

La variazione recente del campo
di deformazione dell'area dei
Campi Flegrei (Napoli) osservata
con dati di Interferometria SAR

Quaderni di Geofisica

A SAR Interferometry map showing ground deformation in the Campi Flegrei area. The map uses a color scale from blue (subsidence) to red (inflation). The number 103 is overlaid on the right side of the map.

103



Quaderni di Geofisica

Direttore

Enzo Boschi

Editorial Board

Raffaele Azzaro (CT)

Sara Barsotti (PI)

Mario Castellano (NA)

Viviana Castelli (BO)

Rosa Anna Corsaro (CT)

Luigi Cucci (RM1)

Mauro Di Vito (NA)

Marcello Liotta (PA)

Simona Masina (BO)

Mario Mattia (CT)

Nicola Pagliuca (RM1)

Umberto Sciacca (RM1)

Salvatore Stramondo (CNT)

Andrea Tertulliani - Editor in Chief (RM1)

Aldo Winkler (RM2)

Gaetano Zonno (MI)

Segreteria di Redazione

Francesca Di Stefano - coordinatore

Tel. +39 06 51860068

Fax +39 06 36915617

Rossella Celi

Tel. +39 06 51860055

Fax +39 06 36915617

redazionecen@ingv.it

La variazione recente del campo di deformazione dell'area dei Campi Flegrei (Napoli) osservata con dati di Interferometria SAR

Recent Variation of the Deformation Field of the Campi Flegrei Area (Naples) Inferred by InSAR data

Sven Borgstrom, Valeria Siniscalchi

INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Napoli - Osservatorio Vesuviano)

La variazione recente del campo di deformazione dell'area dei Campi Flegrei (Napoli) osservata con dati di Interferometria SAR

Il monitoraggio geodetico della caldera dei Campi Flegrei, a ovest di Napoli, è stato storicamente effettuato attraverso l'uso di reti geodetiche terrestri e integrato, alla fine degli anni '90, con tecniche di Interferometria SAR (InSAR) da piattaforme satellitari (ERS1-2, ENVISAT) dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA, *European Space Agency*).

Recentemente, oltre ai satelliti ESA operanti in banda C, il monitoraggio interferometrico dei Campi Flegrei viene effettuato anche attraverso l'uso di sensori ad alta risoluzione operanti in banda X, quale TerraSAR-X dell'Agenzia Spaziale Tedesca (DLR, *German Aerospace Center*), per evidenziare deformazioni del suolo di piccola entità, altrimenti non misurabili con i sensori in banda C.

Da Aprile 2011 a oggi, l'area dei Campi Flegrei è stata interessata da un sollevamento di oltre 4 cm, misurabile quindi anche attraverso ASAR-ENVISAT, nonostante le limitazioni derivanti dallo spostamento della piattaforma satellitare dalla precedente orbita, avvenuto alla fine del 2010.

In questo lavoro vengono presentati i risultati dell'elaborazione interferometrica dei dati ASAR-ENVISAT relativi al periodo Gennaio 2011-Febbraio 2012, che evidenziano un valore della deformazione del suolo comparabile con i risultati ottenuti attraverso altre tecniche geodetiche.

G eodetic monitoring of Campi Flegrei caldera, west of Naples, has been historically carried out through ground-based networks and integrated at the end of the nineties with space-borne InSAR techniques, exploiting the SAR sensors on-board the ERS1-2 and ENVISAT satellites from the European Space Agency (ESA).

Recently, besides the ESA satellites operating in the C-band, InSAR monitoring of Campi Flegrei area has been complemented also by high resolution SAR sensors, i.e. TerraSAR-X from the German Aerospace Center (DLR) operating in the X-band, in order to measure also small ground deformations, otherwise not detectable by C-band sensors.

Starting from April 2011, Campi Flegrei area underwent an uplift phase of more than 4 cm till now, strong enough to be detected also through ASAR-ENVISAT observations, in spite of the limitations due to the satellite orbital switch at the end of 2010.

In this paper the results of ASAR-ENVISAT data processing are presented for the period from January 2011 to February 2012, showing a ground deformation value comparable with the outcomes of other geodetic techniques.

Introduzione

I Campi Flegrei, situati a ovest della città di Napoli, presentano un assetto strutturale caratterizzato da una complessa caldera risorgente formatasi a seguito delle eruzioni dell'Ignimbrite Campana (39 ka) e del Tufo Giallo Napoletano (15 ka) [Orsi et al., 1999; Orsi et al., 2004; Deino et al., 2004].

