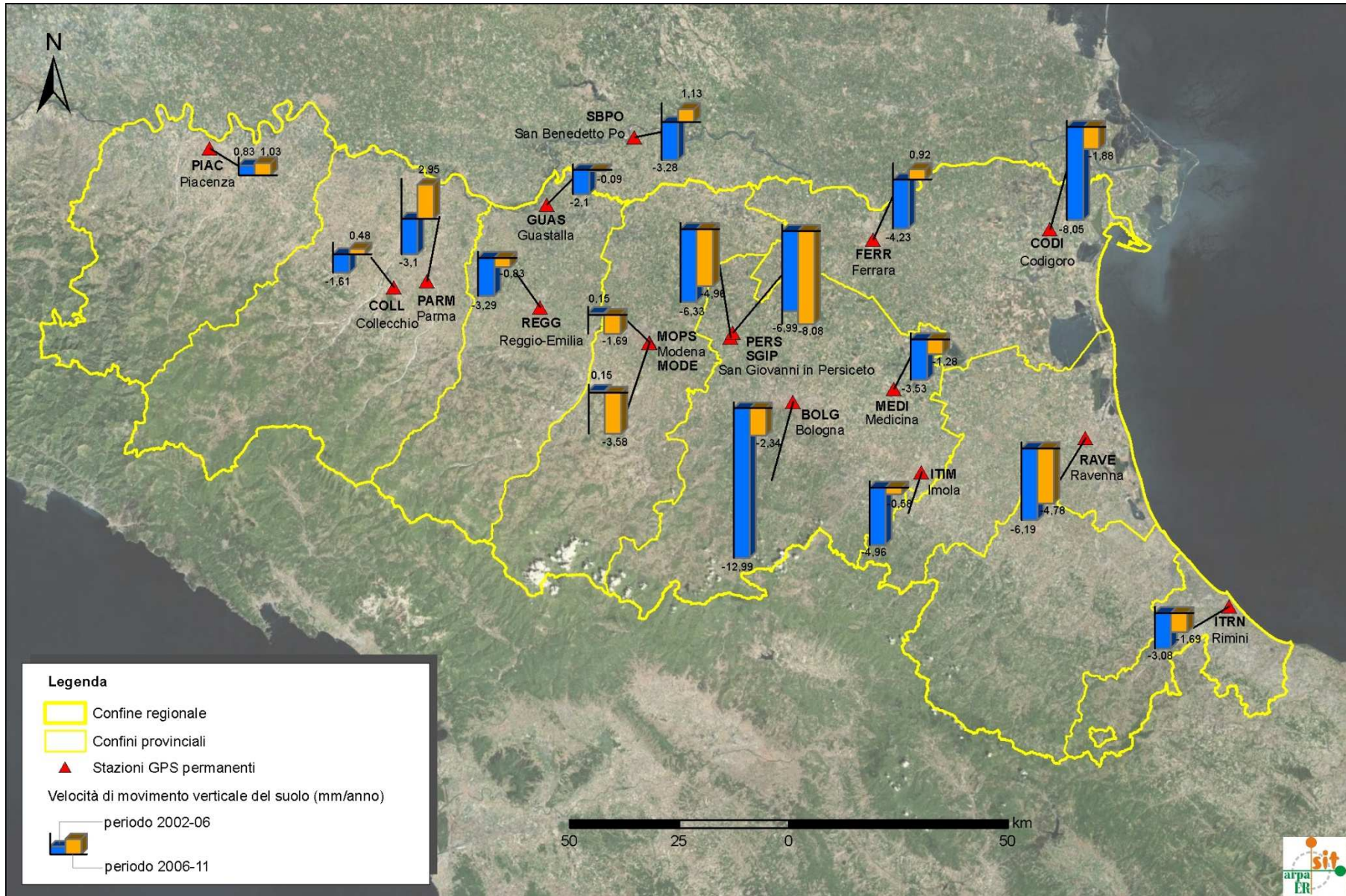


Fig. 26 - Confronto fra le velocità di movimento verticale del suolo nel periodo 2002-06 (dato mediato su una cella 100x100m) e 2006-2011 (dato puntuale).

