

# Deformazioni del suolo mediante analisi dei dati mareografici nell'area vulcanica napoletana nel periodo 1999-2006

Umberto TAMMARO<sup>1</sup>, Felice DI SENA<sup>1</sup>, Paolo CAPUANO<sup>1,2</sup>, Francesco OBRIZZO<sup>1</sup>, Adriano LA ROCCA<sup>1</sup>, Salvatore PINTO<sup>1</sup>, Alfonso RUSSO<sup>1</sup>, Prospero DE MARTINO<sup>1</sup>, Folco PINGUE<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, sezione di Napoli - Osservatorio Vesuviano, Napoli, Italia, [tammaro@ov.ingv.it](mailto:tammaro@ov.ingv.it).

<sup>2</sup> Università del Molise, Dipartimento STAT, Pesche (Is), Italia, [capuano@unimol.it](mailto:capuano@unimol.it).

## Riassunto

L'Osservatorio Vesuviano, sezione di Napoli dell'I.N.G.V., gestisce un sistema di monitoraggio delle aree vulcaniche campane, finalizzato al pronto riconoscimento di variazioni di parametri fisico-chimici, che potrebbero costituire fenomeni precursori di un'eventuale ripresa dell'attività eruttiva, con lo scopo di una comunicazione tempestiva agli organi della Protezione Civile. Nell'ambito di tale monitoraggio, le deformazioni del suolo sono studiate, oltre che con tecniche classiche e metodi satellitari, anche attraverso il monitoraggio del livello marino. Il dato mareometrico è impiegato anche per ricostruire le caratteristiche locali del modo ondoso, per definire gli effetti di bacino ed analizzare eventuali fenomeni estremi.

La rete di stazioni usata in questo lavoro è costituita da 6 stazioni: Castellammare di Stabia, Napoli, Torre del Greco, Pozzuoli, Miseno e Nisida. I mareogrammi analogici utilizzati sono ricostruiti per digitalizzazione della registrazione con campionamento orario.

L'analisi dei dati ha riguardato le caratteristiche spettrali del segnale. E' stato organizzato, corretto e validato un database con un record temporale di 8 anni (1999-2006), utilizzando dove necessario procedure di *gap filling* statistico. L'analisi armonica su tutto il database ha consentito di definire la componente astronomica della marea, valutando ampiezza e fase, cioè le costanti armoniche, dei principali periodi semidiurni e diurni. Il residuo dei segnali mareometrici, rispetto alla marea astronomica, così ottenuto dipende dalla marea meteorologica (vento, pressione, etc.), dalle eventuali variazioni eustatiche e dalle deformazioni del suolo.

Il mareogramma residuale osservato in ciascun sito può essere considerato, quindi, come la somma di due termini, uno per il *background* mareale e l'altro che tiene conto del rumore, degli effetti di sito e della eventuale deformazione del suolo. Per cui, la deconvoluzione tra il sito di interesse e quello di riferimento, abbastanza prossimo da avere simile *background* fornisce una stima della eventuale deformazione. Tale analisi rileva nessuna deformazione significativa al Vesuvio, in accordo con altre tecniche geodetiche di monitoraggio, mentre per l'area flegrea consente di seguire con elevato dettaglio le fasi di mini-uplift e subsidenza presenti negli ultimi anni. Questi risultati sono in ottimo accordo con quelli ottenuti dalle osservazioni GPS.

## Abstract

Osservatorio Vesuviano, department of Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, is in charge of the surveillance monitoring of the Campanian volcanic areas, to promptly recognize any variation of the physical-chemical parameters helpful as precursors of eruption. The ground deformations in the Vesuvius and Phlegrean area are monitored by means of classical technique (like optical leveling and tiltmetry) and satellite technique (like global positioning system). Moreover, due to the vicinity of a coastline for both the volcanic system, the ground deformations are also monitored by the continuous recording of the sea level, using suitable tide gauge stations. Tide gauge data are also used to analyze the local characteristics of the sea wave even in presence of extreme phenomena.