L'attività vulcanica successiva all'eruzione del Tufo Giallo Napoletano è rimasta confinata all'interno della caldera ed è

stata caratterizzata da eruzioni di tipo prevalentemente esplosivo [Di Vito et al., 1999]. Tale attività si conclude in epoca storica con l'eruzione del 1538, che ha generato il *Tuff Cone* di Monte Nuovo [Di Vito et al., 1987; D'Oriano et al., 2005]. Tuttavia, già in epoca storica, i Campi Flegrei sono stati interessati da fenomeni di sollevamento e subsidenza, talora anche con attività sismica: tali evidenze possono essere dedotte sia dalle cronache storiche che dalla posizione attuale di alcuni manufatti di interesse archeologico nell'area, come il Tempio di Serapide a Pozzuoli.

In epoca recente, vanno menzionate le due crisi bradisismiche del 1969-1972, con un sollevamento massimo di 1.766 m (± 6 mm) [Corrado et al., 1977] e del 1982-1984, caratterizzata da un sollevamento massimo di 1.788 m (± 5 mm) [Berrino et al., 1984; Dvorak et al., 1991].

Da Gennaio 1985 l'area dei Campi Flegrei è interessata da una fase di subsidenza interrotta solo da piccoli episodi di sollevamento, con periodi medi di ritorno di circa 5 anni a partire dal 1989 fino all'estate del 2000 [Berardino et al., 2002; Lanari et al., 2004; Borgstrom et al., 2006a; Borgstrom et al., 2006b]. Successivamente a tale data, con esclusione dell'evidente episodio di sollevamento verificatosi nel 2005-2006 [Berardino et al., 2008], inizia un periodo caratterizzato da un'alternanza di sollevamenti e stasi nel moto del suolo con un andamento completamente differente rispetto a quello registrato tra il 1985 e il 2000 [Del Gaudio et al., 2009].

1. Sorveglianza geodetica dell'area flegrea

Storicamente il monitoraggio geodetico dell'area flegrea viene effettuato avvalendosi di reti uniformemente distribuite sull'area oggetto della sorveglianza (figura 1).

Tali reti, pur consentendo precisioni molto elevate nella misura della deformazione, restituiscono solo l'informazione relativa al punto stazione o, al più, correlata alla geometria delle stesse quando costituite da più punti di misura, non consentendo, quindi, di evidenziare eventuali migrazioni del campo di deformazione al di fuori delle reti stesse.

Per sopperire a tale limitazione, a partire dalla fine degli anni '90 si è deciso di avvalersi anche dell'Interferometria SAR da piattaforma satellitare che, per le sue caratteristiche intrinseche, consente di investigare aree a più vasta scala, consentendo altresì di individuare eventuali nuovi siti verso cui indirizzare successivamente indagini a scala "puntuale". Inoltre, anche la frequenza temporale di osservazione è andata migliorando nel tempo, passando da tempi medi di "rivisita" di oltre un mese (ALOS-PALSAR, ERS1-2, ENVISAT) a pochi giorni (TerraSAR-X, costellazione COSMO-SkyMed) consentendo un monitoraggio "quasi" continuo su vasta scala di eventuali fenomenologie eruttive.

Anche la possibilità di disporre di sensori che impiegano diverse bande dello spettro elettromagnetico consente di osservare fenomeni diversi, passando da un'informazione a scala maggiore ricavata dai satelliti operanti in banda C

