

L'impatto dei sensori SAR di seconda generazione nell'analisi delle deformazioni del suolo con serie temporali DInSAR: il caso di COSMO-SkyMed

Manuela Bonano (*,**), Francesco Casu (*), Riccardo Lanari (*), Michele Manunta (*),
Luca Paglia (*), Eugenio Sansosti (*), Giuseppe Solaro (*)

(*) Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente, Consiglio Nazionale delle Ricerche, via Diocleziano 328
80124 Napoli, Italy, e-mail: {bonano.m, casu.f, lanari.r, manunta.m, paglia.l, sansosti.e, solaro.g@irea.cnr.it}

(**) Sapienza Università di Roma, 00185 Roma, Italy

Riassunto

L'interferometria SAR differenziale (DInSAR) è una tecnica di telerilevamento che consente di misurare gli spostamenti del suolo con accuratezze centimetriche, e in alcuni casi anche millimetriche, sfruttando la differenza di fase fra due immagini SAR acquisite sulla stessa area. L'applicazione della tecnica DInSAR a numerosi casi di studio è stata possibile grazie alla disponibilità del grande archivio di dati SAR acquisito, durante gli ultimi 20 anni, dai sensori SAR di "prima generazione" (ERS, ENVISAT, ALOS, RADARSAT-1), caratterizzati da un tempo di rivisitazione di circa un mese e da risoluzioni spaziali che vanno da qualche metro alla decina di metri. Sulla base di questa esperienza, una "seconda generazione" di sensori SAR, caratterizzati da risoluzioni spaziali dell'ordine del metro e da tempi di rivisitazione di circa una settimana, è stata messa in orbita (TerraSAR-X, Cosmo-SkyMed, RADARSAT-2), o lo sarà nell'immediato futuro (Sentinel, ALOS-2). Questo lavoro è focalizzato sui nuovi scenari applicativi della tecnica DInSAR aperti dai sistemi SAR di seconda generazione nell'ambito della ricerca geofisica e della gestione del rischio ambientale. Per la nostra analisi ci siamo concentrati sull'utilizzo dell'algoritmo DInSAR avanzato Small BAseline Subset (SBAS) che è stato applicato a 6 dataset acquisiti tra il 1992 e il 2011 sulle aree dell'Etna e del golfo di Napoli, interessate da fenomeni deformativi a scala regionale e locale di origine naturale e antropica.

Abstract

Differential SAR Interferometry (DInSAR) is a remote sensing technique that allows us to measure ground displacements with centimetre to millimetre accuracy, exploiting the phase differences between two SAR images acquired over the same area. The availability of a huge SAR data archive acquired during the last 20 years by the "first generation" SAR systems (ERS, ENVISAT, ALOS, RADARSAT-1) allowed the application of the DInSAR technique to several case studies. These SAR systems are characterized by revisit time of about one month and spatial resolution of about ten meters. More recently a second generation SAR systems (TerraSAR-X, Cosmo-SkyMed, RADARSAT-2, ALOS-2, Sentinel), characterized by revisit time of about one week and spatial resolutions of a few meters, have been developed. This work is focused on new DInSAR application scenarios opened by the second generation SAR systems in the fields of geophysics and environmental risk management. The presented analysis has been carried out by applying the advanced DInSAR technique referred to as Small BAseline Subset (SBAS) to 6 SAR dataset acquired between 1992 and 2011 over the Mt. Etna volcano and Napoli Bay areas, characterized by several complex deformation phenomena, both natural and anthropogenic.

1. Introduzione

L'interferometria SAR differenziale (DInSAR) è una tecnica di telerilevamento che consente di misurare gli spostamenti del suolo con accuratezze dell'ordine dei centimetri, e in alcuni casi anche dei millimetri, sfruttando la differenza di fase (interferogramma) fra due immagini SAR acquisite sulla stessa area (Gabriel et al., 1989). Le capacità della tecnica DInSAR standard di analizzare gli effetti superficiali prodotti da singoli eventi deformativi, quali terremoti, è stata ampiamente dimostrata (Massonnet et al., 1993) e l'interesse della comunità scientifica si è andato successivamente focalizzando sulle potenzialità offerte dagli approcci interferometrici avanzati in grado di produrre anche serie storiche di deformazione e, quindi, di seguire l'evoluzione temporale dei fenomeni oggetto di studio.