The Vesuvius Observatory tide gauge network, used in this paper, is operating since 1970 and reached, in the eighties, the consistency of 6 stations, Napoli, Nisida, Pozzuoli, Miseno, Castellammare di Stabia and Torre del Greco. Data since 1999 are retrieved and a database have been organized, corrected and validated up today, spanning over 8 years, using were necessary statistical

gap filling technique. Data have been analyzed in the frequency domain and the local astronomical components have been defined by harmonic analysis, inferring amplitude and phase for the main diurnal and semi-diurnal components. The obtained residual respect to the astronomical tide contains information about meteorological component, eustatic variation, ground deformation and noise. The residual sea level variation, for each site, can be represented by two terms: sea level *background* and *local* sea level variations due to noise, site effects and ground deformation. Removing, by deconvolution, the differential behavior of the sea-level respect to a reference station, provide an estimation of the ground level variation. This analysis shows no significant level variation at Vesuvius, while in the Campi Flegrei caldera, tide gauge data, put in evidence the presence of the so-called mini-uplift during last 7 years.

### **La rete mareografica dell'Osservatorio Vesuviano.**

La rete mareografica dell'Osservatorio Vesuviano, attiva dagli anni settanta, è composta dai siti di Napoli, Torre del Greco, Pozzuoli, Miseno e Nisida e Castellammare di Stabia (Fig. 1). Nei primi cinque siti erano installati mareografi meccanici SIAP con sistema a galleggiante e registrazione locale su supporto cartaceo (successivamente convertita in numerica tramite tavoletta digitalizzatrice, con cadenza mensile e con intervallo di campionamento orario). Nella stazione di Castellammare era installato un mareografo digitale SIAP, con sistema a galleggiante e registrazione del segnale su supporto magnetico (EPROM), con campionamento ogni 5 minuti.



*Figura 1- Rete mareografica: NAPT = Napoli Porto, TRDG = Torre del Greco, CSMS = Castellammare di Stabia, FORI = Folio, MISE = Miseno, PMSC = Pozzuoli molo SudCantieri, POPT = Pozzuoli porto, NISE = Nisida e AGRO = Porto di Agropoli.*

Dall'ottobre 2002, per ovviare ai problemi di obsolescenza della strumentazione meccanica e per realizzare la trasmissione in tempo reale del dato acquisito con la possibilità del controllo remoto, alla strumentazione meccanica è stata affiancata, in tutte le stazioni, una sensoristica digitale a galleggiante con campionamento ogni 5 minuti e trasmissione dati via GSM (La Rocca et al., 2005). Recentemente la rete è stata ampliata (Fig. 1), con la stessa sensoristica digitale, ai siti di Pozzuoli Molo Sud Cantieri (per una più accurata definizione del bradisisma flegreo), Folio d'Ischia (nell'ambito del completamento della rete del Golfo di Napoli) ed Agropoli (per un confronto con la risposta mareale del Tirreno meridionale).

La rete dell'Osservatorio Vesuviano nasce con l'obiettivo prioritario di rilevare le variazioni del livello marino nelle baie di Napoli e Pozzuoli al fine di integrare le tecniche di rilevamento delle deformazioni del suolo nell'area flegrea ed in quella vesuviana (Corrado, Luongo, 1981; Berrino et al., 1984; Berrino, 1998). La registrazione continua delle variazioni del livello marino rende possibile anche uno studio delle caratteristiche spettrali del segnale (Capuano et al., 2004a, 2004b), che consente la definizione di comportamenti caratteristici dei bacini, oltre al comune comportamento dovuto alle maree. Inoltre, gli eventuali comportamenti differenziali dei bacini di Napoli e Pozzuoli, influiscono sulla ricostruzione delle deformazioni del suolo visto che Napoli viene utilizzata come registrazione di riferimento.

Nel presente lavoro è stato organizzato un database delle registrazioni mareografiche dei sensori analogici, convertite in digitale con campionamento orario, sono stati riempiti i brevi periodi di mancata registrazione con tecniche di *gap filling* statistico. Il database è stato controllato e validato e la parte utilizzata in questo lavoro copre l'intervallo temporale dal 1999 al 2006. In Fig. 2 è mostrato un esempio di segnali acquisiti alle varie stazioni mareografiche.