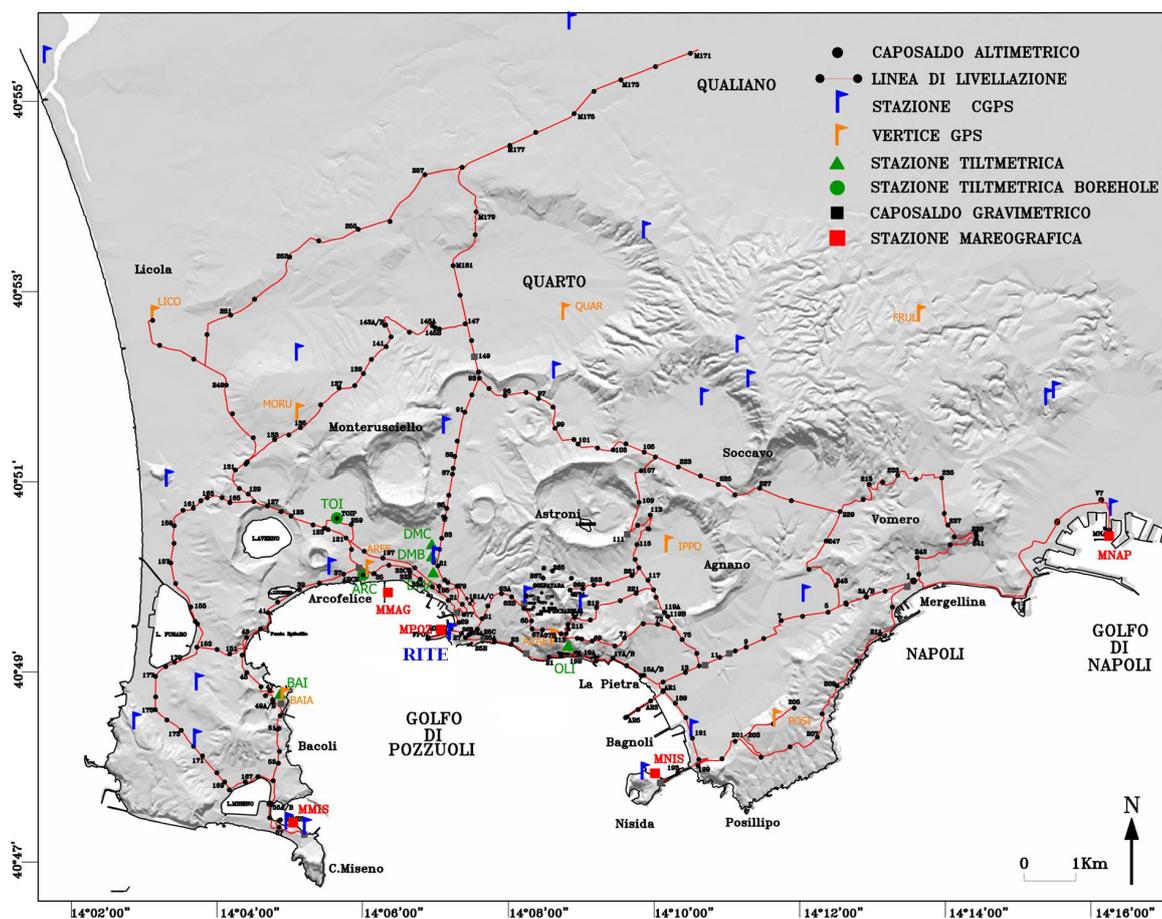


Figura 1 Reti di sorveglianza geodetica ai Campi Flegrei (per gentile concessione di C. Del Gaudio, INGV-Osservatorio Vesuviano).
Figure 1 Geodetic surveillance networks at Campi Flegrei (image courtesy C. Del Gaudio, INGV-Osservatorio Vesuviano).

($\lambda = 5.6$ cm: ERS1-2, ENVISAT), a un'informazione di dettaglio tipica dei sensori ad alta risoluzione operanti in banda X ($\lambda = 3$ cm: TerraSAR-X, COSMO-SkyMed).

Tra i limiti di applicabilità dell'Interferometria SAR vanno tipicamente annoverati fenomeni di decorrelazione spaziale (valori elevati della *baseline* spaziale, solitamente intesa come componente perpendicolare della distanza tra due successivi passaggi del sensore sull'area d'interesse) e temporale (valori elevati della *baseline* temporale, intesa come intervallo di tempo tra le due acquisizioni, con conseguente perdita di coerenza). Ulteriori fattori limitanti sono legati alla geometria di acquisizione in funzione della topografia dell'area investigata (*foreshortening*, *layover*, *shadowing*), agli artefatti atmosferici (ai quali si sopperisce processando serie temporali lunghe, così da minimizzarne gli effetti), nonché alla necessità di disporre di un DEM (*Digital Elevation Model*) di precisione dipendentemente dalla banda elettromagnetica utilizzata.

In definitiva, l'esperienza ci insegna che solo l'integrazione tra tecniche geodetiche classiche (es. livellazione geometrica, tiltmetria, ecc.) e spaziali (GPS, Interferometria SAR) ci consente di conseguire la miglior conoscenza possibile del campo di deformazione agente nell'area d'interesse.

2. Misure recenti di Interferometria SAR nell'area dei Campi Flegrei

La necessità di monitorare deformazioni di piccola entità, tipiche dell'area flegrea, ci ha spinto di recente ad utilizzare, contemporaneamente ad ASAR-ENVISAT, anche sensori ad alta risoluzione, come TerraSAR-X.

Tale sensore, ad esempio, è stato utilizzato con successo per evidenziare l'episodio di degassamento estremamente localizzato, verificatosi nel Dicembre 2009 nell'area di Pisciarelli a est del cratere della Solfatara [Minet et al., 2010; Minet et al., 2012].

Da Aprile 2011, l'area dei Campi Flegrei è interessata da un sollevamento, a oggi, di oltre 4 cm; l'entità della deformazione è perciò tale da poter essere misurata anche attraverso il sensore ASAR-ENVISAT, operante in banda C.

Si noti che l'utilizzo di tale sensore è stato fortemente limitato dopo la fine del 2010, quando la piattaforma satellitare è stata spostata su di un'orbita più bassa di circa 17 km, impedendo quindi di generare serie temporali risultanti dalla combinazione delle acquisizioni recenti con quelle precedenti la data di cui sopra.

