

Studio di fattibilità per il
monitoraggio delle deformazioni
del fondo marino tramite GPS in
continuo su una meda elastica
(Golfo di Pozzuoli – Campi Flegrei)

Quaderni di Geofisica

104



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

Studio di fattibilità per il monitoraggio delle deformazioni del fondo marino tramite GPS in continuo su una meda elastica (Golfo di Pozzuoli – Campi Flegrei)

On the Feasibility of Seafloor Deformation Monitoring by Continuous GPS on an Elastic Beacon (Gulf of Pozzuoli – Campi Flegrei)

Prospero De Martino, Sergio Guardato, Umberto Tammaro,
Giovanni Iannaccone

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

Studio di fattibilità per il monitoraggio delle deformazioni del fondo marino tramite GPS in continuo su una meda elastica (Golfo di Pozzuoli – Campi Flegrei)

La misura continua delle deformazioni del suolo fornisce un importante contributo per il monitoraggio di aree vulcaniche attive. Però quando il vulcano è totalmente o parzialmente sommerso, le tecniche tradizionali non possono essere applicate e le misure delle deformazioni del fondo marino sono estremamente complicate e costose. Il presente lavoro mostra come con l'installazione di una stazione GPS in continuo su di una boa, tipo meda elastica, è possibile stimare le deformazioni verticali del fondale marino.

Le misure sono state condotte nella caldera dei Campi Flegrei (Golfo di Pozzuoli, Napoli), i cui movimenti verticali sono connessi al fenomeno del bradisisma. Dalle osservazioni sperimentali, tenendo anche conto dei possibili errori di misura - dovuti essenzialmente alle condizioni meteo-marine che agiscono in parte sulla meda elastica - si evince che è possibile monitorare le deformazioni verticali del fondale marino con risoluzione dell'ordine del centimetro. Questa tecnica è economica ed è di particolare interesse per l'area dei Campi Flegrei, perché estende il monitoraggio delle deformazioni del suolo a mare, contribuendo ad una migliore modellazione del campo deformativo dell'intera caldera.

The continuous measurement of ground deformations is an important contribution to the monitoring of volcanic areas. When the volcano is totally or partially submerged, the traditional geodetic methods cannot be applied and the measures of seafloor deformation are extremely difficult and expensive. This paper describes the installation of a continuous GPS station on an elastic beacon.

The measurements were conducted in the Campi Flegrei Caldera (Gulf of Pozzuoli, Naples), whose vertical displacements are related to the bradyseismic phenomenon. Experimental observations show that it's possible to monitor vertical displacement of seafloor with a resolution of a few centimeters, also taking into account for measurement errors (due to weather and sea conditions acting on the elastic beacon).

This non expensive technique is relevant at Campi Flegrei area, because it extends the ground deformation monitoring at sea, contributing to a better modeling of the deformation field.

Introduzione

Il monitoraggio delle deformazioni del suolo è fondamentale per la comprensione dell'evoluzione dell'attività vulcanica e, conseguentemente, le reti geodetiche forniscono un contributo essenziale alla sorveglianza dei vulcani attivi.

Le misure sono effettuate utilizzando diverse tecniche, quali: GPS, livellazione di precisione, tiltmetria, mareografia, gravimetria e interferometria SAR. Nel caso in cui l'edificio vulcanico sia totalmente o anche parzialmente sommerso, i

metodi geodetici tradizionali non possono essere applicati e le misure risultano estremamente difficili e costose. Recentemente sono state sviluppate alcune tecniche di geodesia marina basate sulla propagazione delle onde acustiche [Bourne et al., 2009]. Il limite principale di queste tecniche è l'estrema variabilità nel tempo della velocità di propagazione delle onde acustiche nell'ambiente marino, con la conseguente impossibilità di attribuire a un assegnato tempo di propagazione una lunghezza di percorso determinata. Infatti, la velocità di propagazione delle onde acustiche in

mare dipende dalla temperatura e dalla salinità dell'acqua che sono fortemente dipendenti dalla radiazione solare e quindi dal ciclo delle stagioni, nonché dal rimescolamento delle acque dovuto alle correnti marine. Questi effetti sono particolarmente pronunciati nelle acque basse delle zone costiere dove è più marcato l'effetto della radiazione solare e la presenza di fiumi o di altri scarichi a mare.

Per ciò che concerne le sole deformazioni verticali del suolo, un metodo non acustico si basa sulla possibilità di misurare la pressione idrostatica sul fondale marino, sottraendo le componenti mareografiche ed atmosferiche, e poi convertendo quest'ultima in altezza della colonna d'acqua monitorandone le variazioni nel tempo [Chadwick et al., 2006]. Tale metodologia è attualmente in corso di sperimentazione presso l'Osservatorio Vesuviano, Sezione di Napoli dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.

Nell'area vulcanica emersa dei Campi Flegrei sono installate fitte reti per il monitoraggio continuo della sismicità, delle deformazioni del suolo e delle emissioni di gas dal suolo e dalle fumarole [D'Auria et al., 2011; Bottiglieri et al., 2010; De Martino et al., 2007; Obrizzo et al., 2009; Ricco et al., 2007; Chiodini et al., 2010]. Inoltre si effettuano periodiche campagne per la misura di parametri geofisici e geochimici. [Del Gaudio et al., 2010; Bianco et al., 2010; Chiodini et al., 2011; Camacho et al. 2011].

Recentemente è stata installata una stazione multiparametrica nel golfo di Pozzuoli che costituisce un primo passo per l'estensione a mare del sistema di monitoraggio dei Campi Flegrei [Iannaccone et al., 2009]. Tale stazione è costituita da una boa, tipo meda elastica, cui è connesso - tramite cavo elettrico - un modulo sottomarino posizionato sul fondale ad una profondità di circa 100 metri equipaggiato con un sensore sismico a larga banda, un accelerometro MEMS triassiale, un idrofono a bassa frequenza, un sensore di pressione di precisione ed un certo numero di sensori di stato.

Dalla fine del 2011, la torretta della parte fuori acqua della meda ospita anche una stazione GPS in continuo. Questa è stata installata con l'obiettivo di verificare la possibilità di utilizzare tale tipo di metodologia per la stima delle deformazioni verticali del suolo in corrispondenza della base della boa sul fondale marino. La boa, infatti, essendo del tipo meda elastica è rigidamente collegata alla zavorra posta sul fondo del mare mediante un cavo meccanico; il galleggiante di spinta, posto a mezz'acqua, ha la funzione di mantenere in trazione il cavo di sostegno. In questo modo, eventuali movimenti verticali del suolo si trasferiscono rigidamente alla parte emersa della boa stessa consentendone pertanto la misura mediante l'utilizzo della stazione GPS.

Questo lavoro descrive la configurazione e le problematiche dell'installazione e riporta un primo set di misure GPS relative a cinque mesi circa di acquisizione dati in continuo. La comparazione con i dati dello stesso periodo relativi ad

altre stazioni GPS esistenti nell'area, evidenzia i limiti e le potenzialità di questa particolare metodologia per la misura delle deformazioni verticali del fondale marino.