4. Conclusioni

Nel 2007 Arpa, su incarico della Regione Emilia-Romagna e in collaborazione con il DISTART dell'Università di Bologna, realizzò la carta delle velocità di movimento verticale del suolo, periodo 2002-06, relativa all'intera pianura emiliano-romagnola. Per l'elaborazione di tale cartografia venne eseguito un rilievo utilizzando, per la prima volta a scala regionale, il metodo dell'analisi interferometrica di dati radar satellitari, con tecnica PSInSARTM, supportato da misure di livellazione geometrica di alta precisione.

Nel 2011 Arpa, su incarico della Regione Emilia-Romagna e in collaborazione con il DICAM (ex DISTART) dell'Università di Bologna, ha realizzato, con il presente lavoro, la **prima fase** relativa al rilievo della subsidenza nella pianura emiliano-romagnola, con l'obiettivo di aggiornare le conoscenze geometriche sul fenomeno della subsidenza già acquisite con il precedente rilievo.

In particolare, sono state realizzate le seguenti attività:

1. analisi interferometrica di dati radar satellitari;
2. elaborazione dei dati acquisiti da 17 stazioni permanenti GPS presenti nell'area d'indagine, inquadramento di tali stazioni nel Sistema Internazionale EUREF e calibrazione preliminare dell'analisi interferometrica.

L'analisi interferometrica effettuata con tecnica SqueeSARTM (algoritmo più sofisticato rispetto al precedente PSInSARTM) ha permesso di ottenere una copertura completa di tutta l'area di pianura della regione Emilia Romagna, con circa 318.600 punti di misura, per ognuno dei quali è stata determinata, in particolare, la velocità di movimento verticale del suolo nel periodo gennaio 2006 - maggio 2011 e la relativa serie storica.

Rispetto alle elaborazioni del 2007 (periodo analizzato 2002-06), basate sui dati dei satelliti ENVISAT e RADARSAT, è stata ottenuta una copertura dell'area di indagine (circa 13.200 km²) superiore alla precedente (circa 11.000 km²) utilizzando il solo satellite RADARSAT.

Sono stati utilizzati *dataset* con un numero di immagini elevato ed uniforme per ogni sito, ottenendo così un dato omogeneo sull'intera area di pianura della regione. Inoltre, grazie alla maggiore ampiezza temporale dei *dataset* utilizzati ed all'introduzione dell'algoritmo SqueeSARTM di nuova generazione, la densità dei punti di misura individuati è aumentata notevolmente, soprattutto al di fuori delle aree urbane, rispetto alla precedente elaborazione con la quale furono individuati meno del 50% degli attuali punti di misura.

Parallelamente, sono stati elaborati i dati acquisiti da 17 stazioni GPS permanenti al fine di calibrare e verificare, tramite valori di velocità di movimento verticale "assoluta", i dati relativi provenienti dall'analisi SqueeSARTM. In tal modo, per la prima volta, nel rilievo della subsidenza in Emilia-Romagna, si è andati verso il superamento del concetto di punto di riferimento assoluto all'interno di una rete geodetica, storicamente assunto a priori come fisso ed immutabile nel tempo, sulla base di considerazioni di generica stabilità del contesto geologico strutturale dell'area. Le tecniche satellitari di posizionamento globale di alta precisione consentono infatti di determinare, in modo indipendente da misure topografiche classiche a terra, le velocità verticali e orizzontali di spostamento della singola stazione GPS, che in tal modo diviene essa stessa un punto di riferimento, non già in virtù di una presunta stabilità assoluta, bensì grazie alla conoscenza precisa dei suoi movimenti assoluti nel tempo.

In via del tutto preliminare e provvisoria, si è voluto dare, già nell'ambito di questa prima fase del lavoro, un'indicazione di massima circa l'andamento dei movimenti verticali del suolo nell'ultimo periodo, rispetto al periodo precedente 2002-06. A tal fine sono state osservate le due fonti di informazione disponibili: i movimenti delle singole stazioni GPS e i movimenti risultanti dall'analisi interferometrica.

Per quanto riguarda le stazioni GPS, si è proceduto ad un confronto tra le velocità di movimento verticale di ciascuna delle 17 stazioni GPS elaborate e le velocità di movimento verticale desumibili dalla cartografia relativa al periodo 2002-06. Da tale confronto, si evidenzia una generale riduzione della subsidenza nel periodo più recente, talora con differenze piuttosto significative, come nel caso di Bologna (stazione GPS nei pressi di Porta Zamboni) con una riduzione di quasi un ordine di grandezza, ma anche Codigoro, Ferrara e Imola riducono notevolmente i loro precedenti tassi di subsidenza con valori attuali riconducibili a subsidenza naturale. Un aumento dell'abbassamento, seppure molto contenuto e diversificato, è riscontrabile invece nelle due stazioni GPS presenti a Modena.