Ciononostante, in conseguenza del rigoroso controllo alle nostre latitudini delle orbite discendenti della piattaforma satellitare, i valori delle *baselines* perpendicolari delle coppie interferometriche analizzate sono risultati tipicamente molto bassi, consentendo quindi di utilizzare ogni passaggio discendente disponibile per l'area d'interesse.

2.1 Analisi dei dati di Interferometria SAR

L'analisi dei dati ASAR-ENVISAT, relativi al periodo Gennaio 2011-Febbraio 2012, è stata effettuata avvalendosi del software ROI_PAC 3.0.1 (*Repeat Orbit Interferometry PACKage*) sviluppato dal JPL (*Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, USA*). Le immagini utilizzate (*ASAR Image Mode*) sono caratterizzate da *frames* di dimensioni 70x100 km, con un angolo di vista del sensore di $\sim 41^\circ$ (*swath IS 6*).

È stato inoltre impiegato un fattore di *multi-look* (*range x azimuth*) di 4 x 12 *pixels*, risultante in una risoluzione di ~ 30 m in *range* per ~ 50 m in *azimuth*; gli interferogrammi ottenuti sono stati precedentemente filtrati con il metodo proposto da R.M. Goldstein e C.L. Werner [Goldstein and Werner, 1998] e quindi "srotolati" per mezzo dell'algoritmo *Snaphu* (*Statistical-cost, Network-flow Algorithm for Phase Unwrapping*) [Chen and Zebker, 2001].

I valori delle *baselines* perpendicolari di tutte le coppie interferometriche analizzate (tabella 1) ricadono in un intervallo molto basso, tranne che per la sola coppia 28/01/2011-24/12/2011.

DATA	B.L. (m)	Btemp (gg)
28/01/11-27/02/11	26	30
28/01/11-28/04/11	98	90
28/01/11-28/05/11	101	120
28/01/11-27/06/11	55	150
28/01/11-27/07/11	115	180
28/01/11-25/09/11	143	240
28/01/11-24/12/11	329	330
28/01/11-22/02/12	24	390

Tabella 1 Valori delle *baselines* perpendicolari (in m) e temporali (in giorni) per ciascuna delle coppie interferometriche analizzate.

Table 1 Perpendicular and temporal baseline values (meters, days) for each interferometric pair analysed.

In considerazione dei bassi valori delle *baselines* perpendicolari delle coppie interferometriche analizzate e dei relativi intervalli temporali (sino a poco più di un anno), per i quali era verosimile non attendersi fenomeni evidenti di decorrelazione, si è deciso di elaborare i dati con un approccio interferometrico classico, imponendo l'acquisizione del 28/01/2011 come *master* e combinandola con tutte le acquisizioni successive, così da evidenziare la variazione spazio-temporale del campo di deformazione dell'area flegrea da Gennaio 2011 a Febbraio 2012, corrispondente all'ultima acquisizione analizzata.

