

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
“FEDERICO II”



Scuola Politecnica e delle Scienze di Base

Area Didattica di Scienze Matematiche Fisiche e Naturali

Dipartimento di Fisica “Ettore Pancini”

Laurea Triennale in Fisica

**Andamento della deformazione del suolo all’inizio
dell’attuale crisi sismica flegrea**

Relatore:

Dott. Guido Russo

Candidata:

Chiara Caricchia

Matr. N85/1368

Anno Accademico 2023/2024

Indice

Introduzione	1
Capitolo 1: I Campi Flegrei e il loro monitoraggio	2
1.1 I Campi Flegrei	2
1.2 Il fenomeno del bradisismo	4
1.3 La rete NeVoCGPS dell'Osservatorio Vesuviano	5
Capitolo 2: Analisi Dati	7
2.1 Dati di NeVoCGPS	7
2.2 MJD	9
2.3 Smussamento dei dati	10
2.4 FIT polinomiale	12
2.5 Risultati	15
Conclusioni	19
Bibliografia	19

Introduzione

L'area vulcanica dei Campi Flegrei, situata ad ovest di Napoli, rappresenta uno dei siti vulcanici più complessi e studiati al mondo. Caratterizzata da una storia eruttiva comprendente eventi di intensità estremamente variabili, la caldera dei Campi Flegrei ha suscitato un forte interesse scientifico e una crescente preoccupazione a causa della sua mai sopita attività vulcanica e, a questa connessa, sismica. Va infatti rilevato che la caldera flegrea è soggetta, unica al mondo, al fenomeno del bradisismo, cioè un sollevamento del suolo lento rispetto ai fenomeni preruttivi che si verificano nei vulcani a cono, ma veloce rispetto alle normali dinamiche delle caldere nel mondo. Questo lavoro di tesi si propone di esaminare l'andamento della deformazione del suolo nei Campi Flegrei all'inizio dell'attuale crisi bradisismica. L'analisi è condotta sulla base dei dati GPS, forniti dalle stazioni della rete permanente e acquisiti dall'Unità Funzionale di Geodesia dell'Osservatorio Vesuviano ha installato nella caldera flegrea. I risultati ottenuti verranno discussi alla luce del confronto tra il comportamento delle diverse stazioni e delle conclusioni presenti nella letteratura scientifica sull'argomento.

Attraverso questa ricerca, ci si propone di contribuire alla comprensione della dinamica vulcanica dei Campi Flegrei e di fornire informazioni utili per la gestione del rischio vulcanico in questa regione ad alto potenziale per pericolosità sismica e vulcanica.

Questo lavoro di tesi verrà strutturato con una breve introduzione ai Campi Flegrei e il fenomeno del bradisismo. Successivamente, verrà introdotta la rete di stazioni NeVoGPS, che rappresenta la principale fonte dei dati esaminati e discussi nel secondo capitolo.

Capitolo 1

I Campi Flegrei e il loro monitoraggio

1.1 I Campi Flegrei

I Campi Flegrei sono un'area vulcanica attiva, situata ad ovest di Napoli, che abbraccia i comuni di Bacoli, Monte di Procida, Pozzuoli, Quarto, Giugliano in Campania e la parte ovest della città di Napoli. Il termine "Campi Flegrei" (letteralmente "campi ardenti") evidenzia la natura vulcanica dell'area, caratterizzata dalla presenza di numerose fumarole e sorgenti termali, da tempo conosciute e sfruttate fin dall'antichità.

A differenza del più celebre Vesuvio, i Campi Flegrei non sono contrassegnati da un singolo edificio vulcanico dominante, bensì costituiscono un campo vulcanico attivo da oltre 80.000 anni, con diversi centri vulcanici situati all'interno e nelle vicinanze di un'ampia depressione, la caldera. Quest'ultima è il risultato del ripetuto collasso di una vasta area causato dal cedimento del tetto del serbatoio magmatico superficiale, conseguente allo svuotamento del medesimo a seguito di almeno due grandi eruzioni: l'Inimbrite Campana, avvenuta 40.000 anni fa, e il Tufo Giallo Napoletano, 15.000 anni fa. L'eruzione dell'Inimbrite Campana costituisce l'eruzione ad energia più elevata conosciuta nel Mediterraneo, durante la quale una considerevole quantità di cenere fu dispersa nell'atmosfera, influenzando il clima non solo a livello regionale, ma probabilmente anche a livello globale[1].

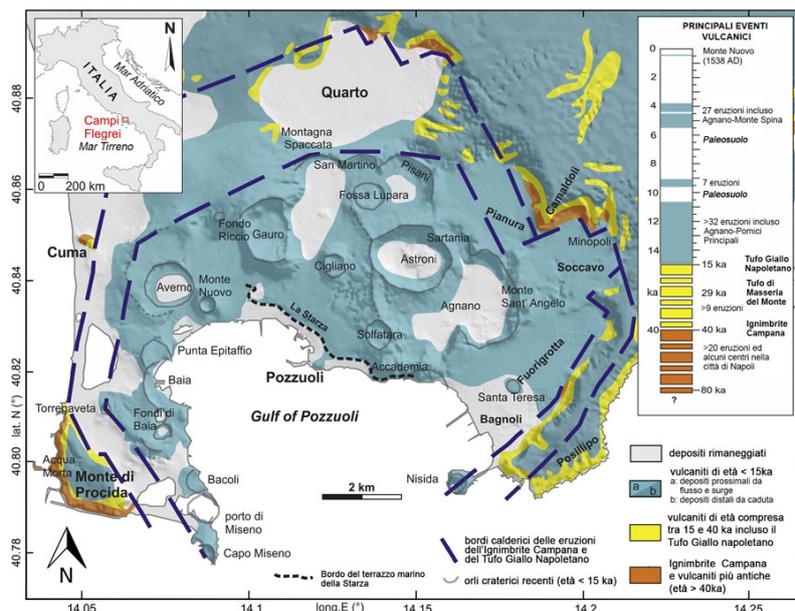


Figura 1.1: Carta geologica schematica dei Campi Flegrei (modificata da Isaia et al., 2019)