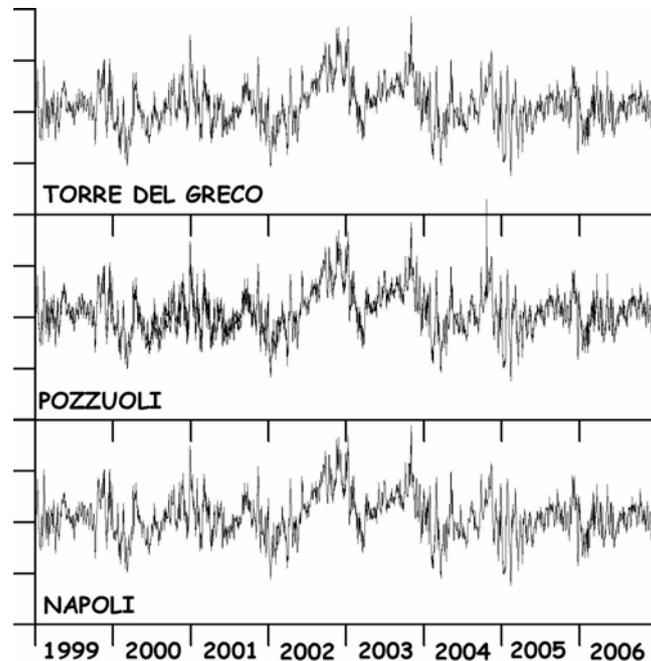


Figura 2 - Esempio di segnale mareografico registrato dai sensori analogici dal gennaio 1999 al dicembre 2006. Sulla scala verticale ogni tacca corrisponde a 20 cm.

### Analisi dei mareogrammi.

Le oscillazioni del livello marino sono causate dalla sovrapposizione di molti contributi, i principali dei quali sono la marea astronomica e la marea meteorologica, generalmente separate in bande di frequenza diverse. Mentre la marea astronomica determina una variazione del livello marino regolare e periodica dovuta al sistema Terra-Sole-Luna, la marea meteo-marina è irregolare dipendendo principalmente da variazioni di pressione di origine termica (p.e. giorno-notte) e aperiodiche variazioni di pressione meteo. Queste ultime dipendono da molti fattori come, il passaggio dei fronti atmosferici, la dinamica meteorologica sul bacino considerato e la sua topografia, la composizione chimica delle acque, la circolazione oceanica, ecc. Per tali motivi la marea meteorologica non è facilmente prevedibile, mentre per la componente astronomica, caratterizzata da periodi di oscillazione noti, l'analisi armonica consente di determinare le ampiezze e le fasi specifiche per i siti di osservazione. La base dell'analisi armonica è l'assunzione che le variazioni mareali di tipo astronomico possono essere rappresentate da un numero finito di termini armonici del tipo  $H_n \cos(\omega_{nt} - g_n)$ , dove  $H_n$  è l'ampiezza,  $g_n$  è la fase riferita a Greenwich o al meridiano locale e  $\omega_n$  è la velocità angolare della componente armonica considerata.

Innanzitutto, le serie temporali sono state analizzate con una analisi spettrale effettuata mediante Fast Fourier Transform, per evidenziare le principali componenti presenti. In Fig. 3 è mostrato, come esempio, lo spettrogramma, cumulato per finestre temporali semestrali, del livello mareale registrato alla stazione di Napoli, che ben evidenzia le componenti diurne e semidiurne, mostrando che la componente M2 (lunare semidiurna principale) rappresenta la componente astronomica di maggiore ampiezza, caratterizzando così la marea nel golfo di Napoli con 2 massimi e 2 minimi al giorno. L'analisi armonica è stata effettuata per determinare le costanti armoniche delle 7 componenti diurne e semidiurne principali (Tab. 1). Le costanti armoniche sono state determinate tramite una ricerca esaustiva dei parametri, minimizzando una funzione di misfit, rappresentata dalla norma  $L_2$  dello scarto. La ricerca del minimo della funzione di misfit, nello spazio dei parametri, è stata effettuata con la procedura del Simplex (Nelder, Mead, 1965). Le costanti così determinate per il sito di Napoli sono riportate in Tab. 2.