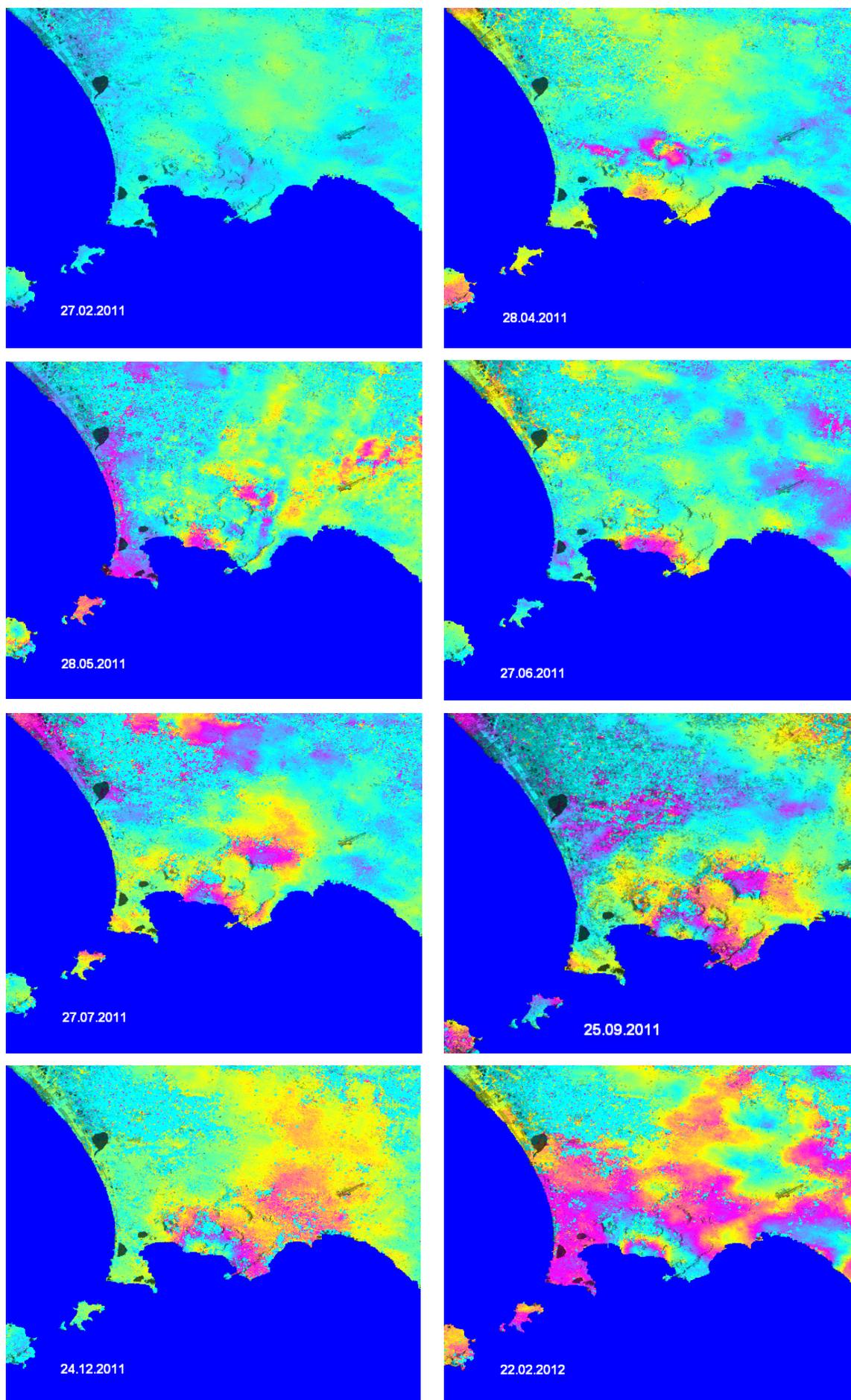


Figura 2 Interferogrammi differenziali riferiti alla scena *master* del 28/01/2011 - Particolare sui Campi Flegrei (ASAR-ENVISAT *Image Mode*, *swath 6*, orbite discendenti).
Figure 2 Differential interferograms referred to the 28/01/2011 master scene - Detail on Campi Flegrei (ASAR-ENVISAT *Image Mode*, *swath 6*, descending orbits).

Per filtrare il contributo dei bersagli incoerenti presenti nella scena, si è altresì deciso di elaborare i dati utilizzando una soglia di coerenza di 0.4.

In figura 2 vengono riportati gli interferogrammi differenziali con le relative date, ciascuno dei quali riferito alla scena *master* del 28/01/2011.

Dalla sequenza si evince il periodo di inizio della deformazione, apprezzabile a partire da Aprile-Maggio 2011, che si espande progressivamente fino a Febbraio 2012, dove si nota chiaramente la presenza di almeno una frangia interferometrica completa (2.8 cm di deformazione lungo la

linea di vista del sensore). L'interferogramma del 25/09/2011 risulta differente rispetto agli altri a causa di una diversa acquisizione effettuata dal sensore sull'area d'interesse.

La deformazione complessiva viene evidenziata dall'analisi della mappa mostrata in figura 3. La deformazione cumulativa è confermata dal confronto con l'andamento della serie temporale ottenuta da dati GPS in continuo (CGPS) relativi alla stazione RITE (Rione Terra, figura 4), presente proprio nell'area di massimo uplift in corrispondenza del centro abitato di Pozzuoli (figura 1).