In seguito all'eruzione del Tufo Giallo Napoletano che provoca la caldera, cioè lo sprofondamento di circa 800m di profondità nella zona tra terra e mare, l'attività vulcanica si concentra sul bordo e l'intensità delle eruzioni è man mano sempre più debole. Successivamente l'attività dei Campi Flegrei è stata particolarmente intensa, con più di 27 eruzioni registrate solo negli ultimi 5.500 anni ma di intensità notevolmente inferiore rispetto a quella del Tufo Giallo. L'ultima di esse, nel 1538, ha dato origine al cono di tufo di Monte Nuovo. Questa eruzione ha prodotto $0,1\text{km}^3$ di DRE (Roccia densa equivalente), di rilevanza quindi quasi nulla, prova ne siano i pochissimi danni registrati. E' ancora possibile vedere infatti alla base del Monte Nuovo le rovine del Tempio di Venere, sopravvissuto all'eruzione.

La caldera dei Campi Flegrei è soggetta a una lenta deformazione, conosciuta come bradisismo. Nei periodi 1970-72 e 1982-84, l'area flegrea ha vissuto crisi bradisimiche, durante le quali il suolo, in particolare nell'abitato di Pozzuoli, ha subito un sollevamento totale di circa 3,5 metri[2]. La prima crisi ha portato all'evacuazione forzata dell'area di Rione Terra, mentre la seconda è stata caratterizzata da intensa

sismicità, provocando gravi danni agli edifici, tanto da comportare una seconda evacuazione degli abitanti di Pozzuoli nella più lontana zona di Monte Ruscello. Dopo queste crisi, si è verificato un periodo di generale subsidenza, interrotto a partire dal 2005 da un'inversione del fenomeno, che ha portato a un costante sollevamento del suolo, fenomeno ancora in atto.

1.2 Il fenomeno del bradisismo

Il bradisismo si verifica in modi diversi nel corso del tempo, causando sia sollevamento che subsidenza dell'area coinvolta. Questo fenomeno è ampiamente documentato anche in altre caldere vulcaniche del mondo, dove è conosciuto come risorgenza calderica. Il bradisismo ha però la caratteristica di essere, per quanto lento, più veloce rispetto alla velocità tipica di risorgenza.

La ricostruzione delle variazioni del bradisismo nei Campi Flegrei, a partire dal IV secolo d.C. fino ai giorni nostri, è stata resa possibile grazie alle osservazioni effettuate sulle rovine di una costruzione di epoca romana, situata vicino al porto di Pozzuoli: il Serapeo. Originariamente creduto un tempio dedicato al dio egizio Serapide (da cui deriva il nome), in realtà era un mercato romano attivo tra il I e il II secolo d.C. La caratteristica distintiva di questa struttura è la presenza di fori, ad altezze diverse sulle tre colonne ancora in piedi, causati da molluschi marini (litodomi) che abitavano nella fascia intertidale, che forniscono così indicazioni sul livello del mare nel passato. Grazie alla datazione di questi fori è stato possibile tracciare le variazioni del livello del mare nel corso del tempo, attribuibili al sollevamento o all'abbassamento del suolo a Pozzuoli causato dal bradisismo.

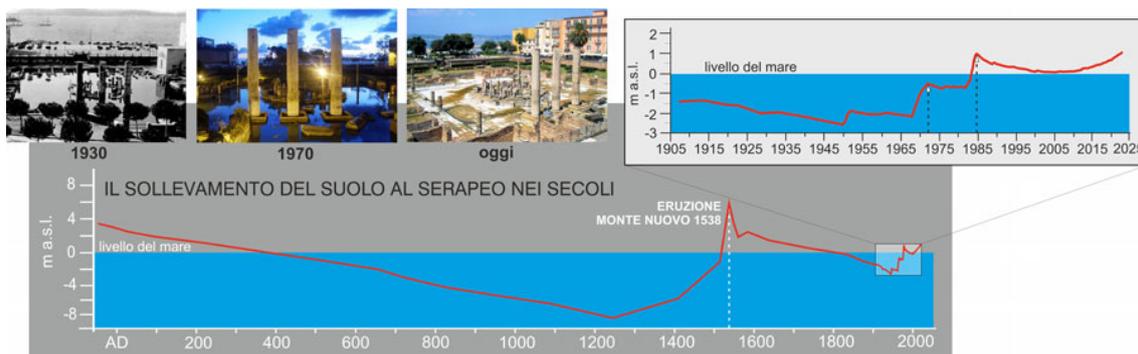


Figura 1.2: Il Serapeo negli anni e il suo andamento s.l.m

Nell'era moderna (dal 1905), le tecniche di livellazione geodetica e, negli ultimi decenni, le misurazioni tramite GPS e interferometriche satellitari consentono di valutare in tempo quasi reale le variazioni del suolo e di monitorare il fenomeno del bradisismo flegreo [2].