1. Caratteristiche della boa e strumentazione GPS

La boa, tipo meda elastica, è installata nell'area dei Campi Flegrei, nel Golfo di Pozzuoli, a circa 2.4 km a sud del porto di Pozzuoli, su un fondale di circa 97 metri di profondità (Figura 1).

La boa è costituita da un galleggiante di spinta, posto a qualche metro appena sotto il livello del mare, in poliuretano espanso di forma tronco-conica su cui è inserito un palo (del diametro di 22 cm) in acciaio AISI 316 che sorregge la torretta emersa. Un cavo di acciaio inox antitorsione, del diametro di 36 mm, mantiene rigidamente connesso il galleggiante alla zavorra posta sul fondo del mare (Figura 1). Il cavo è tenuto in trazione dal galleggiante il quale fornisce una spinta idrostatica di circa 10 tonnellate e dalla zavorra sul fondale (peso fuori acqua di circa 17 tonnellate).

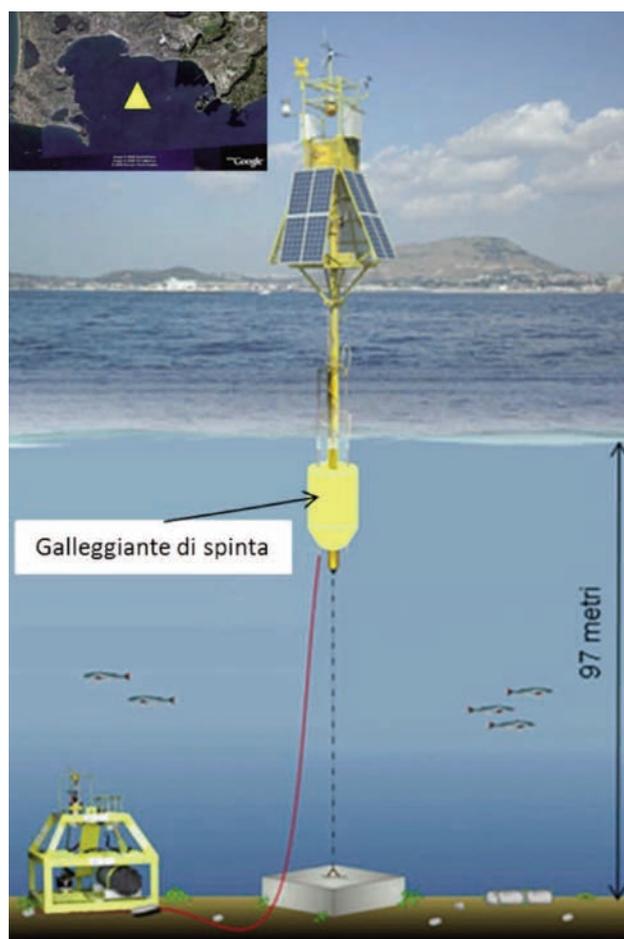


Figura 1 Schema della boa e del modulo di acquisizione dati.
Figure 1 Sketch diagram of the elastic beacon and of data acquisition module on the seafloor.

La torretta della boa è attrezzata con sistema di alimentazione elettrico (pannelli solari e generatore eolico), stazione meteorologica, sistema di trasmissione dati, sensore di heading e tilt, sensori di stato ed elettronica di controllo. Una descrizione dettagliata del sistema è riportata in bibliografia [Iannaccone et al. 2009].

Sulla torretta è stata installata una stazione GPS in registrazione continua, costituita da un ricevitore LEICA GRX1200GGPRO e un'antenna LEICA LEIAX1202. I dati, acquisiti con un intervallo di campionamento di 30 s, sono prelevati da remoto su base giornaliera, e poi archiviati e processati.

Con questa configurazione del sistema, la stazione GPS può considerarsi rigidamente connessa al fondo marino ed eventuali movimenti verticali del suolo potranno essere rilevati. Particolare attenzione va posta nel considerare gli errori dovuti agli effetti dell'inclinazione della boa provocati dall'azione del vento e delle correnti marine agenti sulla parte fuori acqua e sul galleggiante della meda rispettivamente, e quelli introdotti dalle possibili variazioni di lunghezza del cavo di trazione dovuti a effetti termici. Nel paragrafo successivo sono analizzate queste possibili sorgenti di errore.

2. Errori sulle misure GPS: inclinazione e dilatazione termica della boa

L'azione del vento e delle correnti marine, che agiscono principalmente sulla parte emersa della struttura e sul galleggiante di spinta, in determinate condizioni possono provocare un'inclinazione della boa stessa con la conseguente variazione della posizione verticale del punto di misura GPS.

Dal momento che la stazione GPS consente di misurare anche i movimenti orizzontali della boa questo tipo di errore è facilmente determinabile. La Figura 2 riporta una schematizzazione della meda ai fini del calcolo della variazione di altezza dell'antenna GPS per effetto dell'azione dovuta all'inclinazione della meda.

L'antenna è posta sul punto B e può spostarsi nel punto C a causa dell'inclinazione della boa; pertanto, il segmento BH rappresenta l'errore (sempre negativo) nella stima della quota ed è funzione dello spostamento orizzontale CH rispetto alla posizione verticale di riposo AB. La quantità CH è misurata dal GPS (modulo del vettore planimetrico dato dalle componenti NS ed EW) e con semplici considerazioni trigonometriche si può determinare BH ($BH = CH \tan \gamma$). Il grafico di Figura 3 mostra l'andamento della quantità BH (riduzione di quota) in funzione dello spostamento orizzontale CH.

Da essa si evince che ad uno spostamento orizzontale di un metro corrisponde un errore di quota pari a -5 mm, mentre per uno spostamento di 3 m si arriva a circa -45 mm di errore dovuti all'inclinazione della meda.

Passiamo ora a valutare gli errori sulle misure GPS dovuti

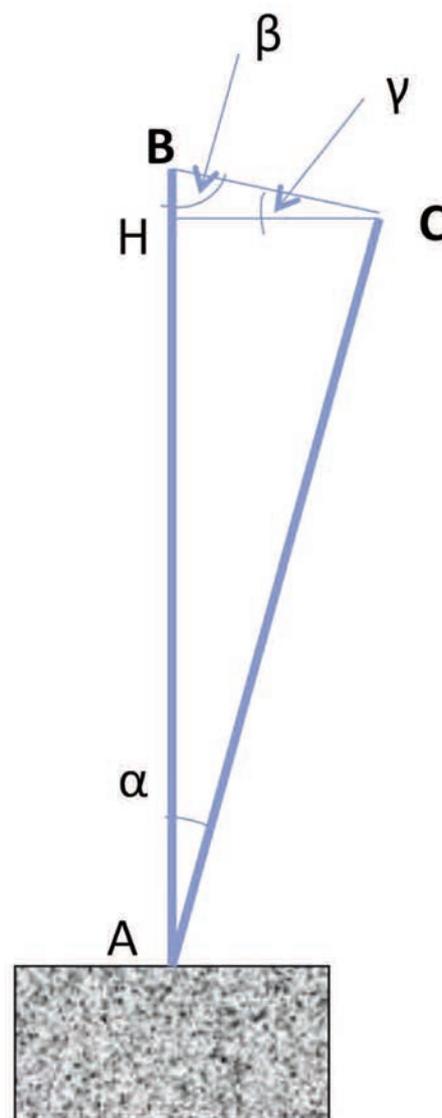


Figura 2 Errore verticale (BH) in funzione dello spostamento orizzontale (CH) della boa indotto da condizioni meteo-marine.
Figure 2 Error calculation (BH) as a function of horizontal displacement (CH) of buoy induced by weather and sea conditions.

alle dilatazioni termiche delle parti metalliche costituenti la meda elastica. La variazione di temperatura dell'acqua dovuta al ciclo delle stagioni produce una dilatazione termica del cavo di trazione e del palo di sostegno della torretta che si traducono in variazioni di lunghezza degli stessi.