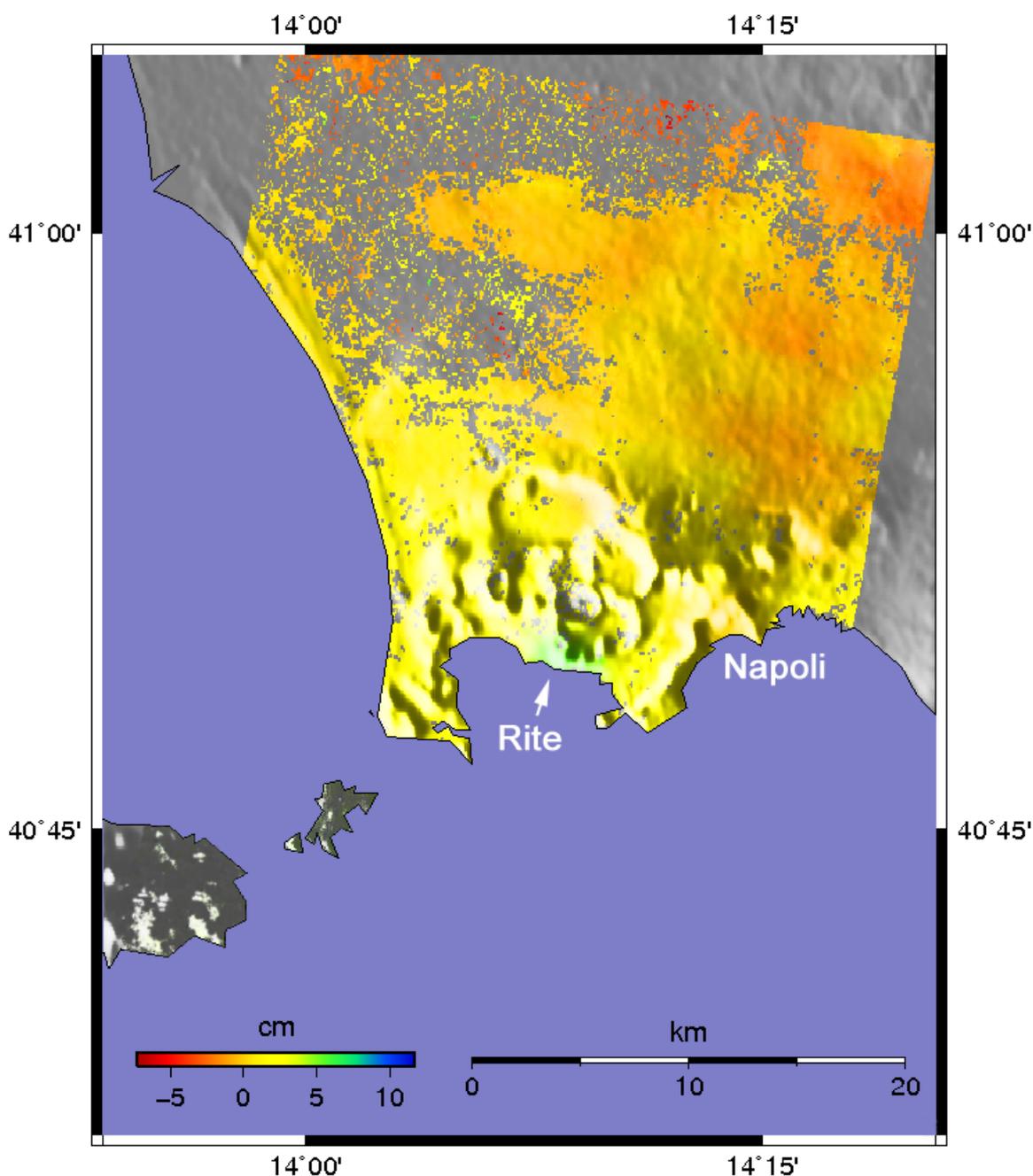


Figura 3 Mappa della deformazione cumulativa (28/01/2011-22/02/2012) - Particolare sui Campi Flegrei.
 Figure 3 Cumulative deformation map (28/01/2011-22/02/2012) - Detail on Campi Flegrei.

3. Conclusioni

L'analisi dei dati interferometrici effettuata, ha consentito di seguire in maniera ottimale l'andamento spazio-temporale della deformazione in atto nell'area flegrea, in accordo con i dati GPS in continuo nell'intervallo temporale investigato.

L'assenza di acquisizioni attendibili sull'orbita ascendente alle nostre latitudini, per una precisa scelta dell'ESA di lasciare in moto libero la piattaforma (*drifting phase*) lungo tali passaggi effettuati nell'emisfero settentrionale, non consente di effettuare confronti tra dati ascendenti e discendenti; ciò si traduce nell'impossibilità di valutare eventuali spostamenti planimetrici oltre a non consentire di discriminare il segnale di deformazione reale da possibili errori di *phase unwrapping* presenti nelle scene analizzate. L'area indagata, tuttavia, presenta storicamente una deformazione prevalentemente verticale ed è quindi lecito assumere che la deformazione osservata dal SAR sia per la gran parte da assegnare ad uno spostamento verticale. A tal fine, diviene pertanto fondamentale il confronto tra i dati interferometrici e i risultati ottenuti con le altre metodologie geodetiche, non solo per effettuare una validazione del dato finale ma anche per meglio seguire l'evoluzione futura del fenomeno deformativo in atto.

Ringraziamenti

Gli Autori intendono qui ringraziare Eric Fielding del JPL-Caltech per i numerosi e utili suggerimenti per un uso ottimale del codice ROI_PAC.

