

Università degli studi di Salerno

---

FACOLTA' DI SCIENZE MATEMATICHE, FISICHE E NATURALI

Corso di dottorato in scienze e tecnologie dell'informazione, dei sistemi  
complessi e dell'ambiente

XII ciclo



PHD THESIS

**The last forty years of surface  
deformation at Campi Flegrei caldera:  
two simple stationary sources are  
enough**

Candidato: **Ilaria Sabbetta**

Tutor

**Prof. Luca Crescentini**

Coordinatore del dottorato

**Prof. Roberto Scarpa**

---

Anno Accademico 2012/2013

# Abstract

La caldera dei Campi Flegrei (CF) è una delle caldere più attive del mondo; in quest'area in particolare il rischio vulcanico è estremamente alto a causa dell'elevata densità abitativa dell'area in cui si trova, a circa 15 km a ovest della città di Napoli. La caldera è da sempre caratterizzata da fenomeni vulcanici, come terremoti, eruzioni e fenomeni bradisismici. La sorgente responsabile di tali fenomeni è da sempre materia di dibattito, particolarmente negli ultimi due anni (2011-2013) a causa di una considerevole ripresa dei fenomeni bradisismici che ha portato ad un sollevamento di circa 15 cm che ha attirato l'attenzione della comunità scientifica e della protezione civile. In questo contesto, la mia tesi cerca di determinare un semplice modello di sorgente che renda conto del campo degli spostamenti durante gli ultimi quarant'anni (1970-2013), analizzando diversi tipi di dati. Sono stati analizzati in particolare la crisi bradisismica del 1980-1983 e la subsidenza del periodo 1995-2000. Sono stati utilizzati dati di livellazione dal 1980 al 1994, dati di spostamento orizzontale relativi a rilievi planimetrici effettuati nel giugno del 1980 e nel giugno del 1983, dati SAR dal 1993 al 2010 e infine dati GPS dal 2000 all'ottobre del 2013. Sono stati prima di tutto confrontati tra di loro periodi di grosso segnale a rateo quasi costante (1980-83, dal giugno 1980 al giugno 1983; 1983-84, dal giugno 1983 all'ottobre del 1984; 1985-88, dal gennaio del 1985 al dicembre 1988; 1989-92, dal giugno 1989 al dicembre 1992; 1995-2000, dal marzo 1995 alla fine del 1999) trovando un *pattern* deformativo stazionario sia per la componente verticale che orizzontale e sia per i periodi di inflazione che di deflazione, tranne che nella zona della Solfatara e subito a sud di essa. E' stato quindi ipotizzato un possibile scenario che prevede due campi stazionari ai CF con una prima sorgente responsabile del campo stazionario a larga scala e una seconda sorgente responsabile del campo di deformazione stazionario al di sotto della Solfatara. Al fine di trovare le caratteristiche della sorgente del campo a larga scala è stato scelto di invertire i

dati relativi al periodo di sollevamento dal giugno 1980 al giugno 1983 ( $\sim 60\text{cm}$ ) perchè si tratta di un periodo in cui è presente un forte segnale e in cui avevamo a disposizione sia dati verticali che orizzontali. I modelli di sorgente testati comprendono ed estendono quelli invocati in studi precedenti sui CF.

1. sferoide finito molto piccolo (puntiforme) con asse di simmetria verticale
2. sferoide finito con asse di simmetria verticale, in approssimazione di quadrupolo
3. momento tensore singolo (puntiforme)
4. crack circolare orizzontale
5. faglia tensile rettangolare con apertura uniforme
6. ellissoide pressurizzato triassiale finito, in approssimazione di quadrupolo

Le inversioni sono state effettuate utilizzando la tecnica dell '*adaptive simulated annealing* (Ingber, 1993), mediante il programma ANGELA, acronimo di *Analysis of Geodetic data in Layered media* (Crescentini et al., 2007), con cui è possibile invertire i dati geodetici per tipi differenti di sorgenti immerse in un semispazio elastico stratificato. I principali risultati ottenuti sono stati:

- le sorgenti assisimmetriche sono sfavorite
- la sorgente favorita può essere schematizzata come un ellissoide triassiale pressurizzato o, equivalentemente, come una faglia tensile a circa 4000 m
- l'azimuth (NW-SE) delle due soluzioni equivalenti è consistente con l'orientamento dei blocchi risorgenti ai CF

La sorgente favorita è un ellissoide triassiale pressurizzato posto ad una profondità di circa 4000 m e con una variazione di volume  $\Delta V \sim 1.6 \times 10^7 \text{m}^3$ . Qualitativamente nei grafici di correlazione tra valori previsti ed osservati i punti si collocano sulla bisettrice e non mostrano discrepanze sistematiche.

Utilizzando i dati SAR sono stati determinati gli spostamenti verticali e verso est relativi al periodo 1995-2000 (periodo di forte subsidenza sempre a rateo costante) tramite delle

rette di best-fit calcolate sugli andamenti temporali degli spostamenti rispetto all'orbita ascendente e discendente del satellite. A questi spostamenti sono stati sottratti quelli ottenuti tramite la sorgente ellissoidale dell'80-83 opportunamente scalati. Una volta sottratto l'effetto della sorgente della deformazione su larga scala dai dati SAR relativi al periodo 1995-2000, rimane un'evidente deformazione residua nell'area della Solfatara. Per determinare le caratteristiche della sorgente di tale anomalia sono stati invertiti gli spostamenti SAR per due sorgenti: la prima sorgente è fissata ed è quella della deformazione dell'80-83 dove solo la variazione di volume è stata lasciata libera, la seconda è una sorgente sferoidale puntiforme. Sotto la zona della Solfatara risulta una piccola (rispetto alla profondità) sorgente sferoidale con asse verticale, a circa 2000 metri di profondità. Dopo avere eliminato anche il contributo di tale sorgente si elimina l'anomalia al di sotto della Solfatara e i residui sono dell'ordine del cm. Al fine di verificare un'effettiva stazionarietà del campo deformativo è stato analizzato tutto il periodo di disponibilità dei dati SAR (1993-2010) generando dei grafici di correlazione tra gli spostamenti verticali in diverse zone dei CF e lo spostamento in una certa zona di riferimento. In un primo caso è stata scelta come zona di riferimento quella di massimo sollevamento, nel secondo caso è stata scelta la zona della Solfatara. I punti si dispongono approssimativamente su delle rette per le zone esterne alla Solfatara, mentre si discostano dalle rette relative al periodo 1993-1997 nella zona della Solfatara. Tali grafici di correlazione suggeriscono l'effettiva stazionarietà del campo di deformazione al di fuori della Solfatara, durante tutto il periodo di disponibilità dei dati SAR.

Per il periodo 2000-2013 sono disponibili gli andamenti temporali delle tre componenti dello spostamento (Nord, Est e Z) ottenute tramite stazioni GPS. La rete GPS ad acquisizione continua permanente dell'area vulcanica napoletana (NeVoCGPS) è attualmente costituita da 29 stazioni (13 nell'area dei Campi Flegre). Per rimuovere un eventuale movimento tettonico regionale e mettere in luce le deformazioni vulcaniche, è stato definito un riferimento locale: la stazione di ENAV. Tale stazione è collocata su una roccia sedimentaria nella penisola di Sorrento, al di fuori dell'area vulcanica. I dati vengono registrati ogni 30 secondi in sessioni da 24 ore e processate prima su base giornaliera e poi su base settimanale. Al fine di dimostrare che gli spostamenti GPS sono consistenti con il modello a due sorgenti ipotizzato, sono stati generati dei grafici di correlazione analoghi a quelli ottenuti tramite i dati SAR, anche in questo caso punti si dispongono approssimativamente su delle rette, questo suggerisce l'effettiva stazionarietà del campo di deformazione anche

durante il periodo analizzato mediante dati GPS (2000-2013). A questo punto sono stati utilizzati tutti i dati a disposizione (livellazione, rilievi planimetrici, SAR e GPS) per stimare la variazione nel tempo della potenza delle due sorgenti ( $\Delta V(t)$ ) e la deviazione standard dei residui. Come è possibile notare dalla figura le due sorgenti hanno un andamento temporale della variazione di Volume simile ma non identico. Questo risultato è rilevante in quanto ci permette di escludere che la deformazione sotto la Solfatara sia legata ad un artefatto dovuto alla distorsione locale del campo di deformazione su larga scala indotta da particolari caratteristiche reologiche.