Consideriamo per semplicità una struttura di acciaio della lunghezza di 100 m. Questa, sottoposta ad una variazione di temperatura ΔT subirà una variazione di lunghezza ΔL , in accordo alla relazione:

$$\Delta L = L(T_0) \alpha \Delta T \quad (1)$$

con $L(T_0)$ lunghezza alla temperatura T_0 e α coefficiente di dilatazione lineare. Nel caso dell'acciaio, α è dell'ordine di $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, quindi, l'aumento di $1 \text{ } ^\circ\text{C}$ produce un aumento di

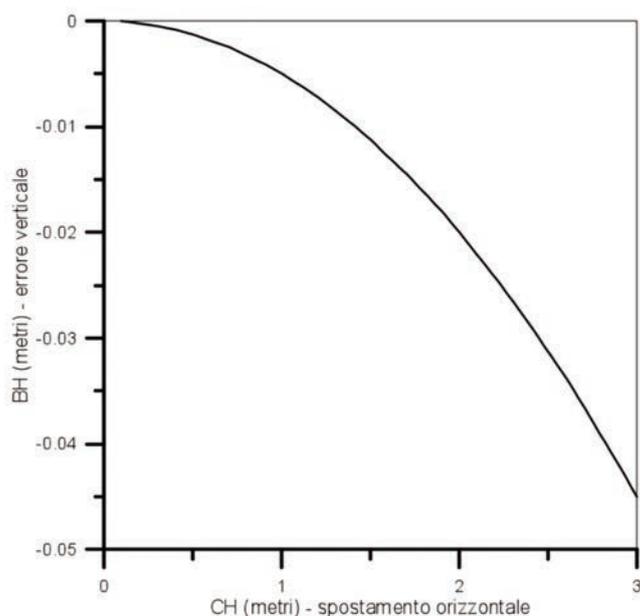


Figura 3 Errore sulla quota GPS in funzione dello spostamento orizzontale.

Figure 3 Elevation error versus horizontal displacement.

10^{-6} m per ogni metro di lunghezza. Pertanto, se si avesse un riscaldamento uniforme dell'intera colonna d'acqua, essendo il cavo lungo circa 100 m, l'aumento di un grado centigrado produrrebbe un allungamento di circa 10^{-4} m. In realtà le variazioni termiche del mare riguardano soltanto i primi metri d'acqua. Infatti, dalla Figura 4, nella quale sono riportati i profili di temperatura misurati a poca distanza dalla boa e rappresentativi del sito stesso, si osserva che la variazione massima di temperatura interessa i primi 50 m della colonna d'acqua con una variazione media stagionale di circa 6°C .

Pertanto, applicando la relazione (1), si ottiene che la variazione di lunghezza ΔL dovuta agli effetti di dilatazione termica, sia del cavo di trazione sia del palo di sostegno, è inferiore al millimetro (su una variazione di temperatura di 6°C), quindi ininfluenza sulla misura della quota GPS.

3. Elaborazione dati GPS ed analisi delle serie temporali

Date le caratteristiche della meda discusse nei precedenti paragrafi, i dati giornalieri acquisiti alla stazione GPS installata sulla torretta della boa (CFB1 in Figura 5) sono stati elaborati in *post-processing* con il metodo del posizionamento relativo cinematico utilizzando il modulo RTKPOST del software *open-source* RTKLIB 2.4.1 (RTKLIB, *An open source program package for GNSS positioning*, <http://www.rtklib.com>).

Come stazione di riferimento è stata scelta quella di LICO (Figura 5), facente parte della Rete NeVoCGPS (29 stazioni, di cui 13 nell'area flegrea) per il monitoraggio dei vulcani napoletani [De Martino et al., 2007; Bottiglieri et al., 2007, 2010; Troise et al. 2007] e posizionata all'esterno della caldera flegrea, ad una distanza di circa 10 km da CFB1, ottimale per limitare gli errori tipici di un rilievo cinematico, principalmente dovuti ad effetti troposferici.

Sono stati processati allo stesso modo anche i dati della stazione GPS permanente di ACAE (Figura 5), ubicata alla stessa distanza dalla stazione di riferimento LICO, allo scopo di valutare l'attendibilità e precisione delle soluzioni cinematiche del software RTKLIB dal confronto con le soluzioni ufficiali del monitoraggio, ottenute dal processamento in modalità statica con il software scientifico Bernese 5.0 [Dach et al. 2007].

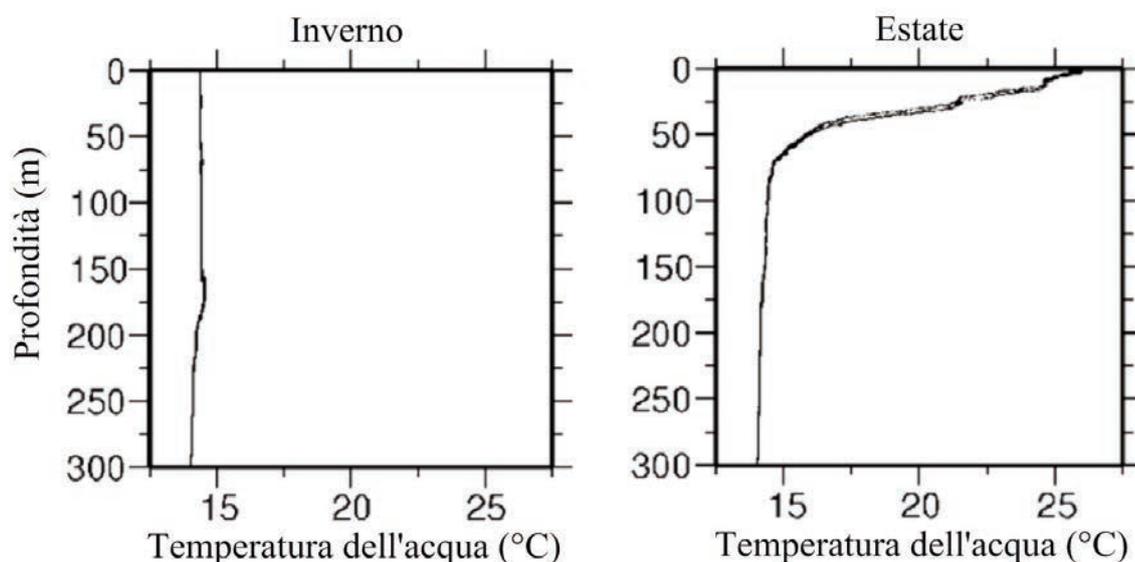


Figura 4 Profili di temperatura del mare in funzione della profondità per il periodo invernale ed estivo (da [Stabile et al., 2007]).