1.3 La rete NeVoCGPS dell'Osservatorio Vesuviano

La rete NeVoCGPS comprende 30 stazioni permanenti distribuite nel distretto vulcanico di Napoli e nelle aree circostanti (Figura 2.2). Tutte queste stazioni sono state dotate di canali di trasmissione dati e di antenne progettate per ridurre al minimo gli effetti di interferenza multipath [3].

Dato l'alto tasso di urbanizzazione della zona e le sfide logistiche significative legate al posizionamento delle stazioni (come la necessità di una visuale chiara del cielo per una ricezione precisa del segnale, connessioni elettriche, trasmissione dati e protezione degli strumenti), la maggior parte delle stazioni è stata installata sui tetti di edifici stabili. Qui, sono ancorate tramite dispositivi di centraggio tridimensionale forzato per garantire una corretta orientazione delle antenne. In alcuni casi, sono state erette colonne di cemento fissate al substrato roccioso.

Ogni giorno, vengono scaricati da remoto i dati GPS dual-frequency osservati da ciascuna stazione e inviati all'Osservatorio Vesuviano. Questi dati devono essere sottoposti ad una valutazione della qualità prima di essere elaborati e archiviati in un database. I dati cGPS della rete NeVocGPS vengono processati utilizzando il software GPS Bernese v. 5.0 [3] su base giornaliera con le orbite finali IGS e i parametri di rotazione terrestre (ERPs) [4]. I risultati dell'elaborazione sono costituiti da file ASCII, da cui, in maniera automatica, vengono estratte le informazioni relative alle posizioni e alle incertezze, ΔE , ΔN , ΔU delle componenti nel sistema Est, Nord e Up. La deformazione del suolo è un importante precursore vulcanico, poiché è collegata all'eccesso di pressione e alla migrazione del magma.[5]

Capitolo 2

Analisi Dati

2.1 Dati di NeVoCGPS

Il presente studio si basa sull'analisi dei dati raccolti dalla rete Neapolitan Volcanoes Continuous GPS (NeVoCGPS), gestita dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia–Osservatorio Vesuviano (INGV-OV). I dati forniti riguardano le posizioni North, East e Up delle stazioni indicate in figura 2.2 in funzione del tempo, con un intervallo di campionamento di 30 secondi, mediati poi sul giorno [3]. Ogni stazione è identificata da un codice alfabetico di 4 caratteri e la data è espressa in MJD, Modified Julian Date (si veda il Paragrafo 2.2), cioè il numero di giorni passati dalla data di riferimento delle 00:00 del 17 Novembre 1858.

Lo scopo di questo lavoro di tesi è approfondire lo studio delle variazioni nella posizione verticale (Up) registrate da diverse stazioni. L'obiettivo è confrontare il comportamento di tali stazioni all'inizio dell'attuale periodo di crisi sismica.

Per individuare il periodo di inizio di tale crisi, è stata presa come riferimento la stazione di RITE (Rione Terra), che nel corso degli anni ha evidenziato il massimo sollevamento come mostrato in figura 2.1.

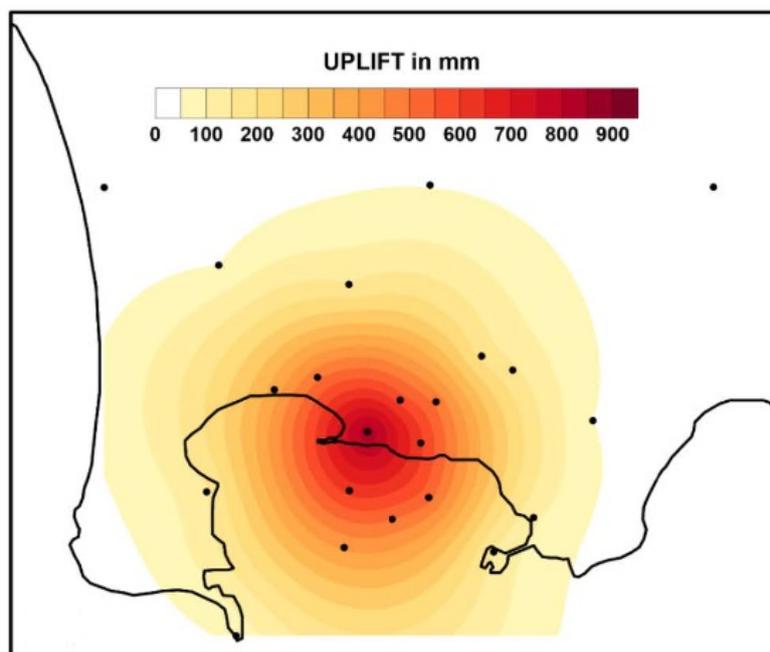


Figura 2.1: Mappa degli spostamenti verticali registrati nell'area flegrea da gennaio 2016 a ottobre 2023 (fonte: Bollettino di Sorveglianza mensile di ottobre 2023).

Le stazioni oggetto di questa analisi sono state quindi selezionate in base alla loro attività durante questo periodo di tempo.

La rete di stazioni infatti, come discusso nel primo capitolo, è stata implementata nel corso degli anni e non tutte erano attive tra la fine del 2004 e l'inizio del 2005, periodo individuato come l'inizio di una nuova crisi bradisismica. Nella figura sottostante, vengono individuate le stazioni attive in tale intervallo temporale.