Per quanto riguarda l'analisi interferometrica, le velocità di movimento verticale ottenute sono state confrontate e calibrate con dati di velocità media di movimento verticale di 6 stazioni GPS permanenti. Da tale calibrazione è stato ottenuto un campo di velocità verticale complessivo che, per una valutazione puramente qualitativa e preliminare, si è rappresentato su supporto cartografico tramite scala cromatica. L'osservazione di questo primo dato, di un lavoro ancora *in fieri*, evidenzia il permanere di alcune aree storicamente subsidenti, tra le quali spicca, per ampiezza ed entità degli abbassamenti, il territorio bolognese; arealmente molto più limitati, ma non meno importanti, soprattutto per la fragilità del territorio costiero, sono gli abbassamenti in corrispondenza della foce dei Fiumi Uniti - Lido di Dante. Altri abbassamenti si evidenziano anche nella media pianura tra Reggio nell'Emilia e Modena e nel Faentino, mentre nell'area a nord di Savignano sul Rubicone, considerata significativamente critica nella precedente campagna, sembra essere in riduzione sia la velocità degli abbassamenti sia l'areale interessato dagli stessi.

E' assolutamente prematuro avanzare ulteriori considerazioni senza poter disporre delle elaborazioni finali previste nella **seconda fase** del lavoro (2012), nel corso della quale si procederà alla verifica e calibrazione definitiva dell'analisi interferometrica con l'ausilio di tutte le stazioni GPS disponibili, pervenendo in tal modo alla redazione della nuova carta delle velocità di movimento verticale del suolo relativa al periodo 2006-2011.

Appendice I - Le tecniche PSInSAR™ e SqueeSAR™

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

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

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

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

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

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

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

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

Esempi di target distribuiti sono le aree detritiche, i campi non coltivati, le aree desertiche non sabbiose. È importante sottolineare come il nuovo approccio di analisi contenga in sé anche

la catena di processing delle misure PS. Questo significa che i PS continueranno a esistere accanto ai DS (Figura 1).

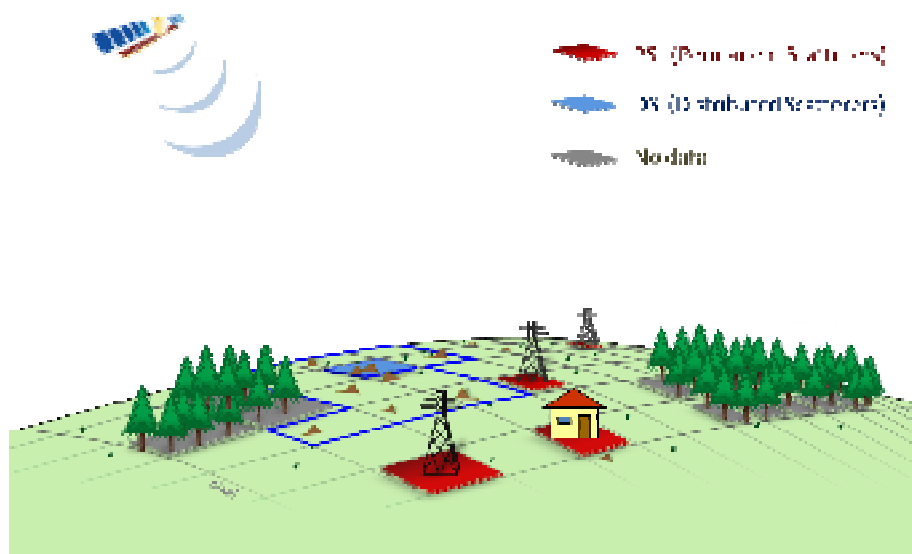


Fig. 1 - Rappresentazione schematica dei diversi bersagli monitorabili da satellite.