Figure 4 Temperature profiles of the sea for the winter and summer periods (from [Stabile et al., 2007]).

In Tabella 1 sono riportate le principali opzioni di settaggio del modulo RTKPOST utilizzate nel processamento dei dati, che coprono l'intervallo temporale che va dal 17 novembre 2011 al 30 marzo 2012.

In Figura 6 sono riportate le serie temporali GPS cinematiche di CFB1 e ACAE relative a LICO.

Da notare la diversa scala (di un ordine di grandezza superiore) per le componenti planimetriche di CFB1 rispetto a quelle di ACAE, da cui si evidenzia l'inclinazione della meda a causa delle condizioni meteo-marine.

Viceversa le serie temporali delle variazioni in quota di CFB1 e ACAE hanno un andamento simile (stessa scala), con una dispersione maggiore per CFB1 in concomitanza dei periodi di maggiore inclinazione della meda che provocano una variazione in quota negativa (Figura 3).

La Figura 7 riporta il confronto tra le variazioni in quota per ACAE delle soluzioni giornaliere del monitoraggio (Software scientifico Bernese 5.0) e delle mediane giornaliere della soluzione cinematica di Figura 6 (Software *open-source* RTKLIB 2.4.1).

Dalla Figura 6 si osserva che gli andamenti calcolati sono tra loro molto simili, evidenziando che l'errore delle soluzioni cinematiche è maggiore e dovuto probabilmente agli effetti

OPZIONE	SETTAGGIO
Positioning Mode	Kinematic
Frequencies	L1+L2
Elevation Mask	20°
Ionosphere Estimation	Dual-Frequency
Troposphere Estimation	Saastamoinen
Integer Ambiguity Resolution	Continuous
Satellite Ephemeris	Precise
Satellite and Receiver Antenna Model	IGS08.ATX

Tabella 1 Principali opzioni di settaggio del modulo RTKPOST (RTKLIB 2.4.1).
Table 1 RTKPOST (RTKLIB 2.4.1) settings.

troposferici e alla loro diversa modellazione. I diversi software quindi forniscono soluzioni comparabili e il processamento con il software RTKLIB 2.4.1 può essere considerato affidabile.

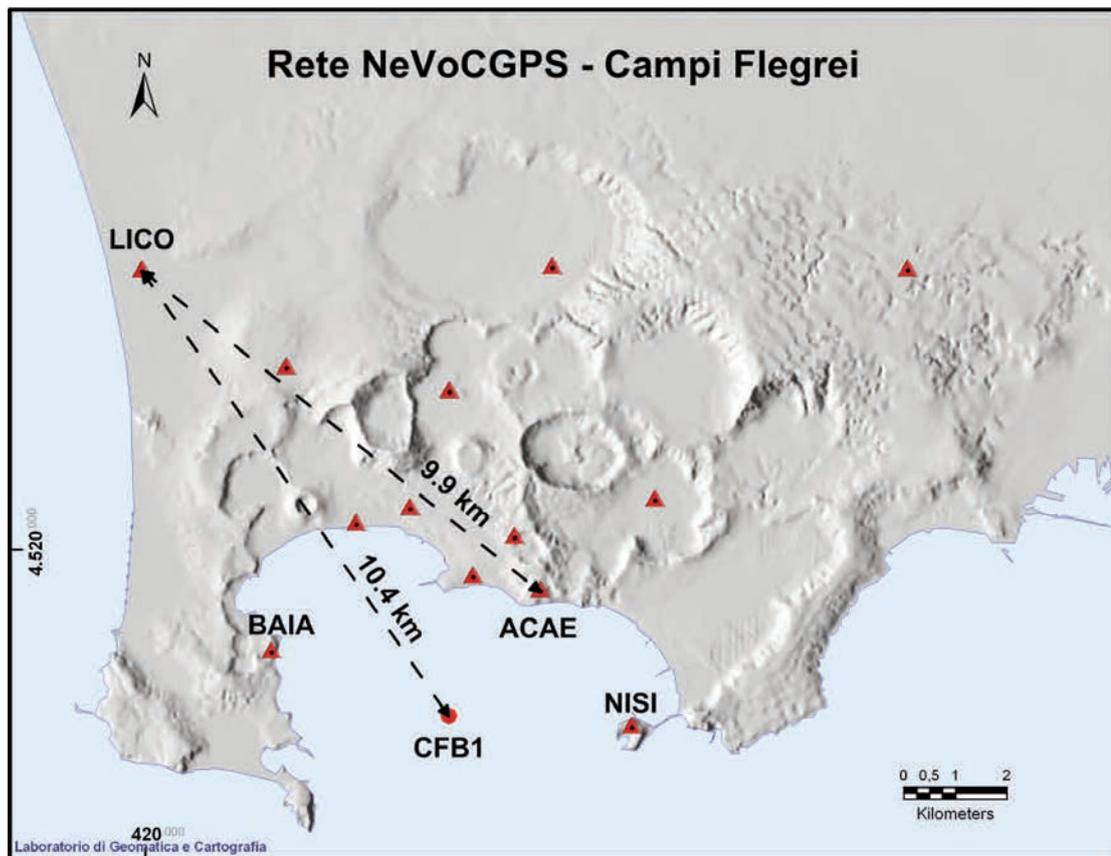


Figura 5 Mappa dei Campi Flegrei con l'ubicazione delle stazioni GPS. Il pallino rosso indica la stazione GPS in continuo sulla boa (CFB1) nel Golfo di Pozzuoli. Sono inoltre indicate le stazioni GPS di LICO (stazione di riferimento) e ACAE.
Figure 5 Map of Campi Flegrei showing GPS station locations. Red circle indicates the continuous GPS station on the buoy (CFB1) in the Gulf of Pozzuoli. The location (red triangles) of sites LICO (reference station) and ACAE are shown.