La mappa di deformazione è stata ottenuta avvalendosi del programma GMT (*Generic Mapping Tools*) sviluppato presso la *School of Ocean and Earth Science and Technology* (SOEST), *University of Hawaii at Manoa*.

Il Modello Digitale del Terreno (DEM) impiegato per l'elaborazione differenziale dei dati interferometrici è stato acquisito dalla missione SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) e reso disponibile sui server del Servizio Geologico Americano (USGS, *United States Geological Survey*).

Le orbite precise del sensore ASAR-ENVISAT sono state ottenute tramite il servizio *web* DORIS dell'Agenzia Spaziale Europea.

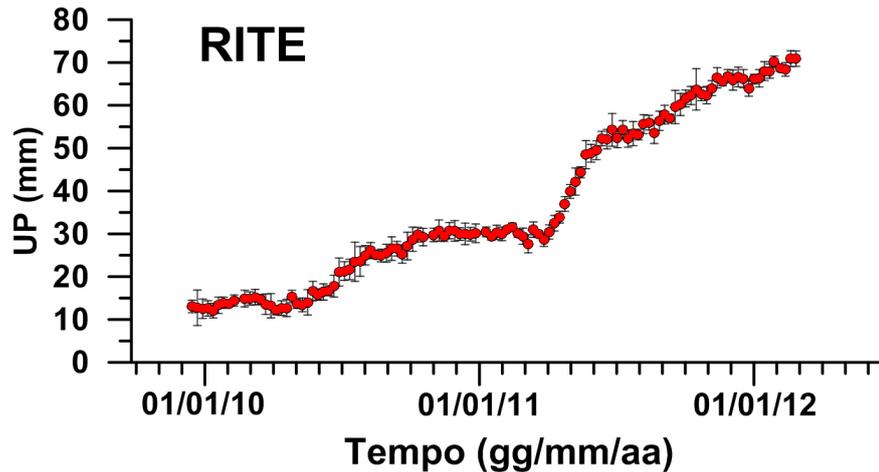


Figura 4 Variazione temporale della componente verticale del moto del suolo registrata dalla stazione GPS in continuo RITE (soluzioni settimanali, barra di errore ad 1σ) (per gentile concessione di P. De Martino, INGV-Osservatorio Vesuviano).

Figure 4 Temporal variation of the vertical component of ground deformation recorded at RITE GPS continuous station (weekly solutions, 1σ error bar) (image courtesy P. De Martino, INGV-Osservatorio Vesuviano).

Bibliografia

- Berardino P., Borgstrom S., Cecere G., Del Gaudio C., De Martino P., Fornaro G., Lanari R., Ricciardi G.P., Ricco C., Sansosti E., Sepe V., Siniscalchi V., (2002). *Un approccio multimetodologico per il controllo delle deformazioni nell'area flegrea*. Atti della 6° Conferenza Nazionale dell'ASITA, Perugia 5-8 Novembre 2002, 1: 409-416.
- Berardino P., Borgstrom S., Aquino I., Casu F., Del Gaudio C., Lanari R., Manunta M., Manzo M., Pepe A., Pepe S., Ricciardi G.P., Ricco C., Sansosti E., Solaro G., Tizzani P., Zeni G., (2008). *Monitoring the Campi Flegrei caldera by exploiting SAR and geodetical data: recent results and future applications*. Proceedings of the "Fringe 2007" ESA Workshop, Frascati (Rome), November 26-30, 2007, on CD-ROM, ISBN 92-9291-213-3, ISSN 1609-042X.
- Berrino G., Corrado G., Luongo G., Toro B., (1984). *Ground deformation and gravity change accompanying the 1982 Pozzuoli uplift*. Bulletin of Volcanology 47 (2), 187-200.
- Borgstrom S., Aquino I., Del Gaudio C., Ricco C., Siniscalchi V., Solaro G., Tizzani P., Ricciardi G.P., (2006a). *Ground deformation monitoring at the Phlegrean Fields (Naples, Italy) from the exploitation of SAR data in the framework of CAT-1 and DUP activities*. Proceedings of the "Fringe 2005" ESA Workshop, Frascati (Rome), November 28-December 2, 2005, on CD-ROM, ISBN 92-9092-921-9, ISSN 1609-042X.
- Borgstrom S., Aquino I., Del Gaudio C., De Martino P., Ricco C., Siniscalchi V., Solaro G., Tizzani P.,