Che cosa si può fare con SqueeSAR™

In generale la nostra tecnologia di elaborazione dei dati satellitari permette di:

- Misurare deformazioni nell'ordine del millimetro. Le nostre misure sono state validate tramite confronto con misure da rete GPS, leveling topografico, inclinometri e altro;
- Studiare l'evoluzione degli spostamenti nel tempo e identificare trend stagionali attraverso le serie storiche di spostamento;
- Ricostruire dinamiche di spostamento passate: l'esistenza di archivi storici di dati satellitari permette di ricostruire, in molte aree di interesse nel mondo, dinamiche di spostamento a partire dal 1992. Nessun'altra tecnologia può fare altrettanto;
- Identificare movimenti non lineari: le nostre più recenti innovazioni nell'algoritmica di elaborazione dei dati satellitari hanno reso possibile anche l'analisi di deformazioni non lineari;
- Determinare le componenti verticale e orizzontale della velocità di spostamento dei punti. Se il satellite acquisisce sulla stessa area di interesse in entrambe le modalità (ascendente e discendente), è possibile (combinando i data-set di immagini ascendente e discendente) misurare le componenti verticale e orizzontale (in direzione est-ovest) della velocità di spostamento dei punti di misura;
- Effettuare analisi multi scala: da satellite è possibile monitorare aree estese fino a 10.000 km² con costi molto più bassi rispetto ad altre tecniche tradizionali, guadagnando una visione sinottica su città, bacini, pianure alluvionali, intere catene montuose;
- Integrare altre fonti di dati: i nostri dati possono risultare complementari ad altre tecniche di misurazione come il rilievo GPS, il leveling topografico, i tiltmetri, la microsismica, ecc. estendendo i risultati di queste indagini ad aree molto più ampie.

Inoltre possono fornire utili indicazioni per progettare o migliorare la dislocazione di reti di monitoraggio a terra.

Che cosa è possibile misurare

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

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

Di fatto si tratta quindi di misure monodimensionali.

La proiezione del movimento rilevato lungo altre direzioni, quali ad esempio la direzione di massima pendenza di un versante, può essere effettuata previa definizione delle ipotesi di reale direzione del moto e delle condizioni al contorno. In ogni caso questa operazione prevede di fatto una ipotesi di interpretazione del dato.

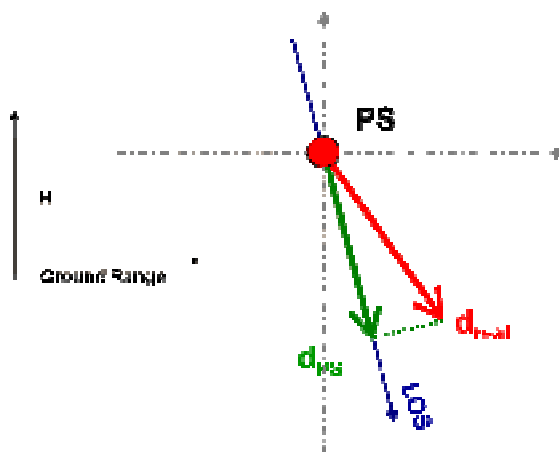


Fig. 2 - Il movimento rilevato è quello della proiezione del movimento reale nella direzione della linea di vista del satellite (LOS).

È importante ricordare come tutte le misure di movimento siano **misure relative**, nel tempo e nello spazio. L'analisi prevede infatti l'utilizzo di un'immagine di riferimento, chiamata immagine master, che rappresenta lo "zero temporale", cui riportare le misure di spostamento. Inoltre, le misure sono relative ad un "caposaldo radar" assunto fermo (reference point). Se si vogliono ottenere misure assolute, è necessario disporre di informazioni a priori relative al movimento di un'area, o una struttura, rispetto alla quale riferire i nostri risultati (in genere si tratta di informazioni fornite da stazioni GPS permanenti, ove presenti).

Geometrie di acquisizione

I satelliti radar percorrono orbite elio-sincrone lievemente inclinate rispetto ai meridiani terrestri (Figura 3). Dalla combinazione della rotazione terrestre con le orbite del satellite, risulta che una stessa area della superficie terrestre viene illuminata dal sensore sia durante un passaggio del satellite in direzione Nord-Sud, denominata geometria discendente, sia durante un passaggio del satellite in direzione Sud-Nord, denominata geometria ascendente. Entrambe le geometrie hanno lo stesso tempo di rivisitazione. L'angolo di incidenza della radiazione emessa dipende dal sensore utilizzato.

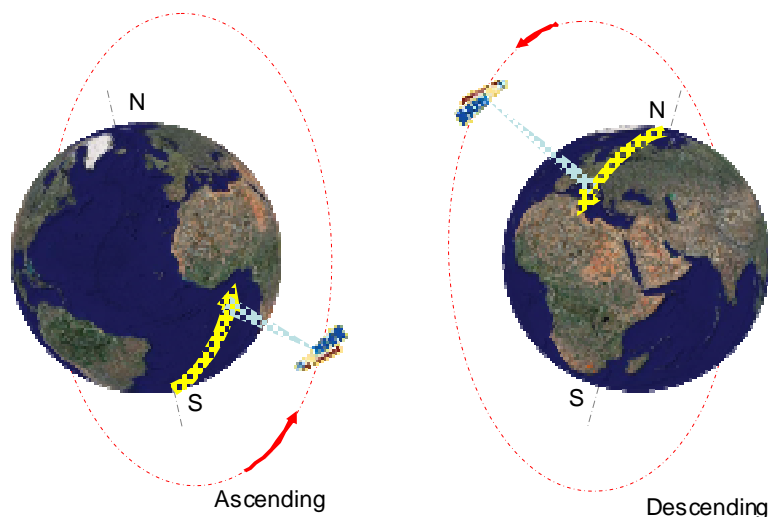


Fig. 3 - Geometrie di acquisizione ascendente e discendente.

Note sulla scomposizione del moto

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

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

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

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

Se il fenomeno di deformazione che interessa l'area in esame ha delle significative componenti in direzione orizzontale, i valori di velocità individuati dall'analisi delle due

geometrie di acquisizione ascendente e discendente risultano diverse, come illustrato in Figura 4.

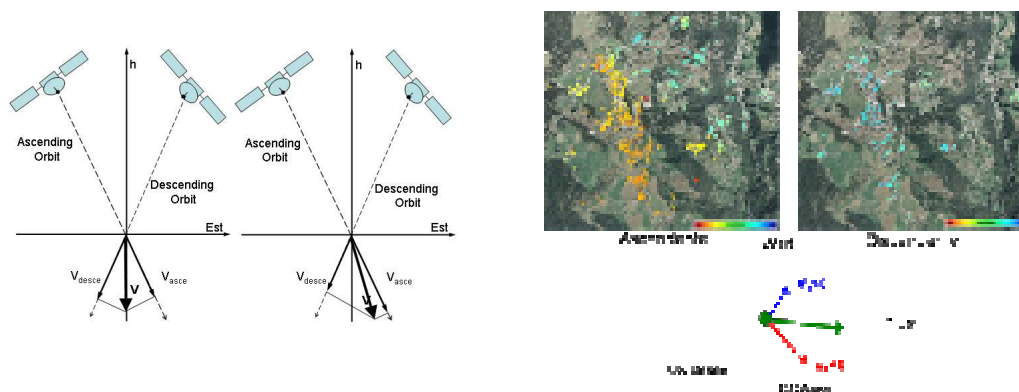


Fig. 4 - *Differenti punti di vista della velocità. Se il punto si muove solo lungo la direzione verticale, le proiezioni del moto lungo la LOS sono identiche per entrambe le geometrie; se il moto ha invece anche una componente orizzontale, le proiezioni risultano sensibilmente differenti.*

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

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

Visualizzazione dei risultati delle analisi

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

Aggiornamento delle misure

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

Precisione delle misure

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

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

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

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

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

Piattaforme satellitari disponibili per analisi interferometriche

Negli ultimi due anni le sorgenti di dato radar si sono moltiplicate. La tendenza è verso sensori con una risoluzione spaziale sempre maggiore e più basso ciclo di rivisitazione. In particolare i satelliti in banda X (lunghezza d'onda illuminante pari a circa 3 cm) hanno enormemente migliorato la capacità di ottenere dati ad alta risoluzione spaziale anche per applicazioni civili. Nella tabella 2 sono riportate le sorgenti di dati che possono essere utilizzate per analisi interferometriche.

Satellite	Tempo di rivisitazione	Operatore	Periodo di attività	Lunghezza d'onda	Risoluzione a terra (m)
ERS-1	35 giorni	Agenzia Spaziale Europea (ESA)	1992-1996	banda C: 56 mm	20x5
ERS-2	35 giorni	Agenzia Spaziale Europea (ESA)	1995-2001	banda C: 56 mm	20x5
Radarsat-1	24 giorni	Agenzia Spaziale Canadese	1995-oggi	banda C: 56 mm	20x5, 7x5
Envisat	35 giorni	Agenzia Spaziale Europea	2003-2009	banda C: 56 mm	20x5

		(ESA)			
Radarsat-2	24 giorni	McDonald Dettwiler & Associates	2008-oggi	banda C: 56 mm	20x5, 7x5, 3x3
TerraSAR- X	11 giorni	Agenzia Spaziale tedesca (DLR)	2008-oggi	banda X: 31 mm	3x3, 1x1
Cosmo SkyMed	8 giorni	Agenzia Spaziale Italiana (ASI)	2008-oggi	banda X: 31 mm	3x3, 1x1

Tab. 2- Sorgenti di dati utilizzabili per analisi interferometriche.

Appendice II - Indici di precisione dell'analisi SqueeSAR™

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

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

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

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

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

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

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

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

modello utilizzato. Questo significa che una serie temporale con, ad esempio, una coerenza temporale pari a 0.5 generata con un certo set di dati, può risultare qualitativamente diversa da una serie temporale con la stessa coerenza, ma generata da un set di dati diverso (ad esempio contenente un numero diverso di immagini) . Ovvero il valore di coerenza temporale è sicuro indice di precisione, **purché confrontato sempre all'interno dello stesso set di dati**.

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

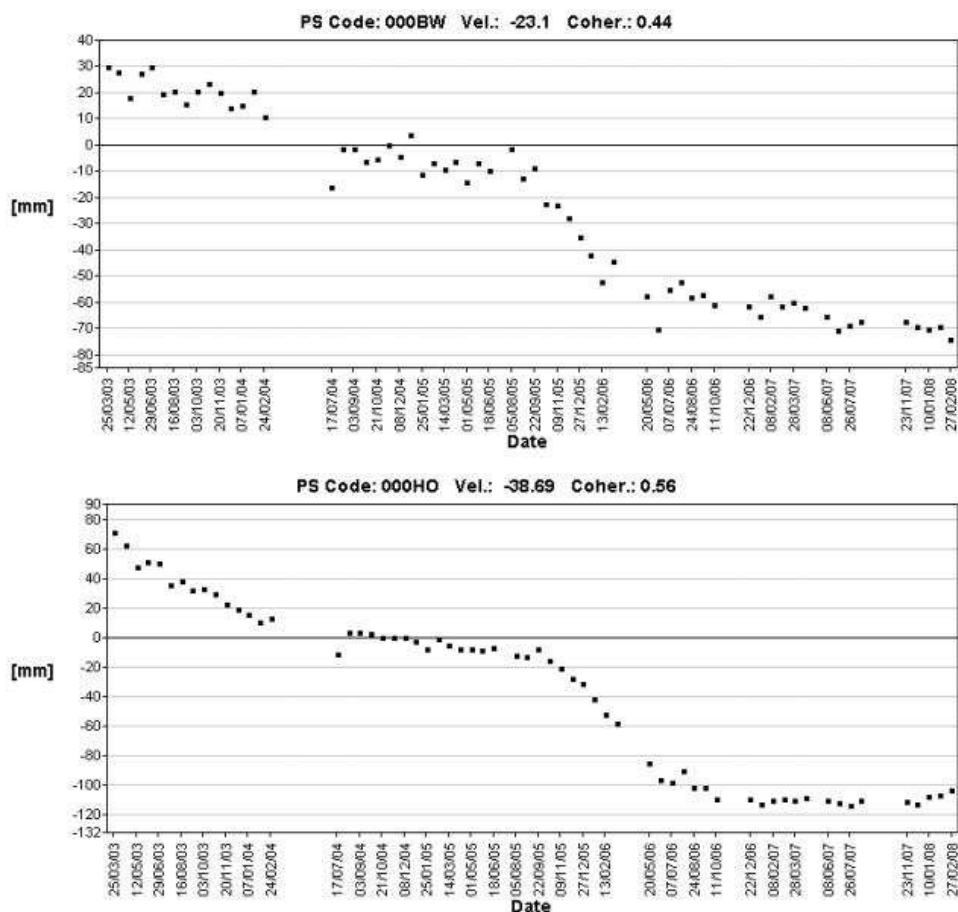


Fig. 1 - Confronto tra serie temporali a coerenze diverse: nella serie temporale riportata in alto la coerenza è inferiore rispetto alla serie temporale riportata in basso.