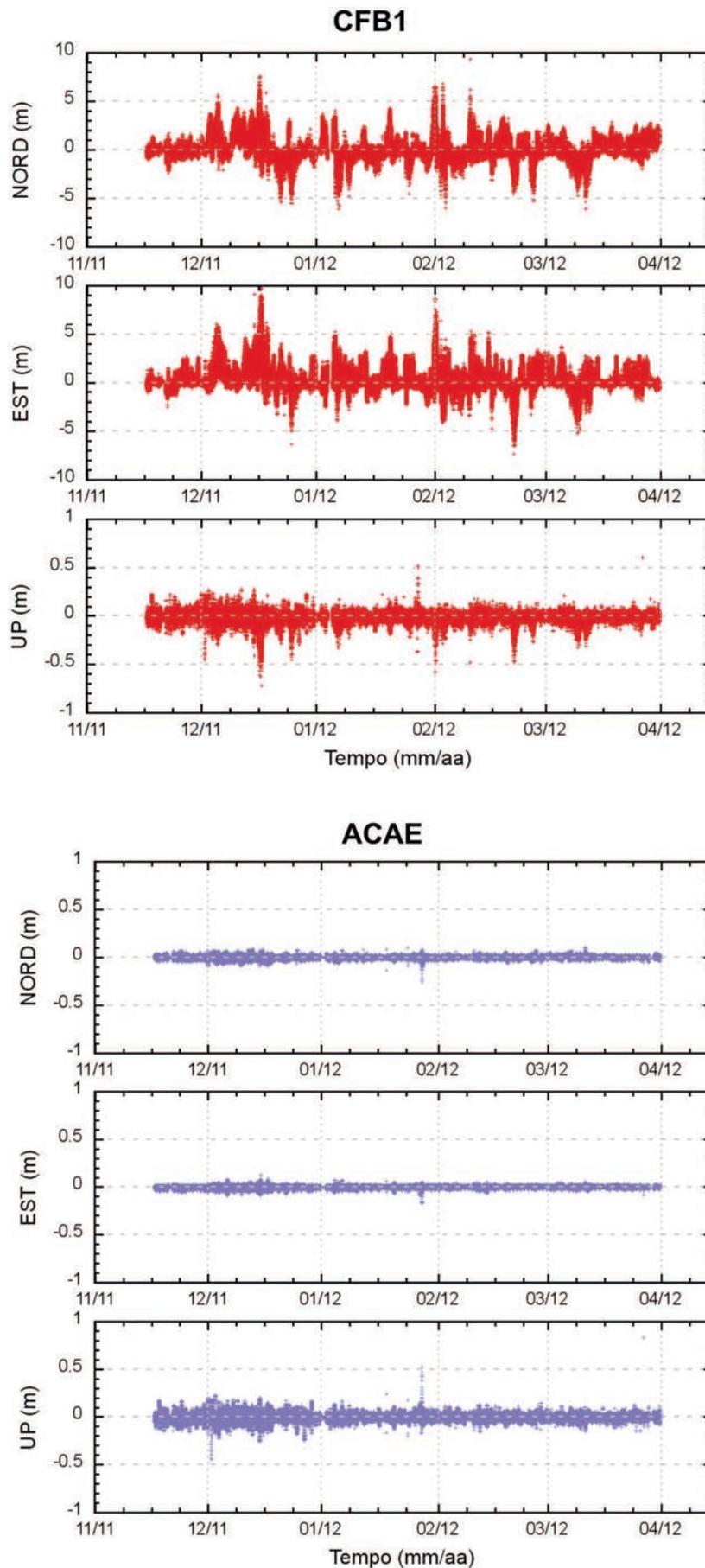


Figura 6 Serie temporali GPS cinematiche delle stazioni CFB1 e ACAE relative a LICO.
Figure 6 GPS kinematic time series for CFB1 and ACAE stations relative to LICO.

Passiamo ora ad analizzare la serie temporale cinematica relativa a CFB1 (Figura 6).

L'utilizzo delle variazioni temporali delle componenti planimetriche di CFB1 è da escludere ai fini del monitoraggio mentre le variazioni in quota, opportunamente filtrate dagli errori discussi nel precedente paragrafo, sembrano poter for-

nire utili informazioni.

La soluzione adottata in questo lavoro è quella di filtrare dalla serie temporale delle variazioni in quota quelle epoche per le quali lo spostamento planimetrico è superiore ad una certa soglia, oltre la quale l'errore indotto sulla quota non è considerato accettabile. Come soglia di spostamento plani-

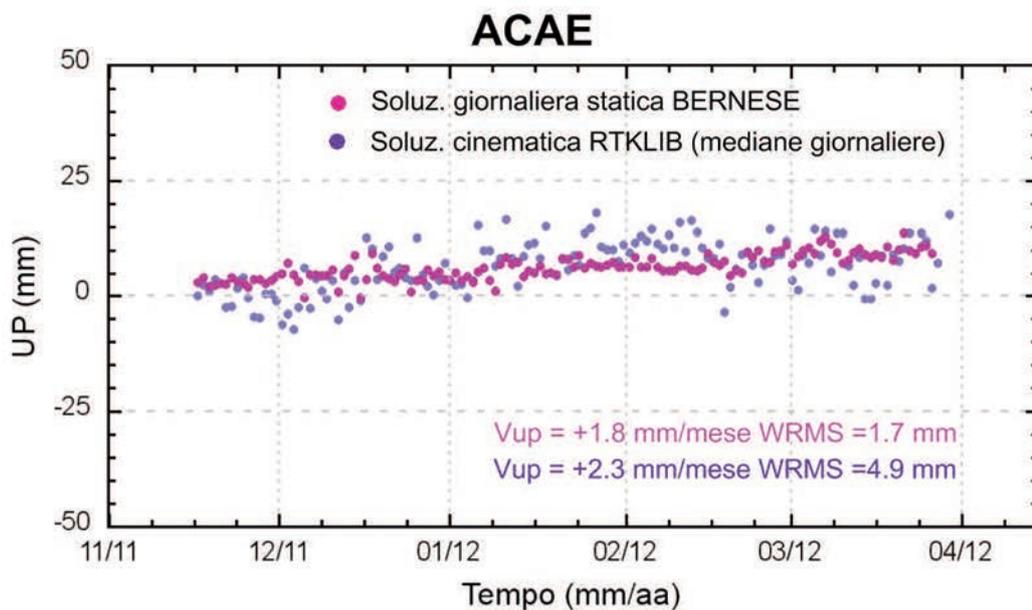


Figura 7 Serie temporali della componente UP della stazione ACAE ottenute da differenti soluzioni GPS (Bernese 5.0, RTKLIB 2.4.1).

Figure 7 Time series for the UP component of the ACAE station from different GPS solutions (Bernese 5.0, RTKLIB 2.4.1).