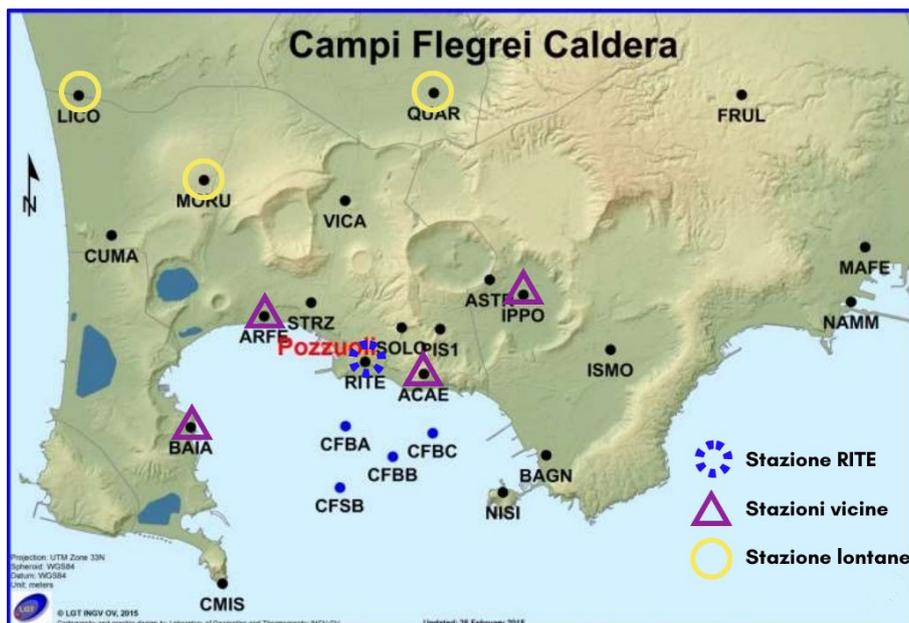


Figura 2.2: Mappa delle stazioni attive a fine 2004-inizio 2005

L'analisi proseguirà con la smussatura dei dati tramite media mobile e l'individuazione dei minimi attraverso il fitting polinomiale di secondo grado.

2.2 MJD

MJD è una modifica della Data Giuliana comunemente utilizzata dagli astronomi, geodesisti e persino alcuni storici. Questa convenzione di datazione, progettata per facilitare i calcoli cronologici, numera tutti i giorni in modo consecutivo, a partire da una data sufficientemente lontana nel passato in modo da precedere il periodo storico. Il Numero del Giorno Giuliano è un contatore intero dei giorni a partire dal mezzogiorno del 1° gennaio 4713 a.C., che corrisponde al Numero del Giorno Giuliano 0. La Data Giuliana è semplicemente l'estensione del Numero del Giorno per includere una frazione reale del giorno, consentendo un'unità di tempo continua.

MJD modifica questa Data Giuliana in due modi. Il MJD inizia a mezzanotte anziché a mezzogiorno, seguendo convenzioni più standard. In secondo luogo, per semplicità, le prime due cifre della Data Giuliana vengono rimosse. Ciò è dovuto al

fatto che, per circa tre secoli a partire dal 17 novembre 1858, il giorno giuliano si trova tra 2400000 e 2500000. Il MJD elimina quelle prime due cifre "24" [6].

2.3 Smussamento dei dati

I dati forniti dalle 8 stazioni (QUAR, MORU, LICO, RITE, ACAE, IPPO, BAIA e ARFE) presentavano molto rumore (presumibilmente dovuto ad un errore durante l'acquisizione e/o ad un errore durante il processing dei dati), si è dunque proceduto ad effettuare una media mobile nel tentativo di ridurlo. Nella figura 2.3, dove è chiaramente visibile il rumore, sono riportati come esempio i dati originali di alcune delle stazioni in esame a confronto con il loro smussamento.

La media è stata fatta a 10, 15 e 30 giorni. Poichè l'RMS riferito allo smussamento nei diversi periodi temporali era molto basso (Vd tabella2.1) si è scelto di lavorare su quella a 15 giorni. Tale periodo è stato ritenuto sufficientemente lungo per ottenere una riduzione del rumore significativa, ma nel contempo sufficientemente breve da non cancellare caratteristiche vulcanologicamente rilevanti della curva.

Giorni media mobile	RMS
10 giorni	0.0038
15 giorni	0.0040
30 giorni	0.0045

Tabella 2.1: Tabella RMS a confronto

Questo calcolo fornisce una misura della precisione del fit rispetto ai dati originali: un valore di RMS più basso indica un migliore adattamento del modello ai dati osservati.

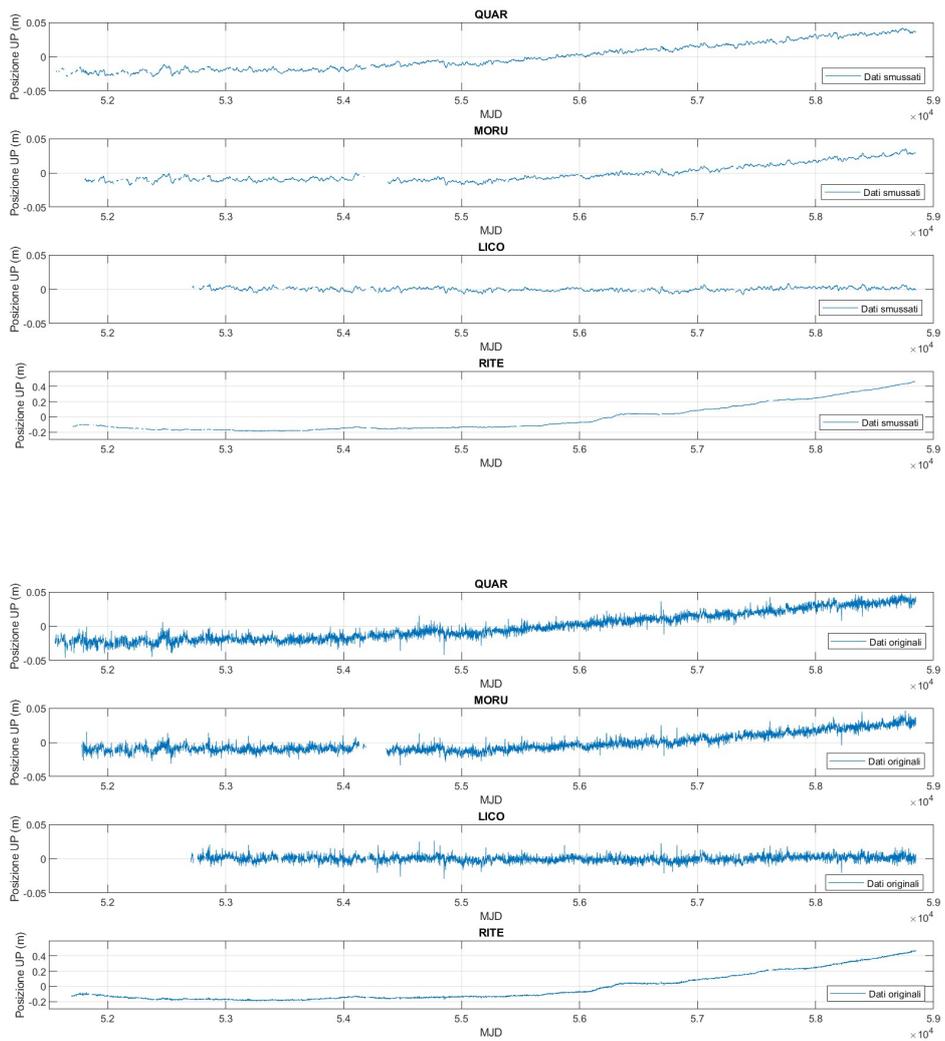


Figura 2.3: Grafici a confronto dei dati originali con quelli smussati

2.4 FIT polinomiale

Per trattare e interpretare i dati raccolti dalle stazioni, è stato adottato un approccio di analisi mediante l'utilizzo di un FIT polinomiale di grado due. Questa analisi è stata facilitata attraverso l'implementazione di una funzione appositamente creata in ambiente MATLAB. Questa funzione richiede tre argomenti: i vettori contenenti le coordinate x e y dei dati, dove le coordinate x rappresentano i tempi espressi in Modified Julian Date (MJD), mentre le coordinate y indicano le posizioni up delle stazioni e il grado desiderato del polinomio.

I coefficienti del polinomio possono essere calcolati risolvendo il sistema di equazioni lineari formato dalle equazioni normali:

$$X^T X \mathbf{a} = X^T \mathbf{y} \quad (2.1)$$

dove X è la matrice di progettazione che contiene le potenze crescenti delle coordinate x , \mathbf{a} è il vettore dei coefficienti del polinomio e \mathbf{y} è il vettore delle coordinate y dei dati osservati.

L'equazione della curva fittata è semplicemente la rappresentazione algebrica del polinomio ottenuto, che mostra la relazione tra le variabili indipendenti e dipendenti. Ad esempio, per un polinomio di grado 2, l'equazione della curva fittata sarebbe:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2$$

dove a_0 , a_1 , a_2 sono i coefficienti calcolati.

Poiché siamo interessati al periodo di risollevarmento, la scala temporale è stata ridotta nell'intorno del periodo in cui RITE assume valore minimo. Il FIT è stato eseguito per identificare con maggiore sicurezza il minimo delle altre stazioni, al-

trimenti confondibile con una fluttuazione dei dati non corrispondente al minimo effettivo.

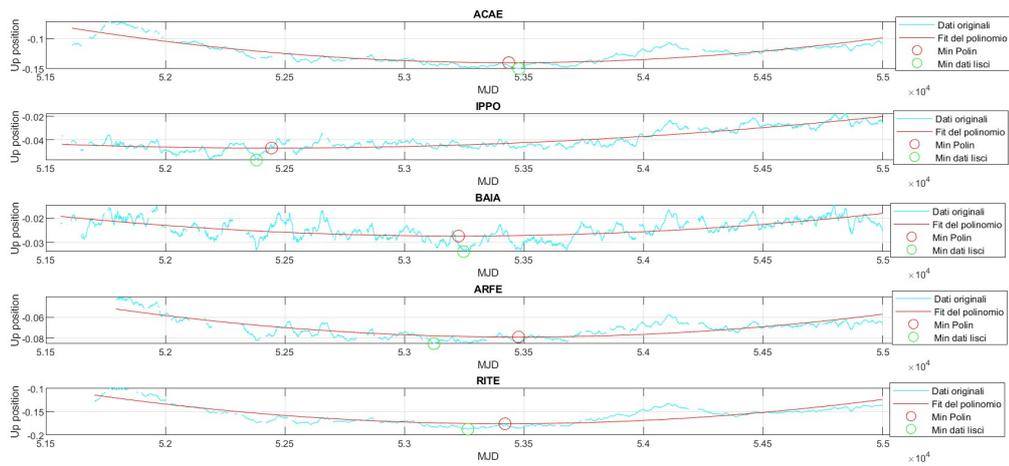
Il processo di fitting ha previsto, inizialmente, la rimozione di eventuali dati mancanti (NaN) per garantire l'affidabilità delle analisi. Successivamente, è stata creata la matrice di progettazione X , che rappresenta una serie di vettori di base polinomiali per il fitting. Ogni colonna della matrice X corrisponde a una potenza crescente delle coordinate x fino al grado specificato del polinomio.

Le equazioni normali sono state utilizzate per calcolare i coefficienti del polinomio di grado due. Questo metodo implica la risoluzione di un sistema lineare ottenuto dalla moltiplicazione delle trasposte della matrice di progettazione X e del vettore y .

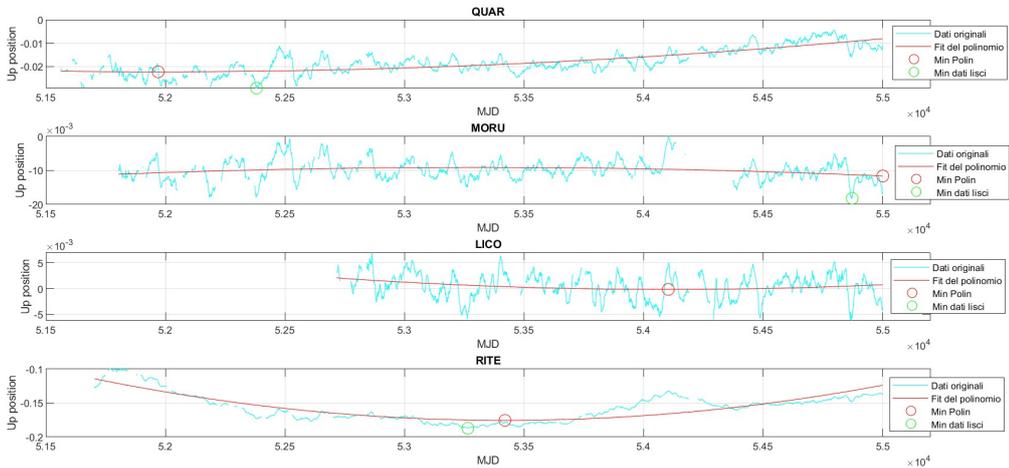
Una volta ottenuti i coefficienti del polinomio, è stata generata l'equazione della curva fittata. Questa equazione, espressa come stringa algebrica, mostra i coefficienti associati a ciascun termine del polinomio, offrendo così una rappresentazione matematica della relazione tra le posizioni up e i tempi delle stazioni.

Poichè tutti i dati presentano lo stesso errore $\Delta U=0.01m$, non compare esplicitamente nell'equazione (2.1) la matrice di covarianza.

Nelle figure 2.4a e 2.4b sono riportati i dati originali smussati, il fit polinomiale di ognuna stazione e i due minimi presi su questi ultimi due. I dati sono stati stretti intorno al periodo di minimo di Rione Terra, tra la fine del 2004 e il 2005. La scala temporale usata nelle figure va dalla mjd 51500 a 55000, corrispondenti agli inizi del 2000 e la fine del 2009.



(a) Stazioni più vicine rispetto a RITE



(b) Stazioni più lontane rispetto a RITE

Figura 2.4: Dati smussati con fit polinomiale di grado 2 e punti di minimo, in entrambe le figure la stazione RITE è stata posta in basso come confronto

Infine, il risultato del fitting è stato restituito sotto forma di coefficienti del polinomio e dell'equazione della curva fittata, fornendo un utile strumento per l'interpretazione e l'analisi dei dati raccolti.

2.5 Risultati

Dall'osservazione dei grafici emerge che per alcune stazioni il modello riesce a seguire l'andamento dei dati, per altre risulta meno accurato. Ad esempio, per la stazione RITE il modello si adatta bene nell'intervallo temporale tra 52000 e 53500, anche se sono evidenti rallentamenti della velocità di sollevamento che il modello necessariamente non riesce a riprodurre. Tuttavia il fit polinomiale riesce a riprodurre abbastanza bene l'aumento di velocità di sollevamento che si ha in corrispondenza del mini up-lift successivo a questa data. Nonostante ciò, il FIT aiuta nell'identificazione del periodo di minimo. Per alcune stazioni come ACAE, IPPO e BAIA, il minimo stimato si avvicina molto a quello derivante dai dati lisciati, per altre stazioni vi è una discrepanza significativa. Quest'ultima situazione è particolarmente evidente per le stazioni più distanti da RITE, come mostrato nella Figura 2.4b.

Nei casi specifici di LICO e MORU, le date ottenute dal fit non sono attendibili. Per LICO in particolare le osservazioni iniziano troppo a ridosso del minimo registrato a Rione Terra.

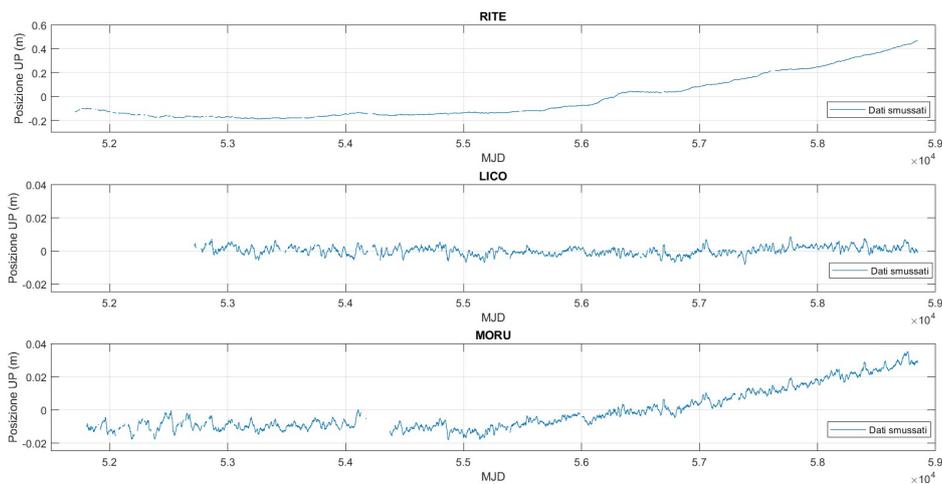


Figura 2.5: RITE, LICO e MORU a confronto

Entrambe le stazioni non seguono un andamento parabolico crescente, ma piuttosto lineare. Durante la fase di risorgenza, le due stazioni sembrano essere quasi "insensibili" alle deformazioni osservate da RITE e dalle stazioni adiacenti, suggerendo un disaccoppiamento meccanico tra di loro (Vd 2.4b). Questo comportamento potrebbe essere attribuito alla struttura calderica, che agisce come una discontinuità e costituisce una barriera alla trasmissione degli spostamenti dal centro della caldera alla sua periferia [7]. Affinché le stazioni LICO e MORU risentano degli spostamenti registrati da RITE e dalle stazioni circostanti, è necessario che le deformazioni siano significative. Il grafico mostrato nella Figura 2.5 evidenzia come, mentre RITE inizia a mostrare una crescita, la stazione di LICO resta quasi insensibile al sollevamento, quella di MORU lo segue ma con ritardo.

Sembrerebbe quindi che le deformazioni siano limitate e possano essere interpretate come l'effetto del bordo della caldera, come evidenziato anche nei dati presentati.

Il confronto dei minimi ha messo in un luce un' interessante osservazione: come evidenziato nella tabella 2.2, IPPO mostra un inizio di nuovo andamento di up crescente che anticipa notevolmente quello di RITE, di circa 1000 giorni, corrispondenti a 3 anni.

Stazione	MJD del Minimo fittato	Stazione	MJD del Minimo
QUAR	51970	IPPO	51544
IPPO	52444	QUAR	52381
BAIA	53226	LICO	52705
RITE	53420	ARFE	53123
ACAE	53436	BAIA	53247
ARFE	53477	RITE	53265
LICO	54103	ACAE	53478
MORU	55000	MORU	54872

Tabella 2.2: Confronto tra le MJD dei minimi fittati e dei minimi ai dati smussati delle stazioni, in ordine crescente

Questo è spiegabile se si tiene in considerazione la posizione di IPPO. Essa infatti si trova nelle immediate vicinanze della Solfatara, dove si registra la maggior parte dei terremoti durante il bradisismo (cosa che avvenne anche durante la crisi del 1982-1984) [8]. Durante le fasi di subsidenza, si verificano dei mini up-lift spesso accompagnati da sciami sismici aventi epicentro proprio in zona Solfatara, nonostante in queste fasi l'attività sismica dei Campi Flegrei diminuisca drasticamente.

La prossimità di IPPO alla Solfatara suggerisce che i meccanismi profondi che innescano la deformazione a RITE possano manifestarsi anche superficialmente in questa zona. Come già evidenziato dagli studi di magnetotellurica (metodo di prospezione che sfrutta il campo elettromagnetico), esiste una zona resistiva al di sotto della Solfatara che si estende fino a diversi chilometri sotto la superficie. Nell'area Solfatara-Pisciarelli, la bassa resistenza superficiale viene attribuita a una copertura argillosa fratturata posizionata al di sopra di un serbatoio ad alta attività vaporica con meccanismo convettivo.2.6 [9].

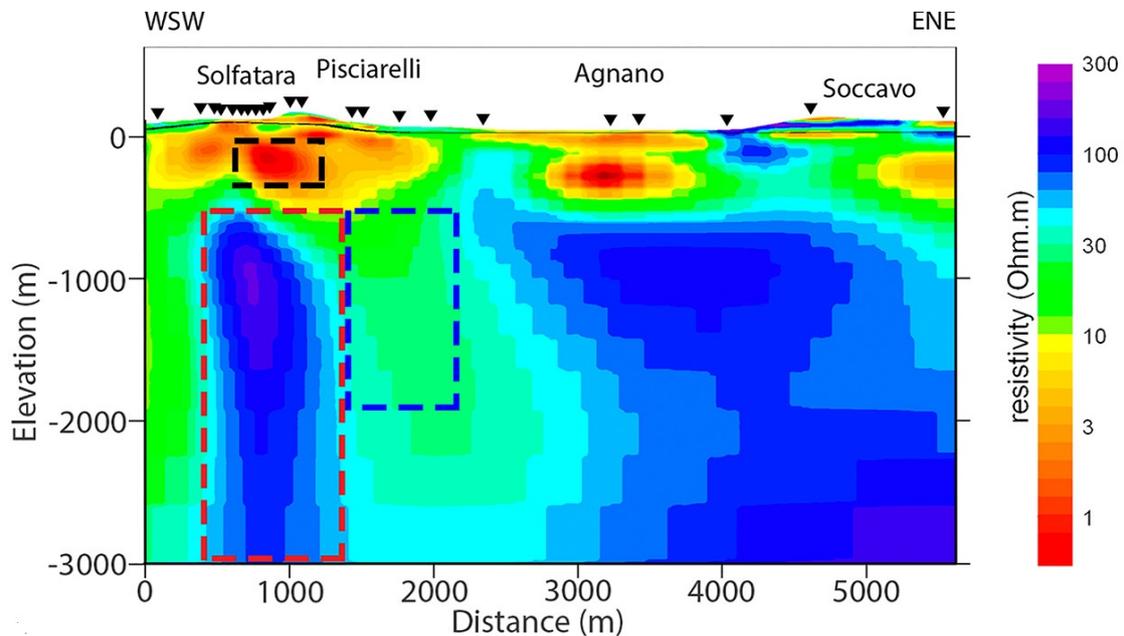


Figura 2.6: Modello di inversione della resistività bidimensionale: i triangoli neri in alto rappresentano le stazioni AMT. AMT=audiomagnetotelluric

Ciò che avviene alla Solfatara è quindi correlato a fenomeni che si manifestano a profondità significative, influenzando probabilmente ciò che si trova al di sotto di Rione Terra e, in generale, nella zona più a sud-ovest rispetto alla Solfatara [9].

Dall'analisi dei dati emerge che IPPO, in qualche modo, sembra in grado di anticipare il comportamento futuro di RITE.

Conclusioni

Questo lavoro di tesi ha analizzato le dinamiche delle stazioni al di fuori della caldera, ma ha fatto soprattutto emergere dati significativi riguardanti la zona della Solfatara. Quest'ultima sembra risentire in anticipo delle cause profonde che provocano le deformazioni nella zona flegrea e in particolare nella zona di Pozzuoli. Le cause potrebbero essere cercate nella conformazione del sistema sismico e vulcanico.

L'analisi condotta si è basata su un approccio molto semplificato, tuttavia, per ottenere una comprensione più precisa e dettagliata, potrebbe essere presa in considerazione l'implementazione di un FIT più sofisticato che tenga conto di possibili variazioni della velocità di risorgenza per intervalli di tempo di svariati mesi. Sebbene il metodo utilizzato in questo lavoro di tesi sia adeguato per gli obiettivi prefissati, un approccio più calibrato sulla curva dei dati potrebbe rivelarsi vantaggioso per future ricerche.

Sarebbe particolarmente interessante esaminare in modo sistematico la relazione tra le variazioni registrate a RITE e quelle osservate nella zona della Solfatara. Ciò potrebbe fornire preziose informazioni sulla dinamica del sistema vulcanico e sismico nella regione dei Campi Flegrei. L'integrazione delle nuove stazioni SOLO e PIS1 nella rete di monitoraggio potrebbe facilitare questa analisi, consentendo un'osservazione più accurata e dettagliata dei cambiamenti nel tempo e nello spazio.

Bibliografia

- [1] P G Albert et al. “Evidence for a large-magnitude eruption from Campi Flegrei caldera (Italy) at 29ka”. In: *Geology* 47 (2019), pp. 595–599.
- [2] F. Sansivero. *Il Bradisismo*. S.D. URL: <https://www.ov.ingv.it/index.php/il-bradisismo>.
- [3] Prospero De Martino et al. “The Ground Deformation History of the Neapolitan Volcanic Area (Campi Flegrei Caldera, Somma–Vesuvius Volcano, and Ischia Island) from 20 Years of Continuous GPS Observations (2000–2019)”. In: *Remote sensing* 13.14 (lug. 2021), p. 2725. DOI: 10.3390/rs13142725. URL: <https://doi.org/10.3390/rs13142725>.
- [4] John M. Dow, R.E. Neilan e C. Rizos. “The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems”. In: *J Geod* 83 (dic. 2009), pp. 191–198. DOI: 10.1007/s00190-008-0300-3.
- [5] Prospero De Martino, Umberto Tammaro e Francesco Obrizzo. “GPS time series at Campi Flegrei caldera (2000-2013)”. In: *ANNALS OF GEOPHYSICS* 57.2 (2014), pp. 2–6.
- [6] Nasa site. *CORE2: Coordinated Optical-Radio Earth Observing Satellites*. 2022. URL: <https://core2.gsfc.nasa.gov/time/> (visitato il 16/04/2024).
- [7] François Beauducel et al. “3-D modelling of Campi Flegrei ground deformations: Role of caldera boundary discontinuities”. In: *Geodetic and Geophysical Effects Associated with Seismic and Volcanic Hazards* (2004), pp. 1329–1344.
- [8] F Bianco et al. “The role of hydrothermal fluids in triggering the July–August 2000 seismic swarm at Campi Flegrei, Italy: evidence from seismological and mesostructural data”. In: *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 133.1-4 (2004), pp. 229–246.
- [9] Agata Siniscalchi et al. “Reservoir structure and hydraulic properties of the Campi Flegrei geothermal system inferred by audiomagnetotelluric, geochemical, and seismicity study”. In: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 124.6 (2019), pp. 5336–5356.