Per verificare la bontà di tale modello a due sorgenti, agli andamenti temporali dello spostamento dei SAR e GPS delle varie stazioni sono stati sottratti i contributi delle due sorgenti. I residui che si ottengono sono piatti (per brevità sono mostrati solo quelli relativi alla componente est dei GPS) e presentano solo degli eventuali trend lineari riconducibili ad uno spostamento del riferimento.

In conclusione, il campo di deformazione totale ai CF può essere scomposto in due campi stazionari. Il primo è un campo a larga scala generato dall'ellissoide dell'80-83 e il secondo è il campo stazionario localizzato sotto la Solfatara e generato da uno sferoide a 2000 m di profondità. Una conferma a questo modello si ottiene dal confronto con la tomografia sismica e la geochimica, infatti, la posizione della sorgente responsabile del campo di deformazione su larga scala è pienamente consistente con la probabile presenza di fuso tra i 3000 e 4000 metri sotto Pozzuoli, messa in luce da recenti studi di attenuazione sismica (De Siena et al., 2010) mentre la sorgente al di sotto della zona della Solfata è localizzata a 2000m di profondità anche dai modelli concettuali geochimici della Solfatara (Chiodini et al., 2010) e dalle misure geochimiche (Chiodini et al., 2012).

# Bibliography

- [1] AMORUSO A. CRESCENTINI L., and FIDANI C., *Effects of crustal layering on source parameter inversion from coseismic geodetic data*. Geophys. J. Int., 159, 353–364, doi: 10.1111/j.1365-246X.2004.02389.x, 2004.
- [2] AMORUSO A., CRESCENTINI L., LINDE A. T. , SACKS I.S., SCARPA R. and ROMANO P., *A horizontal crack in layered structure satisfies deformation for the 2004-2006 uplift of Campi Flegrei*. Geophysical Research Letters, Vol. 34, L22313, 2007.
- [3] AMORUSO A. CRESCENTINI L., *Inversion of leveling data: how important is error treatment?*. Geophys. J. Int., 171, 1352–1362. doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03585.x, 2007.
- [4] CHIODINI G., CALIRO S., CARDELLINI C., GRANIERI D., AVINO R., BALDINI A., DONNINI M., AND MINOPOLI C., *Longterm variations of the Campi Flegrei, Italy, volcanic system as revealed by the monitoring of hydrothermal activity*. J. Geophys. Res., 115, B03205, doi: 10.1029/2008JB006258., 2010.
- [5] CHIODINI G., CALIRO S., DE MARTINO P., AVINO R., GHERARDI F., *Early signals of new volcanic unrest at Campi Flegrei caldera? Insights from geochemical data and physical simulations*. Geology, 40, 943–946, doi:10.1130/G33251.1., 2012.
- [6] DE SIENA L., DEL PEZZO E., and BIANCO F., *Seismic attenuation imaging of Campi Flegrei: Evidence of gas reservoirs, hydrothermal basins, and feeding systems*. J. Geophys. Res., 115, B09312, doi:10.1029/2009JB006938, 2010.

- [7] RINALDI A. P., TODESCO M. and BONAFEDE M., *Hydrothermal instability and ground displacement at the Campi Flegrei caldera*. Phys. Earth Planet. Inter., 178, 155–161, doi:10.1016/j.pepi.2009.09.005, 2010.
- [8] Zollo A., MAERCKLIN N., VASSALLO M., DELLO IACONO D., VIRIEUX J. and GASPARINI P., *Seismic reflections reveal a massive melt layer feeding Campi Flegrei caldera*. Geophys.Res. Lett., 35, doi:10.1029/2008GL034242, 2008.