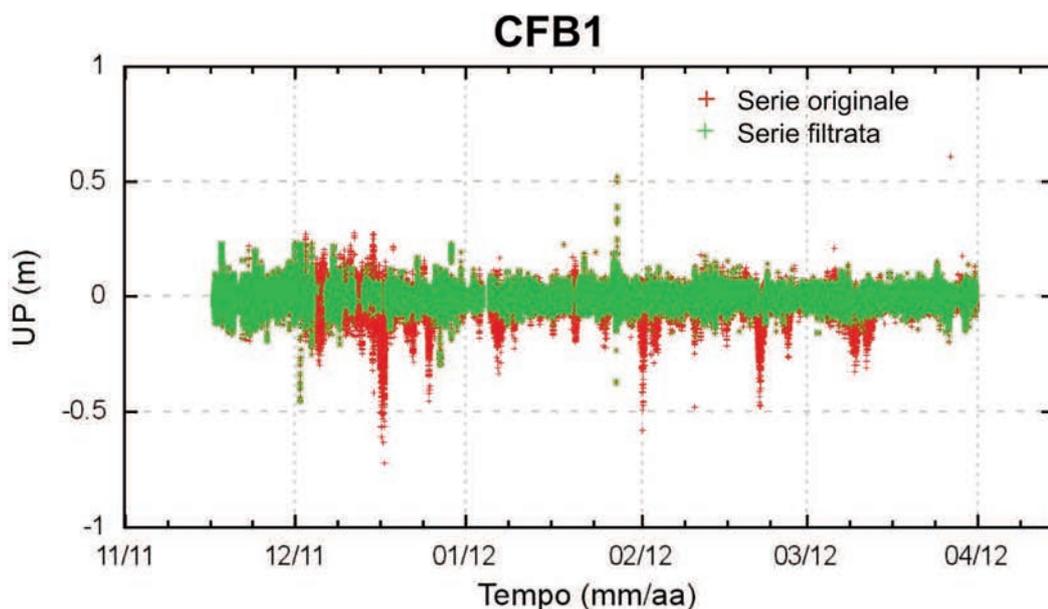


Figura 8 Serie temporali cinematiche della componente UP della stazione CFB1: soluzione non filtrata (in rosso) e filtrata (in verde).

Figure 8 Kinematic time series for the UP component of the CFB1 station: unfiltered (in red) and filtered (green) solutions.

metrico è stata adottata il valore di 1 m, per il quale come si deduce dalla Figura 3, si ha un errore in quota di -5 mm.

In Figura 8 è riportata la serie temporale cinematica originale (non filtrata) delle variazioni in quota di CFB1 di Figura 6 (in rosso) e filtrata dalle epoche per le quali l'errore sulla posizione verticale dovuto all'inclinazione della meda è superiore a -5 mm (in verde).

Dalle serie temporali cinematiche di Figura 8 sono state estratte soluzioni giornaliere basate sulla mediana e fatte alcune considerazioni sul numero di epoche giornaliere prima e dopo il filtraggio (Figura 9).

In Figura 9 sono riportate le mediane e il numero di epoche giornaliere (ogni 30s) della serie originale (in rosso) e della serie filtrata (in verde e giallo).

Il numero delle epoche giornaliere dopo il filtraggio si è ridotto mediamente di circa il 40 %, ma in alcuni giorni (in giallo) il numero di epoche rimanenti è inferiore a quello di un'acquisizione di almeno sei ore e le corrispondenti mediane giornaliere sono evidenti *outliers* (in giallo) nella serie temporale. Per questo, un numero di epoche giornaliere inferiore ad un'acquisizione complessiva di almeno sei ore è stato scelto come soglia per l'individuazione degli *outliers* nella serie filtrata.

Dopo le operazioni di filtraggio e rimozione degli *outliers*, in Figura 10 sono messe a confronto la serie temporale di CFB1 risultante con quelle delle vicine stazioni GPS permanenti di BAIA e NISI, rispettivamente a Nord-Ovest ed Est di CFB1, ad una distanza media di circa 3.5 Km (Figura 5).

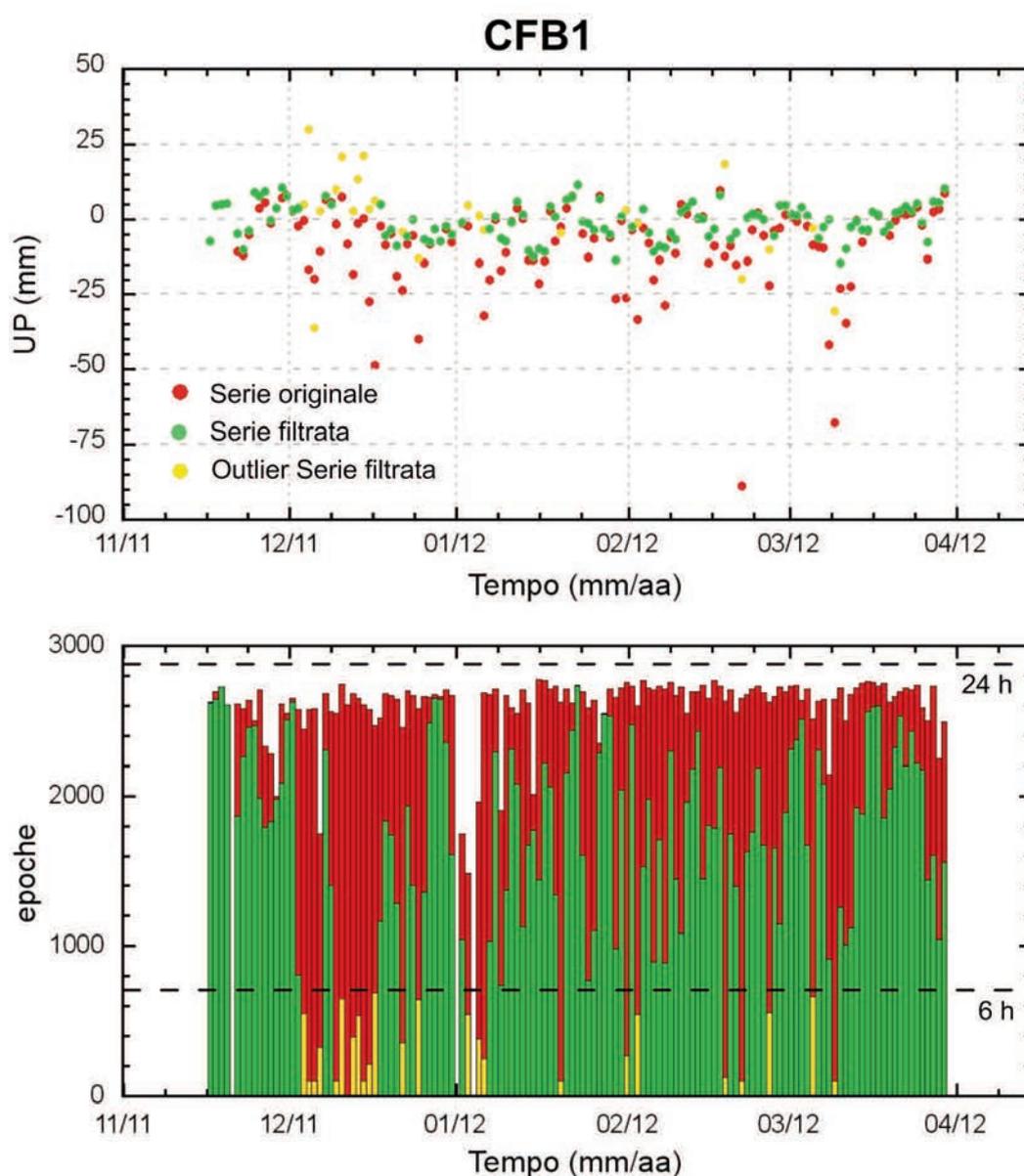


Figura 9 Mediane e numero di epoche giornaliere delle soluzioni cinematiche non filtrata (in rosso) e filtrata (in verde e giallo).