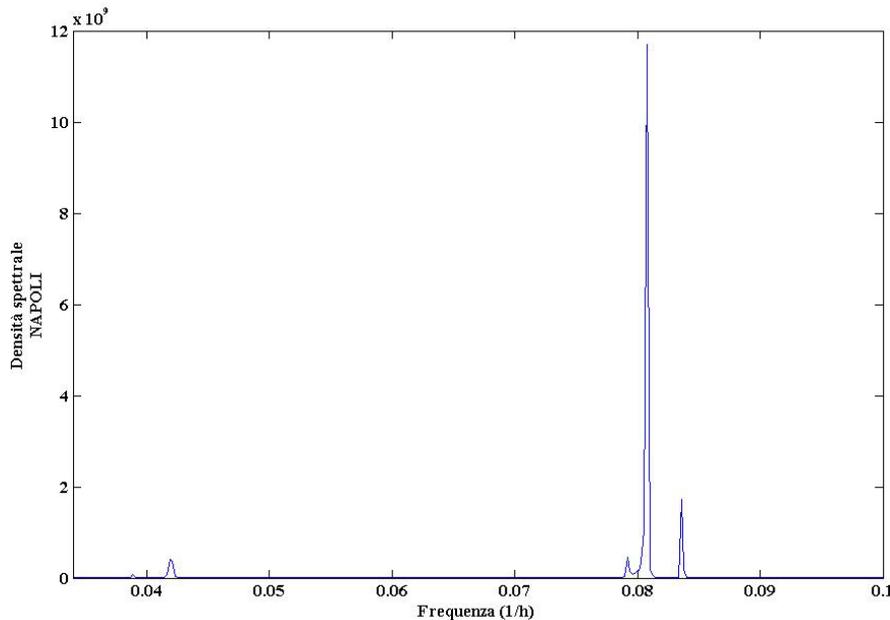


Figura 3 - Spettro del livello del mare misurato a Napoli. Viene mostrato l'intervallo di frequenze caratteristico delle componenti diurne e semidiurne.

Tabella 1 – Periodo delle principali componenti diurne e semidiurne

N°	Sigla	Tipo	Periodo (h)
1	M2	Lunare semidiurna principale	12.420601
2	S2	Solare semidiurna principale	12.000000
3	N2	Lunare semidiurna ellittica	12.658348
4	K2	Luni-solare declinazione semid.	11.967234
5	K1	Luni-solare declinazione diurna	23.934469
6	O1	Lunare diurna principale	25.819341
7	P1	Solare diurna principale	24.065890

Tabella 2 – Ampiezza e fase delle principali componenti diurne e semidiurne a Napoli

Componente	M2	S2	N2	K2	K1	O1	P1
Periodo (h)	12.420	12.000	12.658	11.967	23.934	25.819	24.065
Ampiezza(cm)	15.7	8.9	3.1	2.5	7.5	1.8	3.4
Fase $g$ (°)	234.0	281.9	273.7	282.2	73.3	62.8	66.3

La stima delle armoniche principali per gli altri siti della rete è ancora in corso di realizzazione, per cui i parametri relativi a Napoli sono stati utilizzati, in via preliminare, anche per gli altri siti.

Il mareogramma osservato, depurato dalle componenti astronomiche, in ciascun sito può essere considerato come la somma di due termini, uno per il *background* mareale e l'altro che tiene conto del rumore, degli effetti di sito e della eventuale deformazione del suolo. L'analisi dei movimenti del suolo viene effettuata, per l'area vesuviana, riferendo i dati del livello marino della stazione di Torre del Greco a quella di Napoli; per l'area flegrea, riferendo le misure registrate a Pozzuoli alla stazione di Napoli. La stabilità relativa delle stazioni di riferimento viene periodicamente verificata tramite livellazione di precisione di un caposaldo prossimo al mareografo e collegato alla rete di livellazione. In tal modo, rimuovendo gli effetti differenziali, tramite deconvoluzione tra il mareogramma residuo relativo al sito di interesse e quello di riferimento, abbastanza prossimo da avere simile *background*, si ottiene una stima della eventuale deformazione più robusta di quella ottenibile con la differenza tra i mareogrammi originali. Nelle aree vulcaniche attive, le variazioni locali del livello marino possono essere causate da movimenti (subsidenze o sollevamenti) associati

con la dinamica dei vulcani, rappresentando, quindi, un indicatore importante per il sistema di sorveglianza dei vulcani attivi. In questo contesto, è necessaria un'accurata misura del livello marino in più siti per discriminare al meglio tra variazioni reali e apparenti al fine anche di migliorare il rapporto segnale/rumore. In Fig. 4 sono mostrati i movimenti verticali del suolo ricavati per il sito di Pozzuoli, ubicato nell'area di massimo sollevamento della caldera flegrea, confrontati con quelli determinati dalla livellazione geometrica di precisione. Per i Campi Flegrei le variazioni di quota dedotte dai dati mareografici sono in ottimo accordo con quanto evidenziato dalle periodiche livellazioni di precisione, ma in aggiunta consentono di seguire con continuità le variazioni del suolo, meglio evidenziando la presenza di fenomeni di rapidi mini-uplift caratteristici dell'attività degli ultimi anni.

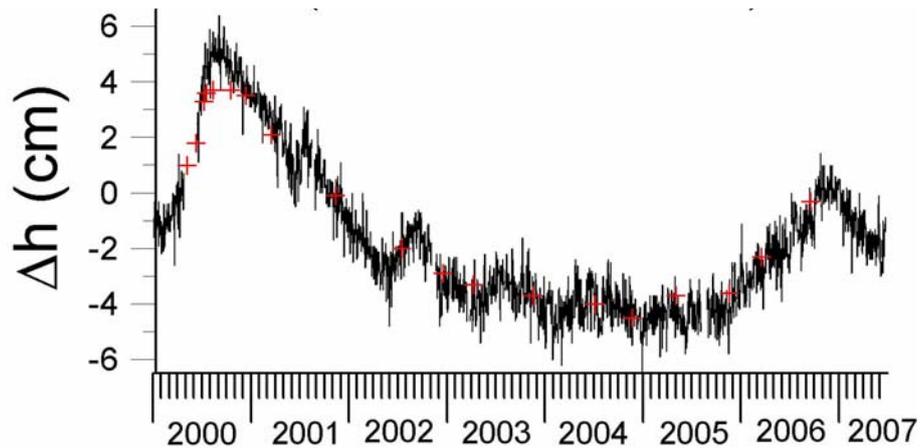


Figura 4 - Deformazione verticale del suolo dedotta da dati mareografici, dal 1/1/2000 al 30/06/2007, per il sito di Pozzuoli, confrontata con quella determinata dalla livellazione geometrica (croci).

Le caratteristiche dedotte dai dati mareografici sono anche in buon accordo con quanto evidenziato dall'analisi dei segnali GPS, rilevati in continuo dalla rete dell'Osservatorio Vesuviano (De Martino et al, 2007). In Fig. 5 è mostrata la serie temporale da maggio 2000 a giugno 2007 delle variazioni settimanali in UP, della stazione GPS di RITE, quella più vicina al mareografo di Pozzuoli.

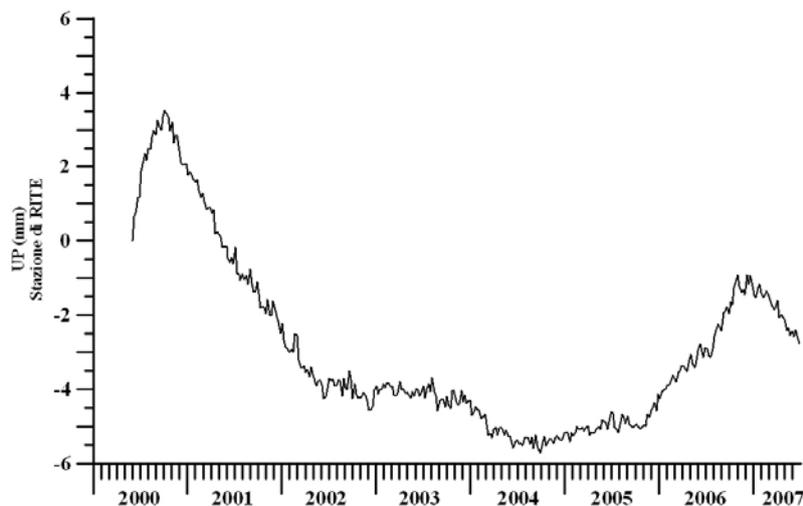


Figura 5 - Serie temporale, da maggio 2000 a giugno 2007, delle variazioni settimanali in Up della stazione GPS di RITE (Rione Terra).

Per l'area vesuviana l'analisi dei dati mareografici non evidenzia significativi movimenti del suolo negli ultimi anni (Fig. 6), in accordo con tutti gli altri indicatori misurati dall'Osservatorio Vesuviano.