- Ricciardi G.P., (2006b). *A new approach for ground deformation monitoring in volcanic areas: the case of the Phlegrean Fields (Naples, Italy)*. Atti del 3° Workshop AIT sul Telerilevamento a Microonde, Napoli 25-26 Novembre 2004, volume speciale della Rivista Italiana di Telerilevamento, 2006, 35: 7-19.
- Chen C.W. and Zebker H.A., (2001). *Two-dimensional phase unwrapping with use of statistical models for cost functions in nonlinear optimization*. J. Opt. Soc. Amer. A, 18, 338-351.
- Corrado G., Guerra I., Lo Bascio A., Luongo G., Rapolla A., (1977). *Inflation and microearthquake activity of Phlegrean Fields, Italy*. Bulletin of Volcanology 40 (3), 169-188.
- Deino A.L., Orsi G., de Vita S., Piochi M., (2004). *The age of the Neapolitan Yellow Tuff caldera forming eruption (Campi Flegrei caldera - Italy) assessed by ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating method*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 133, 157-170.
- Del Gaudio C., Aquino I., Ricco C., Serio C., (2009). *Monitoraggio geodetico dell'area vulcanica napoletana: risultati della livellazione geometrica di precisione eseguita ai Campi Flegrei a settembre 2008*. Quaderni di Geofisica, No. 66, Febbraio 2009.
- Di Vito M.A., Lirer L., Mastrolorenzo G., Rolandi G., (1987). *The Monte Nuovo eruption Campi Flegrei, Italy*. Bulletin of Volcanology, 49, 608-615.
- Di Vito M.A., Isaia R., Orsi G., Southon J., D'Antonio M., de Vita S., Pappalardo L., Piochi M., (1999). *Volcanic and deformation history of the Campi Flegrei caldera in the past 12 ka*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 91, 221-246.
- D'Oriano C., Poggianti E., Bertagnini A., Cioni R., Landi P., Polacci M., Rosi M., (2005). *Changes in eruptive style during the A.D. 1538 Monte Nuovo eruption (Phlegrean Fields, Italy): the role of syn-eruptive crystallization*. Bulletin of Volcanology, 67, 7: 601-621.
- Dvorak J.J. and Berrino G., (1991). *Recent ground movement and seismic activity in Campi Flegrei, southern Italy, episodic growth of a resurgent dome*. Journal of Geophysical Research, 96, 2309-2323.
- Goldstein R.M. and Werner C.L., (1998). *Radar interferogram filtering for geophysical applications*. Geophysical Research Letters, 25, 21: 4035-4038.
- Lanari R., Berardino P., Borgstrom S., Del Gaudio C., De Martino P., Fornaro G., Guarino S., Ricciardi G.P., Sansosti E., Lundgren P., (2004). *The use of IFSAR and classical geodetic techniques for caldera unrest episodes: application to the Campi Flegrei uplift event of 2000*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 133, 247-260.
- Minet C., Borgstrom S., Avino R., Caliro S., Chiodini G., Minopoli C., (2010). *Improving monitoring techniques by exploiting TerraSAR-X data: an application to Campi Flegrei (Naples, Italy)*. Geophysical Research Abstracts, Vol. 12, EGU2010-8994, 2010, EGU General Assembly, Wien, May 2-7, 2010.
- Minet C., Goel K., Aquino I., Avino R., Berrino G., Caliro S., Chiodini G., De Martino P., Del Gaudio C., Ricco C., Siniscalchi V., Borgstrom S., (2012). *High resolution monitoring of Campi Flegrei (Naples, Italy) by exploiting TerraSAR-X data: an application to Solfatara crater*. Proceedings of the "Fringe 2011" ESA Workshop, Frascati (Rome), September 19-23, 2011, on CD-ROM, ISBN 978-92-9092-261-2, ISSN 1609-042X.
- Orsi G., Civetta L., Del Gaudio C., de Vita S., Di Vito M.A., Isaia R., Petrazzuoli S.M., Ricciardi G.P., Ricco C., (1999). *Short-term deformations and seismicity in the resurgent Campi Flegrei caldera (Italy): an example of active block-resurgence in a densely populated area*. Journal of Volcanology and Geothermal Research (91) 415-451.
- Orsi G., Di Vito M.A., Isaia R., (2004). *Volcanic hazard assessment at the restless Campi Flegrei caldera*. Bulletin of Volcanology, 66, 517-530.

Indice

Introduzione	4
1. Sorveglianza geodetica dell'area flegrea	5
2. Misure recenti di Interferometria SAR nell'area dei Campi Flegrei	6
2.1 Analisi dei dati di Interferometria SAR	6
3. Conclusioni	9
Ringraziamenti	9
Bibliografia	9

Coordinamento editoriale e impaginazione

Centro Editoriale Nazionale | INGV

Progetto grafico e redazionale

Daniela Riposati | Laboratorio Grafica e Immagini | INGV

© 2012 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Via di Vigna Murata, 605

00143 Roma

Tel. +39 06518601 Fax +39 065041181

<http://www.ingv.it>