Figure 9 Daily medians and number of epochs of unfiltered (in red) and filtered kinematic solutions (in green and yellow).

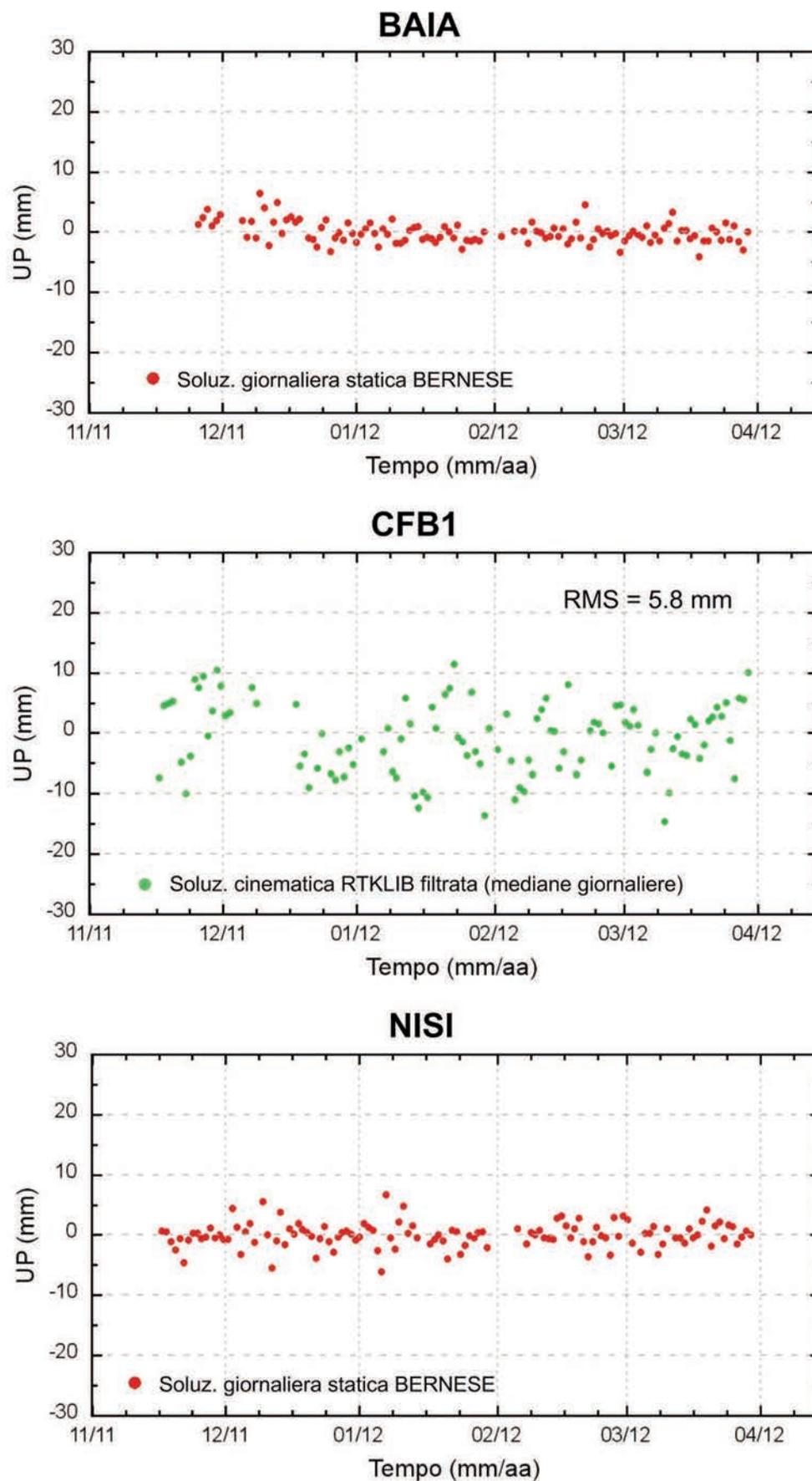


Figura 10 Serie temporali giornaliere delle variazioni in UP di CFB1 (in verde, mediane giornaliere della serie cinematica dopo le operazioni di filtraggio e rimozione degli outliers) e delle vicine stazioni GPS di BAIA e NISI.

Figure 10 Daily time series for the UP component of CFB1 (in green, daily medians after filtering and outliers rejection), BAIA and NISI GPS stations.

È stato fatto quest'ulteriore confronto in quanto, come si evince dalla Figura 7, la stazione ACAE evidenzia un progressivo sollevamento del suolo, mentre ai bordi della caldera flegrea, in corrispondenza delle stazioni NISI e BAIA questo sollevamento è nullo.

Ipotizzando che nel periodo considerato alla stazione CFB1 non vi sia stata deformazione verticale (o comunque talmente bassa da rientrare nei margini dell'errore), possiamo trarre dalla ripetibilità della serie, stimata tramite lo scarto quadratico medio (RMS), un indice della precisione delle misure (Figura 10).

Pertanto, questi risultati indicano che tramite una stazione GPS in continuo installata su di una meda elastica è possibile monitorare le deformazioni verticali del fondo marino con una risoluzione dell'ordine del centimetro.

Con la disponibilità nei prossimi mesi di ulteriori dati saranno sperimentate tecniche di filtraggio delle serie temporali cinematiche basate su stimatori come mediane e IQR [Bock et al. 2000] o medie e deviazione standard [Mattia et al. 2008], operando con finestre mobili temporali la cui ampiezza sarà funzione della velocità di deformazione in atto, al fine di non rimuovere anche eventuali deformazioni a carattere non lineare nel tempo, tipiche dei Campi Flegrei.

Conclusioni

In questo lavoro è stato descritto un primo esperimento di misura delle deformazioni del fondale marino condotto nella caldera dei Campi Flegrei. In quest'area le misure di deformazioni del suolo sono eseguite con continuità e da decenni in tutta l'area emersa, mentre per la parte del Golfo di Pozzuoli non si hanno a tutt'oggi informazioni sul campo deformativo. L'utilizzo di una stazione GPS posizionata sulla torretta di una meda elastica e con acquisizione dei dati in continuo, ha permesso di valutare la fattibilità di una tale configurazione di misura per il rilevamento dei movimenti verticali connessi al fenomeno del bradisismo. Infatti, l'elaborazione di un set di dati relativi a circa cinque mesi di acquisizione continua, ha evidenziato una possibile soglia di detezione dei movimenti verticali del fondo marino - in prossimità della base della meda - dell'ordine del centimetro. Quindi, nonostante i possibili errori indotti dall'inclinazione della parte emersa della meda, dovuta alle condizioni meteorologiche, sembra possibile monitorare le deformazioni verticali del fondo marino con precisione centimetrica. Invece, l'utilizzo delle variazioni temporali delle componenti planimetriche è da escludere ai fini del monitoraggio dei movimenti del suolo del fondo marino.