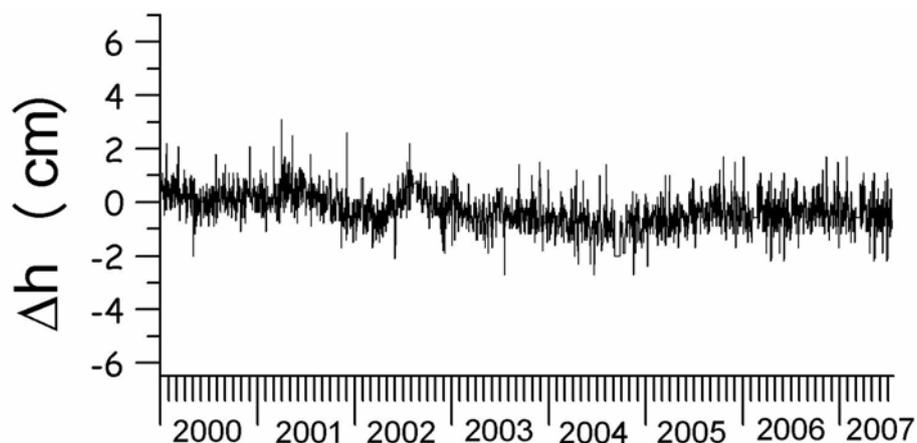


Figura 6 - Deformazione verticale del suolo dedotta da dati mareografici, dal 1/1/2000 al 30/06/2007, per il sito di Torre del Greco.

### Conclusioni

Un database di dati mareografici, acquisiti da sensori analogici, con record temporale di 8 anni (1999-2006) è stato organizzato e validato. L'analisi condotta su tale database ha consentito di determinare, per la stazione di Napoli, le costanti armoniche delle componenti diurne e semidiurne principali. I mareogrammi sono stati depurati dalle componenti astronomiche e la deconvoluzione del segnale residuo rispetto a quello di riferimento ha portato a risultati che sono in accordo con quelli ottenuti da altre tecniche di monitoraggio, come la livellazione e il GPS. In particolare, sono ben descritti sia i periodi di subsidenza sia gli episodi di mini-uplift del 2000 e del 2004-2006. Questi risultati ci consentono di dire che la mareografia rappresenta una valida metodologia in continuo per il monitoraggio e lo studio dei movimenti verticali del suolo in aree vulcaniche attive prospicienti il mare, come ad esempio l'area vulcanica napoletana.

### Ringraziamenti

Questa ricerca è stata parzialmente finanziata con i fondi dell'UR V3\_4/13 nell'ambito della Convenzione INGV-DPC 2004-2006.

### Bibliografia.

- Berrino G., Corrado G., Luongo G., Toro B. (1984), Ground Deformation and Gravity Changes Accompanying the 1982 Pozzuoli Uplift. *Bull. Volcanol.*, vol. 47-2: 187-190.
- Berrino G. (1998), Detection of vertical ground movements by sea-level changes in the Neapolitan volcanoes. *Tectonophysics*, 294: 323-332.
- Capuano P., Buonocore B., Obrizzo F., Pingue F., Costa A., Macedonio G., Sansone E. (2004a), Neapolitan tide gauge network: sea level variation recorded after the 30/12/2002 Strombolian flank collapse, *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 6, 06463.
- Capuano P., Buonocore B., Tammaro U., Obrizzo F., La Rocca A., Pinto S., Russo A., Di Sena F., Pingue F. (2004b), Caratteristiche spettrali delle variazioni del livello marino delle baie di Napoli e Pozzuoli. *8<sup>a</sup> Conferenza Nazionale ASITA*, vol. I: 615-620.
- Corrado G., Luongo G. (1981), Ground deformation measurements in active volcanic areas using tide gauge. *Bull. Volcanol.*, 44: 505-511.
- De Martino P., Tammaro U., Brandi G., D'Alessandro A., Dolce M., Esposito T., Malaspina S., Obrizzo F., Pingue F., Serio C. (2007), Area vulcanica napoletana: 10 anni di osservazioni GPS. *11<sup>a</sup> Conferenza Nazionale ASITA*.
- La Rocca A., Pinto S., Russo A. (2005), La rete mareografica dell'Osservatorio Vesuviano, *Open File Report*, n° 1.
- Nelder J. A., Mead R. (1965) A simplex method for function minimization, *Computer J.*, 7, 308.