Nell'ultimo decennio, infatti, sono state sviluppate tecniche DInSAR avanzate che permettono di generare serie storiche di deformazione e mappe di velocità al fine di seguire l'evoluzione temporale degli spostamenti del suolo con accuratezze nell'ordine dei 5-10 millimetri. L'applicazione di queste tecniche a svariati casi di studio è stata possibile grazie alla disponibilità del grande archivio di dati SAR acquisito, durante gli ultimi 20 anni, dai sensori SAR di "prima generazione" (ERS, ENVISAT, ALOS, RADARSAT-1), i quali sono caratterizzati da un tempo di rivisitazione di circa un mese e da risoluzioni spaziali che vanno da qualche metro alla decina di metri.

Sulla base di questa esperienza, una "seconda generazione" di sensori SAR, caratterizzati da risoluzioni spaziali dell'ordine del metro e da tempi di rivisitazione di circa una settimana, è già stata posta in orbita (TerraSAR-X, Cosmo-SkyMed, RADARSAT-2), o lo sarà nell'immediato futuro (Sentinel, ALOS-2).

Grazie ai ridotti tempi di rivisitazione, questa nuova generazione di sistemi SAR consente di passare da analisi in tempo differito, come nel caso dei sensori di vecchia generazione per via della cadenza mensile delle acquisizioni, al monitoraggio in tempo quasi reale dei fenomeni deformativi d'interesse. Infatti, sfruttando al massimo i pochi giorni di rivisitazione dei nuovi sistemi SAR, è possibile collezionare un numero elevato di immagini in un tempo ridotto e seguire l'andamento temporale di fenomeni deformativi, anche molto veloci e che si esauriscono nel giro di pochi giorni, mentre sono ancora in atto. Tale caratteristica fa dei sensori di seconda generazione uno strumento importante per il monitoraggio ambientale e la gestione del rischio in scenari di emergenza, quali quelli associati ad eventi sismici, frane ed eruzioni vulcaniche.

Questo lavoro è focalizzato sui nuovi scenari applicativi della tecnica DInSAR aperti dai sistemi SAR di seconda generazione nell'ambito della gestione del rischio ambientale. Per la nostra analisi ci siamo concentrati sull'utilizzo dell'algoritmo DInSAR avanzato denominato Small Baseline Subset (SBAS) (Berardino et al., 2002) che si basa sull'utilizzo di interferogrammi generati a partire da dati SAR acquisiti da posizioni orbitali vicine (piccole *baseline* spaziali) e con brevi tempi di rivisitazione, al fine di minimizzare gli effetti di rumore (decorrelazione) e di massimizzare il numero di punti per i quali è possibile ottenere misure affidabili di deformazione. L'approccio SBAS, inoltre, consente di eseguire analisi multi-scala (Lanari et al., 2004) producendo mappe di velocità di deformazione e le corrispondenti serie storiche a scala sia regionale (con risoluzioni spaziali nell'ordine delle decine di metri) sia locale (alla massima risoluzione spaziale del sensore), con rilevanti implicazioni nel campo della geotecnica e del monitoraggio di aree urbane.

Al fine di valutare al meglio le potenzialità offerte dai sistemi SAR di nuova e vecchia generazione, nel seguito sono presentati i risultati ottenuti elaborando con la tecnica SBAS-DInSAR 6 dataset acquisiti da differenti sensori tra il 1992 e il 2011 sulle aree dell'Etna e del golfo di Napoli, interessate da fenomeni deformativi a scala regionale e locale di origine naturale e antropica.

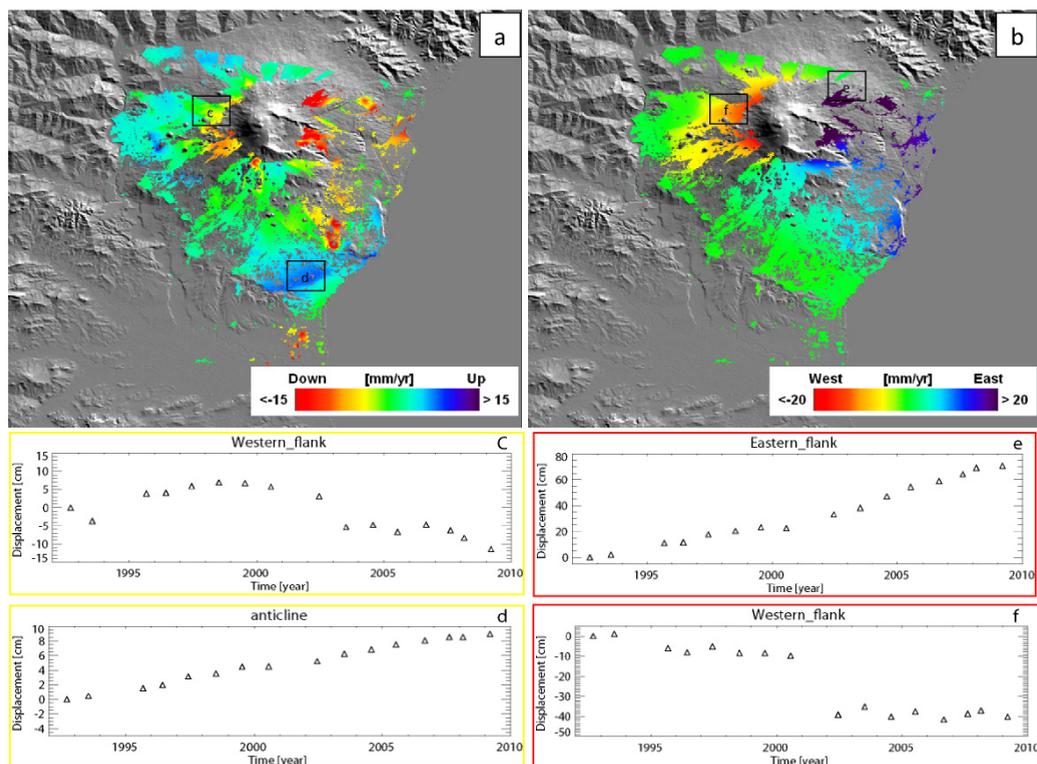


Figura 1 – Mappe della velocità media di deformazione della componente verticale (a) ed est-ovest (b) ottenute dai dati ERS ed ENVISAT relative all'intervallo temporale 1992-2009 e sovrapposte al modello digitale del terreno dell'area esaminata. (c-d) Serie temporale della deformazione verticale dei punti evidenziati con 'c' e 'd' in figura 1a. (e-f) Serie temporale della deformazione est-ovest dei punti evidenziati con 'e' ed 'f' in figura 1b. (tratto da Solaro et al., 2010).

2. L'algoritmo SBAS-DInSAR: dalla prima alla seconda generazione di sensori.

L'elevata disponibilità di dati SAR satellitari e la complessità e varietà dei fenomeni deformativi in atto, senza dimenticare l'interesse scientifico e sociale che queste zone rivestono, ha portato ad individuare come aree di test l'Etna e il golfo di Napoli. In particolare, nel caso dell'Etna sono stati utilizzati 2 dataset ERS-ENVISAT ed uno Cosmo-SkyMed, mentre nel caso del golfo di Napoli, si sono confrontati i risultati ottenuti elaborando un dataset ENVISAT, uno RADARSAT-1 ed uno Cosmo-SkyMed

2a. Etna

Vista l'estensione dell'edificio vulcanico e la tipologia delle deformazioni superficiali in atto, l'Etna è stato studiato applicando la tecnica SBAS-DInSAR a scala regionale. Per quanto riguarda l'analisi con i sensori di vecchia generazione, sono stati sfruttati due dataset ERS-ENVISAT: il primo composto da 88 immagini ERS e 44 ENVISAT acquisite da orbita discendente (Track: 222, Frame: 2853), tra il 1992 e il 2010; il secondo formato da 94 immagini ERS e 53 ENVISAT acquisite da orbita ascendente nell'intervallo temporale 1992-2009. Sono stati generati 387 e 401

interferogrammi differenziali, rispettivamente per il dataset discendente e ascendente, con una dimensione del pixel a terra di circa 100 m x 100 m.

Per entrambe le orbite è stata generata la mappa della velocità media di deformazione e le relative serie storiche proiettate lungo la linea di vista del sensore (LOS). Inoltre, beneficiando della disponibilità di due diverse orbite di acquisizione, sono state stimate le componenti di spostamento verticale ed orizzontale (est-ovest), le cui mappe di velocità media relative al periodo 1992-2009 sono mostrate rispettivamente in figura 1a e 1b.

La stima delle componenti verticale ed orizzontale è stata eseguita anche per le serie storiche di deformazione, mediando opportunamente i dati ascendenti e discendenti su base annuale al fine di riportarli su un passo temporale comune. Alcuni esempi delle serie storiche ottenute sono mostrati nelle figure 1c-f, dove è possibile osservare il complesso campo di deformazione che caratterizza l'edificio vulcanico dell'Etna. In particolare, si può notare come lo spostamento verticale del fianco ovest sia caratterizzato da una fase di sollevamento negli anni '90, seguita da un effetto di

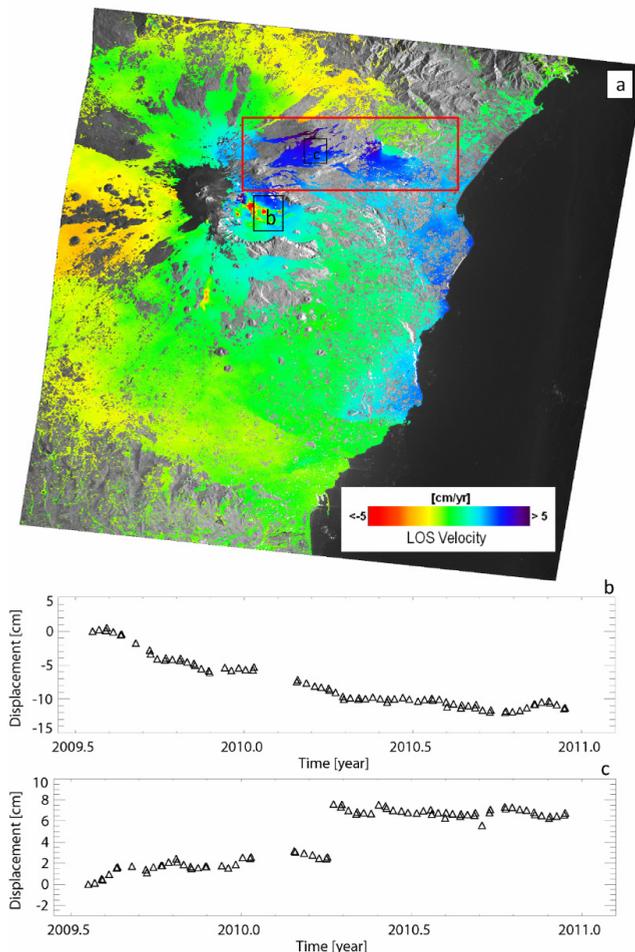


Figura 2 – (a) Mappa della velocità media di deformazione ottenuta dai dati Cosmo-SkyMed relative all'intervallo temporale 2009-2010. (b-c) Serie storiche di deformazione di due punti scelti in corrispondenza dell'edificio vulcanico. Il riquadro rosso indica l'area rappresentata nelle Figure 3a e 3b.

deflazione correlato agli eventi sismici ed eruttivi del 2001 e del 2002-2003 (figura 2c). Viceversa, l'anticlinale alla base dell'edificio vulcanico mostra un sollevamento costante per tutto il periodo di osservazione (figura 2d).

Per quanto riguarda le componenti orizzontali di deformazione rilevate sui fianchi est ed ovest, esse presentano significativi spostamenti rispettivamente verso oriente ed occidente (figure 2e e 2f).

Oltre ai dataset ERS ed ENVISAT appena presentati, sono state analizzate 78 immagini SAR acquisite da orbita discendente dalla costellazione Cosmo-SkyMed nell'intervallo temporale Luglio 2009-Dicembre 2010. In questo caso, sono stati generati 232 interferogrammi differenziali con dimensione del pixel di circa 25 m x 25 m. In figura 2a viene mostrata la mappa della velocità media di deformazione sovrapposta ad un'immagine di ampiezza dell'area. Si osserva uno spostamento, limitato a Nord dalla faglia della Pernicana (riquadro rosso in fig. 2a), del fianco est che risulta in avvicinamento al sensore. Il fianco ovest, viceversa, presenta uno spostamento in direzione opposta rispetto al fianco est. Infine, si nota una subsidenza locale riconducibile a fenomeni di compattazione dei flussi lavici all'interno della Valle del Bove e sul fianco sud. Vengono mostrate come esempio due serie storiche di spostamento relative a due punti localizzati nella Valle del Bove (figura 2b) e lungo la faglia della Pernicana (figura 2c).

Per comprendere meglio le potenzialità offerte dai sensori di nuova generazione, è stato effettuato un confronto qualitativo tra i risultati Cosmo-SkyMed ed ENVISAT in termini di copertura spaziale e campionamento temporale delle misure ottenute. In particolare, le figure 3a e 3b mostrano le mappe delle velocità medie di deformazione relative ai dati discendenti Cosmo-SkyMed ed ENVISAT in corrispondenza di una porzione del fianco NE (evidenziato da un riquadro rosso in

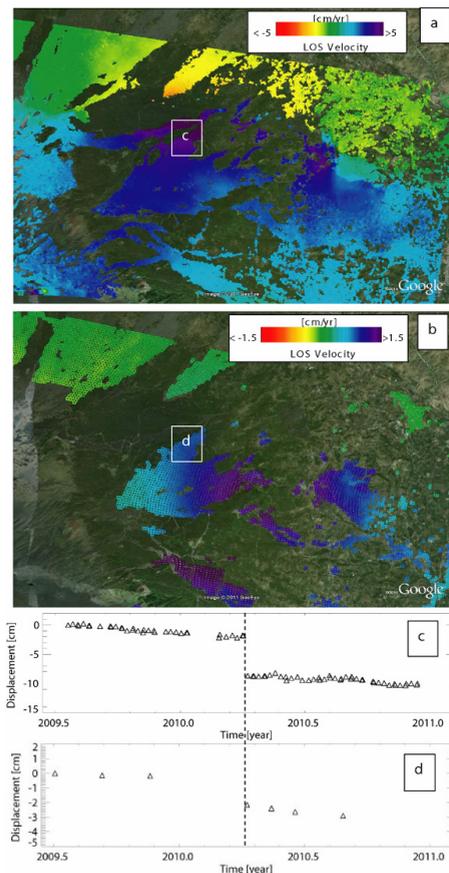


Figura 3 – Confronto tra i dati Cosmo-SkyMed ed ENVISAT (a) Mappa della velocità media di deformazione relativa all'area evidenziata dal riquadro rosso in figura 2a ottenuta dai dati Cosmo-SkyMed. (b) Mappa della velocità media di deformazione relativa all'area evidenziata dal riquadro rosso in figura 2a ottenuta dai dati ENVISAT. (c) Serie storica di deformazione ottenuta dai dati Cosmo-SkyMed dell'area in corrispondenza della Pernicana indicata con 'c' in figura 3a. (d) Serie storica di deformazione ottenuta dai dati ENVISAT dell'area in corrispondenza della Pernicana indicata con 'd' in figura 3b. La linea tratteggiata indica l'evento sismico di magnitudo $M=3.6$ del 03 dell'Aprile 2010 in corrispondenza della Pernicana.

fig. 2a). E' evidente l'aumento del numero dei pixel coerenti rilevati passando dai sensori di vecchia generazione (ENVISAT) a quelli di nuova generazione (Cosmo-SkyMed). Per quanto concerne il confronto tra i campionamenti temporali, le figure 3c e 3d mostrano due serie storiche, una Cosmo-SkyMed ed una ENVISAT, relative all'area della Pernicana (la serie storica ENVISAT è stata limitata all'intervallo temporale 2009-2010 per renderla confrontabile con quella Cosmo-SkyMed). Questo semplice esempio mostra come nel caso del sensore Cosmo-SkyMed sia possibile osservare chiaramente, a differenza di quanto accade per ENVISAT, anche deformazioni repentine non rilevabili senza un adeguato campionamento temporale; in particolare, si può notare come sia ben evidente il salto sulla serie storica Cosmo-SkyMed associato all'evento sismico del 3 Aprile 2010, altrimenti non misurabile tramite i 35 giorni di rivisitazione del sensore ENVISAT (figure 3c e 3d).

2b. Golfo di Napoli

Un'altra area test in cui sono state confrontate le caratteristiche dei sensori di prima e seconda generazione è il golfo di Napoli. Sfruttando l'approccio SBAS-DInSAR questa volta a scala locale, sono stati elaborati tre dataset SAR: il primo è costituito da 39 immagini ENVISAT, acquisite tra il 2003 e il 2007; il secondo da 47 immagini RADARSAT-1 acquisite tra il 2003 e il 2007; il terzo da 81 immagini Cosmo-SkyMed acquisite tra Luglio 2009 e Dicembre 2010.

La prima differenza evidente tra i tre sistemi analizzati è la diversa risoluzione spaziale. In Figura 4 sono mostrati gli effetti dell'aumento della risoluzione nel passaggio dai 20 metri dei sistemi ERS ed ENVISAT (figura 4a) ai 7 metri di RADARSAT-1 (figura 4b), fino a raggiungere i 3 metri della costellazione Cosmo-SkyMed (figura 4c). È chiaro come l'aumento di risoluzione spaziale consenta di avere un maggiore dettaglio, caratteristica strategica nelle analisi di fenomeni deformativi molto localizzati e velocemente variabili nello spazio.

Questa caratteristica è ulteriormente evidenziata in figura 5, dove è mostrata la mappa di velocità di deformazione ricavata dai dati Cosmo-SkyMed e relativa ad un tratto autostradale in prossimità della città di Napoli. Come si può notare, i punti coerenti si dispongono accuratamente lungo i target retro-diffondenti presenti nella scena, come le barriere di contenimento (guardrail) dell'autostrada, consentendo un'analisi puntuale ed accurata delle deformazioni a carico delle singole strutture.

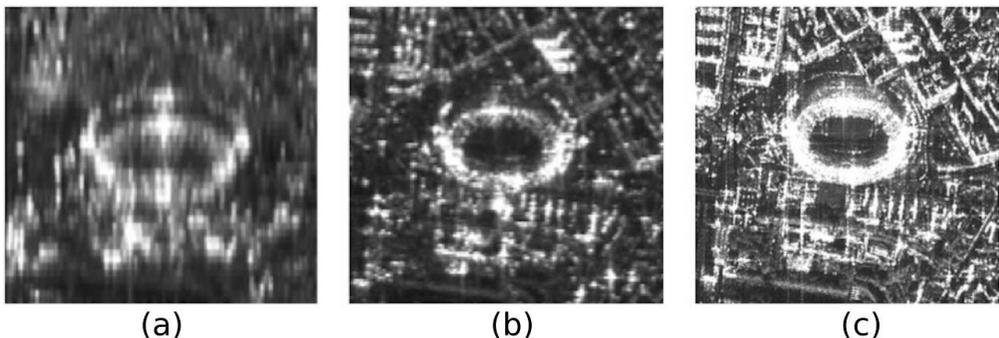


Figura 4 – Immagini SAR dello Stadio San Paolo di Napoli: (a) ERS-ENVISAT, circa 20 m di risoluzione spaziale in ground range; (b) RadarSAT-1, circa 7 m di risoluzione spaziale; (c) Cosmo-SkyMed, circa 3 m di risoluzione spaziale.



Figura 5 – Mappa di velocità di deformazione ricavata dai dati Cosmo-SkyMed, sovrapposta a un'immagine ottica della zona, relativa a un tratto autostradale in prossimità della città di Napoli. I punti coerenti seguono perfettamente i contorni delle strutture presenti e del tracciato autostradale.

L'aumento della risoluzione spaziale ha effetto anche sull'informazione di deformazione che può essere estratta dalle singole strutture. In particolare, in figura 6 sono mostrate le mappe di velocità di spostamento, sovrapposte ad un'immagine ottica della scena, relative all'area della stazione ferroviaria della città di Napoli, ottenute applicando la tecnica SBAS-DInSAR ai tre diversi dataset SAR disponibili. Le figure 6a e 6b sono relative, rispettivamente, ai dataset ENVISAT e RADARSAT-1 acquisiti entrambi nel periodo 2003-2007; la figura 6c è relativa al dataset Cosmo-SkyMED, acquisito nel periodo Luglio 2009 - Dicembre 2010.

Le figure 6a e 6b riguardano il medesimo intervallo temporale ed evidenziano identici pattern deformativi legati agli scavi della nuova linea metropolitana, realizzati intorno al 2005. La principale differenza è legata al maggior numero di punti coerenti individuati nell'analisi RADARSAT-1 (figura 6 b) ed è dovuta all'aumento di risoluzione spaziale rispetto al caso del dataset ENVISAT (Figura 6a). Nonostante ciò, il passaggio dal sensore ENVISAT al sensore RADARSAT-1 non modifica lo scenario applicativo, poiché entrambi i satelliti acquisiscono con un tempo di rivisitazione di circa un mese. Tale caratteristica non consente di utilizzare efficacemente questi sensori per il monitoraggio in tempo quasi reale di fenomeni deformativi noti. Il discorso cambia per la costellazione Cosmo- SkyMed che può acquisire immagini SAR ogni 4 giorni.

Dall'analisi di figura 6c, si può notare come sia stato possibile ricavare l'informazione di spostamento quasi per ogni struttura presente nell'area esaminata; tale risultato è stato ottenuto grazie alla ridotta baseline temporale con cui è stato acquisito il dataset, che ha limitato fortemente il rumore legato alla decorrelazione temporale.

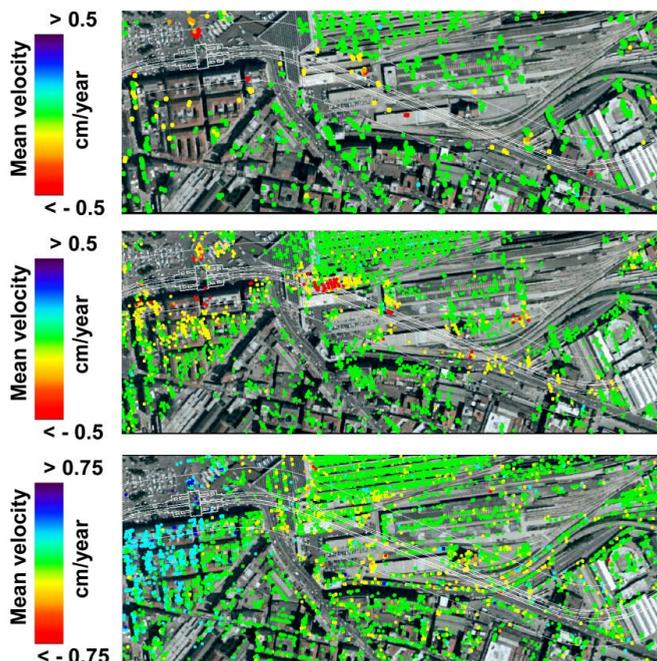


Figura 6 – Confronto tra le mappe di velocità ENVISAT (a), RADARSAT-1 (b) e Cosmo-SkyMed (c). Alle mappe di velocità è sovrapposto il tracciato della metropolitana di Napoli (linee di colore bianco).

A causa della differente copertura temporale del dataset Cosmo-SkyMed rispetto a quelli ENVISAT e RADARSAT-1, non sono visibili gli effetti degli scavi sotterranei effettuati intorno al 2005. È, tuttavia, ben visibile un generale sollevamento in corrispondenza della zona a sinistra di figura 6c, che è anche quella maggiormente interessata dagli abbassamenti legati agli scavi (figure 6a e 6b). Tale fenomeno è probabilmente dovuto a un'azione di consolidamento effettuata al termine degli scavi della galleria metropolitana.

3. Conclusioni

In questo lavoro è stata eseguita un'analisi comparata della tecnica SBAS-DInSAR applicata a sensori di vecchia e nuova generazione in due aree di studio diverse. La prima area è relativa al vulcano Etna ed è stata analizzata elaborando tre dataset SAR acquisiti dai sensori ERS/ENVISAT e Cosmo-SkyMed tramite l'approccio SBAS-DInSAR a scala regionale. Nella seconda area, relativa al golfo di Napoli, sono stati elaborati alla scala locale tre dataset SAR acquisiti dai sensori ENVISAT, RADARSAT-1 e Cosmo-SkyMed.

I risultati ottenuti, sebbene preliminari, mostrano come le caratteristiche dei sensori di nuova generazione (elevata risoluzione spaziale e brevi tempi di rivisitazione) consentano di utilizzare le tecniche DInSAR, e in particolare l'approccio SBAS, nell'analisi e nel monitoraggio di quei fenomeni deformativi molto localizzati e altamente variabili spazialmente, come eventi sismici, e deformazioni a carico di singole infrastrutture.

Inoltre, i ridotti tempi di rivisitazione permettono, in linea teorica, di monitorare i fenomeni deformativi non solo per periodi lunghi (diversi anni) ma anche per periodi brevi (alcuni mesi), cosa

completamente preclusa ai sensori di vecchia generazione. L'elevata frequenza temporale nell'acquisizione delle immagini consente di analizzare e monitorare anche eventi deformativi veloci, come terremoti, eruzioni e frane, i cui effetti si esauriscono nel giro di pochi mesi o poche settimane.

Bibliografia

- Berardino, P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E. (2002), "A new Algorithm for Surface Deformation Monitoring based on Small Baseline Differential SAR Interferograms", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40, 11: 2375-2383.
- Gabriel A. K., Goldstein R. M., Zebker H. A. (1989), "Mapping small elevation changes over large areas: Differential Interferometry", *J. Geophys. Res.*, 94: 9183-9191.
- Lanari R., Mora O., Manunta M., Mallorqui J.J., Berardino P., Sansosti E. (2004), "A small baseline approach for investigating deformations on full resolution differential SAR interferograms", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42: 1377-1386.
- Massonnet D., Rossi M., Carmona C., Adragna F., Peltzer G., Feigl K., Rabaut T. (1993), "The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry", *Nature* 364 138-142.
- Solaro G., Acocella V., Pepe S., Ruch J., Neri M., Sansosti E., (2010) "Anatomy of an unstable volcano from InSAR: Multiple processes affecting flank instability at Mt. Etna, 1994-2008", *J. Geophys. Res.*, VOL. 115, B10405.:10.1029/2009JB000820.