Questo studio di fattibilità evidenzia la possibilità di eseguire misure verticali del movimento del suolo del fondo marino utilizzando una tecnica affidabile nel tempo e, al tempo stesso, economica, particolarmente se confrontata rispetto ad

altri sistemi di misura di geodesia marina. Ovviamente, il limite maggiore è legato alla profondità del mare, confinando questa tecnica alle "acque basse", comunque almeno fino ai 100 m di profondità. Ciononostante, questo intervallo di profondità è di particolare interesse per l'area dei Campi Flegrei in cui la batimetria dei 100 m include gran parte dell'area sommersa della caldera, consentendo un monitoraggio geodetico in un numero selezionato e strategico di punti per consentire una corretta modellazione del campo deformativo dell'intera caldera.

Bibliografia

- Bianco F., Castellano M., Cogliano R., Cusano P., Del Pezzo E., Di Vito M.A., Fodarella A., Galluzzo D., La Rocca M., Milana G., Petrosino S., Pucillo S., Riccio G. and Rovelli A., (2010). *Caratterizzazione del noise sismico nell'area vulcanica dei Campi Flegrei (Napoli): l'esperimento "UNREST"*. Quaderni di Geofisica, 86, 21 pp. ISSN: 1590-2595.
- Bock Y., Nikolaidis R. M., de Jonge P. J., Bevis M. (2000). *Instantaneous geodetic positioning at medium distances with the Global Positioning System*. J. Geophys. Res., 105, B12, 28, 223-28, 253, doi:10.1029/2000JB900268.
- Bottiglieri M., Falanga M., Tammaro U., De Martino P., Obrizzo F., Godano C., and Pingue F., (2010). *Characterization of GPS time series at the Neapolitan volcanic area by statistical analysis*. J. Geophys. Res., 115, B10416, doi:10.1029/2009JB006594.
- Bottiglieri M., Falanga M., Tammaro U., Obrizzo F., De Martino P., Godano C. and Pingue F., (2007). *Independent component analysis as a tool for ground deformation analysis*. Geophysical Journal International, 168: 1305-1310. doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03264.x.
- Bourne S., Hatchell P., and Leaf C., (2009). *An autonomous seafloor system for monitoring reservoir deformation*. 71 EAGE Conference, Amsterdam 8-11-June, 2009.
- Chadwick W., Nooner L., Zumberge M., Embley R., and Fox C., (2006). *Vertical deformation monitoring at Axial Seamount since its 1998 eruption using deep-sea pressure sensors*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 150, 313-327.
- Camacho A. G., González P. J., Fernández J., and Berrino G., (2011). *Simultaneous inversion of surface deformation and gravity changes by means of extended bodies with a free geometry: Application to deforming calderas*. J. Geophys. Res., 116, B10401, doi:10.1029/2010JB008165.
- Chiodini G., Caliro S., Cardellini C., Granieri D., Avino R., Baldini A., Donnini M., and Minopoli, C., (2010). *Long-term variations of the Campi Flegrei, Italy, volcanic*

- system as revealed by the monitoring of hydrothermal activity. *Journal of Geophysical Research*, v. 115, B03205, doi:10.1029/2008JB006258.
- Chiodini, G., Avino, R., Caliro, S., & Minopoli, C. (2011). *Temperature and pressure gas geoindicators at the Solfatara fumaroles (Campi Flegrei)*. *Annals of Geophysics*, 54(2), doi:10.4401/ag-5002
- Dach R., Hugentobler U., Fridez P., and Meindl M. (Eds), (2007). *Bernese GPS Software Version 5.0. User manual*. Astronomical Institute, University of Bern.
- D'Auria L., Giudicepietro F., Aquino I., Borriello G., Del Gaudio C., Lo Bascio D., Martini M., Ricciardi G. P., Ricciolino P., and Ricco C., (2011). *Repeated fluid-transfer episodes as a mechanism for the recent dynamics of Campi Flegrei caldera (1989–2010)*. *J. Geophys. Res.*, 116, B04313, doi:10.1029/2010JB007837.
- Del Gaudio C., Aquino I., Ricciardi G. P., Ricco C., and Scandone R., (2010). *Unrest episodes at Campi Flegrei: A reconstruction of vertical ground movements during 1905–2009*. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 195(1), 48–56, doi:10.1016/j.jvolgeores.2010.05.014.
- De Martino P., Tammaro U., Brandi G., D'Alessandro A., Dolce M., Esposito T., Malaspina S., Obrizzo F., Pingue F., and Serio C., (2007). *Area vulcanica napoletana: 10 anni di osservazioni GPS*. 11a Conferenza Nazionale ASITA, Torino 2007, 925-930.
- Iannaccone G., Guardato S., Vassallo M., Elia L., and Beranzoli L., (2009). *A new multidisciplinary marine monitoring system for the surveillance of volcanic and seismic areas*. *Seismological Research Letters*, 80, 208-218, doi:10.1785/gssrl.80.2.208.
- Mattia M., Palano M., Aloisi M., Bruno V., Bock Y. (2008). *High rate GPS data on active volcanoes: an application to the 2005–2006 Mt. Augustine (Alaska, USA) eruption*. *Terra Nova*, 20, 2, 134–140. DOI: 10.1111/j.1365-3121.2008.00798.x.
- Obrizzo F., U. Tammaro, P. Capuano, F. Di Sena, A. La Rocca, S. Pinto, P. De Martino, E. Vertech, F. Pingue (2009). *Tide gauge network and vertical ground displacements in the Neapolitan volcanic area*. Conferenza A. Rittmann "La vulcanologia italiana: stato dell'arte e prospettive future", Nicolosi (Catania) 11-13 June 2009, ISBN 978-88-89972-11-3, 226-227.
- Ricco C., Aquino I., Borgstrom S. E., and Del Gaudio C., (2007). *A study of tilt change recorded from July to October 2006 at the Phlegrean Fields (Naples, Italy)*. *Annals of Geophysics*, 50(5), 661–674.
- Stabile T., Zollo A., Vassallo M., and Iannaccone G., (2007). *Underwater Acoustic Channel Properties in the Gulf of Naples and Their Effects on Digital Data Transmission*. *Annals of Geophysics*, 50(3).
- Troise C., De Natale G., Obrizzo F., De Martino P., Tammaro U., and Boschi E., (2007). *Renewed ground uplift at Campi Flegrei caldera (Italy): New insight on magmatic processes and forecast*. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L03301, doi:10.1029/2006GL028545.

Indice

Introduzione	4
1. Caratteristiche della boa e strumentazione GPS	5
2. Errori sulle misure GPS: inclinazione e dilatazione termica della boa	6
3. Elaborazione dati GPS ed analisi delle serie temporali	7
Conclusioni	13
Bibliografia	13

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>



Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia