

# Terremoti in aree vulcaniche: i Campi Flegrei

Paolo Capuano

*Negli ultimi trent'anni si è fortemente sviluppata la sismologia vulcanica e si è scoperta l'esistenza di caratteristiche della sismicità specifiche dei vulcani. Le caratteristiche riscontrate nei Campi Flegrei tendono ad attribuire un ruolo fondamentale alla dinamica del sistema idrotermale.*

**L** terremoto, inteso come lo scuotimento del suolo prodotto da fenomeni endogeni, è uno dei fenomeni naturali più diffusi e frequenti (10<sup>6</sup> eventi per anno, come ordine di grandezza). Poiché rappresenta una minaccia per la sua vita, per le sue opere e costruzioni, ma anche per il tessuto economico e sociale delle comunità, l'uomo ha sempre cercato, fin dai tempi dei Greci, di svelare come e dove si genera un terremoto per non averne più solo paura e per cercare di ridurre gli effetti nefasti che esso produce per la sua vita. Infatti, il terremoto evoca nell'uomo moderno l'idea della distruzione delle cose che più o meno faticosamente e adeguatamente ha realizzato.

La data di nascita della moderna sismologia, la scienza che studia i terremoti, viene ricondotta al XVIII secolo, a seguito dei forti terremoti di Lisbona (1755) e della Calabria (1783), in quanto cominciarono ad essere elaborate ipotesi sull'origine dei terremoti basate su valutazioni scientifiche e non più solo filosofico-religiose.

L'idea di terremoto è stata modificata dall'incremento delle conoscenze che lo sviluppo scientifico ha prodotto grazie all'evoluzione sia della strumentazione per la osservazione quantitativa, che delle procedure per il calcolo e l'analisi più avanzate. Oggi, la fenomenologia del terremoto, inteso come lo scuotimento del suolo prodotto dalle onde

sismiche che propagandosi dal fuoco (ipocentro) raggiungono la superficie terrestre, è ben compresa nel modello della fratturazione delle rocce lungo zone di fragilità (piani di faglia) che, rompendosi, irradiano onde sismiche generalmente caratterizzate da fasi ben definite e delle quali le principali sono le cosiddette fasi P (onde longitudinali) ed S (onde trasversali). Questo modello ha consentito di migliorare notevolmente la comprensione del fenomeno sismico, anche per valutare l'effetto che lo scuotimento del suolo generato dalle onde sismiche produce sull'ambiente naturale e costruito.

Negli ultimi trent'anni si è fortemente sviluppata la sismologia vulcanica, ovvero la sismologia che si occupa dello studio della natura e della dinamica dei segnali sismici relazionabili con l'iniezione e il trasporto di magma e dei fluidi idrotermali associati. Anche in questo caso, lo sviluppo di sensori capaci di rilevare le oscillazioni del suolo in un intervallo di frequenze più ampio e lo sviluppo di procedure di calcolo per l'analisi di segnali non impulsivi hanno svelato l'esistenza di caratteristiche della sismicità specifiche dei vulcani. Sono stati, infatti, osservati ed analizzati segnali sismici di tipo diverso, attribuiti a processi fisici differenti dalla fratturazione delle rocce.

Questa maggiore complessità della sismicità in aree vulcaniche si traduce anche in una maggiore complessità

della terminologia utilizzata [1]. Terminologia che è generalmente basata sulle caratteristiche del contenuto in frequenza dei segnali osservati. Bisogna notare, comunque, che essa rimane un problema per la sismologia vulcanica sulla quale un consenso completo non è stato ancora raggiunto.

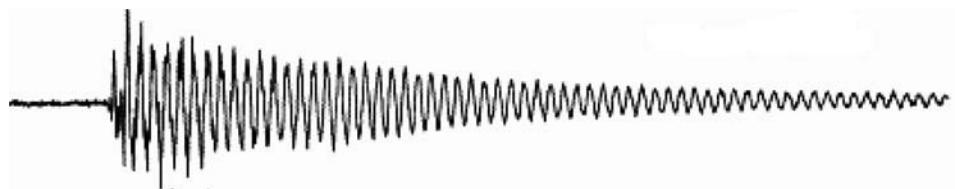
Cerchiamo, allora, di fare un poco di chiarezza. Le tipologie più frequenti e riconosciute di eventi che si verificano in aree vulcaniche sono: 1) eventi ad alta frequenza (HF, *high frequency*) che hanno caratteristiche simili a quelle dei terremoti da fratturazione delle rocce e pertanto sono anche detti vulcano-tettonici (VT); 2) tremore vulcanico; 3) eventi a bassa frequenza (LF, *low frequency*, o LP, *long period*) con la sottocategoria di quelli a frequenza molto bassa (VLP, *very long period*); 4) esplosioni.

1. Gli eventi vulcano-tettonici (VT) sono molto simili ai terremoti tettonici, con fasi sismiche ben definite, ed il processo che li genera, la fratturazione di taglio delle rocce, è ben compreso. Lo studio di questi terremoti è utile per determinare le caratteristiche dello stato in cui si trova il vulcano e possono, in alcuni casi, essere utili nell'individuare migrazioni del magma verso la superficie. Talvolta, tra gli eventi VT, si osservano caratteristiche della sorgente anomale (cosiddetti meccanismi "non doppia coppia"), che indicano una maggiore complessità del processo di genesi dei terremoti.
2. Il tremore vulcanico è il più caratteristico dei segnali sismici registrati sui vulcani attivi. Il tremore, quasi con-

tinuo, è generalmente caratterizzato da una banda di frequenza limitata (0,5-5 Hz) quasi monocromatica ed una durata lunga (ore, giorni, settimane) rispetto agli eventi VT (decine di secondi). Il tremore, associato a variazioni di pressione di poro legate alla liberazione di gas in un magma o alla fusione delle rocce, è quindi una risposta del sistema vulcanico ad una eccitazione sostenuta nel tempo.

3. L'attività sismica a bassa frequenza LP (1-5Hz), insieme al tremore vulcanico, è stata ampiamente osservata in relazione alle attività magmatiche e idrotermali in aree vulcaniche ed è stata riconosciuta come un fenomeno precursore per l'attività eruttiva [2], tanto da diventare il Santo Graal della sismologia vulcanica. La forma d'onda degli eventi LP è caratterizzata da semplici oscillazioni armoniche smorzate, tranne che per un breve intervallo di tempo alla comparsa dell'evento (Figura 1). Questa firma caratteristica è comunemente interpretata come dovuta alla pressurizzazione di fluidi nei condotti vulcanici, in risposta ad un'eccitazione localizzata nel tempo. A differenza degli eventi VT, non è possibile localizzare questa sismicità con metodi convenzionali a causa dell'assenza di fasi impulsive. Gli eventi LP sono particolarmente importanti nella quantificazione dei processi vulcanici e idrotermali, poiché consentono di ricostruire le proprietà del sistema sorgente di questi eventi e quindi lo stato di criticità del sistema vulcanico.

Figura 1. Esempio di segnale LP caratterizzato dalla coda quasi-armonica, dopo un inizio più ricco di alte frequenze.



4. Le cosiddette esplosioni vulcaniche, cioè onde che si propagano anche nell'aria, caratterizzano il comportamento di alcuni vulcani, come Stromboli; sono state studiate negli ultimi anni con l'utilizzo di microfoni infrasonici o sensori di pressione, ad integrazione di reti sismiche. Infatti, le onde acustiche in atmosfera sono poco influenzate da effetti di propagazione come lo sono le onde sismiche nel terreno. Quindi, i dati acustici danno una visione più diretta di alcuni processi esplosivi ed eruttivi.

Il tentativo di classificazione in base al contenuto in frequenza (Figura 2), può descrivere bene il comportamento di ogni singolo vulcano, ma non vincola necessariamente eventi simili in due diversi vulcani ad essere causati dagli stessi meccanismi fisici. In ogni caso, la comprensione dell'origine degli eventi LP e del tremore è di importanza critica poiché le eruzioni vulcaniche, generalmente, sono precedute ed accompagnate da questo tipo di sismicità che quindi può fornire informazioni utili per una previsione a breve termine [3].

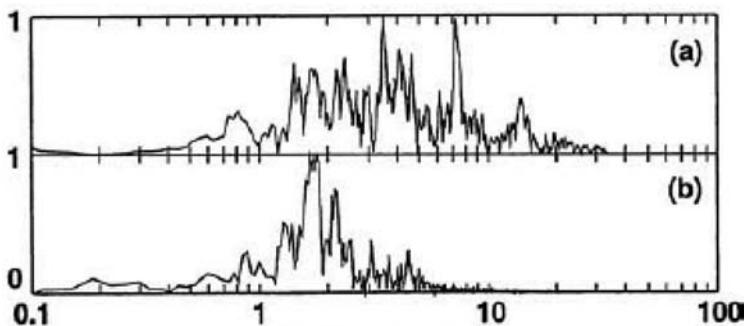
Per completezza di informazione sull'evoluzione delle conoscenze sui segnali sismici, va detto che, a seguito della migliorata capacità sperimentale di osservare il moto del suolo, sono state individuate nuove caratteristiche sismiche anche in zone non vulcaniche, per

cui è stato introdotto anche il concetto di tremore non vulcanico e di terremoto lento.

Possiamo ora chiederci cosa si osserva nei Campi Flegrei di tutta questa fenomenologia che la sismologia vulcanica ha svelato negli anni più recenti ?

L'inizio della descrizione della sismicità ai Campi Flegrei risale all'eruzione del Monte Nuovo nel 1538 che, secondo documenti storici, sarebbe stata preceduta da terremoti avvertiti circa 100 anni prima [4]. Dopo alcuni secoli di subsidenza (abbassamento del suolo) successivi a quest'ultima eruzione, la caldera dei Campi Flegrei mostra chiare evidenze di ripresa della fase di sollevamento dagli anni Settanta. Infatti, nei periodi 1970-1972 e 1982-1984 avvengono due intensi episodi di sollevamento (per complessivi 3,5 m circa nel punto di massimo sollevamento), accompagnati anche da attività sismica, che nel primo caso è stata solo parzialmente osservata ed analizzata a causa del basso numero di stazioni sismiche che all'epoca erano distribuite sul territorio. Nel 1970-72, in ogni caso, la sismicità è di moderata intensità con alcune centinaia di eventi VT con magnitudo  $M < 2$ , di cui solo pochi sono avvertiti dalla popolazione, insieme ad altri eventi di origine artificiale, che successivamente sono stati individuati come dovuti alla pesca di frodo con esplosivo, allora molto praticata. La sequenza sismica del periodo 1982-84 è la più rilevante degli ultimi 60 anni registrata ai Campi Flegrei, in termini di numero ed energia degli eventi. Questo periodo è caratterizzato da un'intensa sequenza di eventi VT (più di 10.000) che raggiungono una magnitudo massima  $M = 4,2$  ed, in particolare, con uno sciame di circa 500 scosse l'1 aprile 1984, tanto da determinare una parziale evacuazione della città di Pozzuoli. La maggior parte della sismicità è concentrata nell'area Pozzuoli-Solfatara, con pochi eventi nella parte occidentale

Figura 2. Esempi di spettri di ampiezza normalizzati per un evento VT (a) e per un evento LP (b).



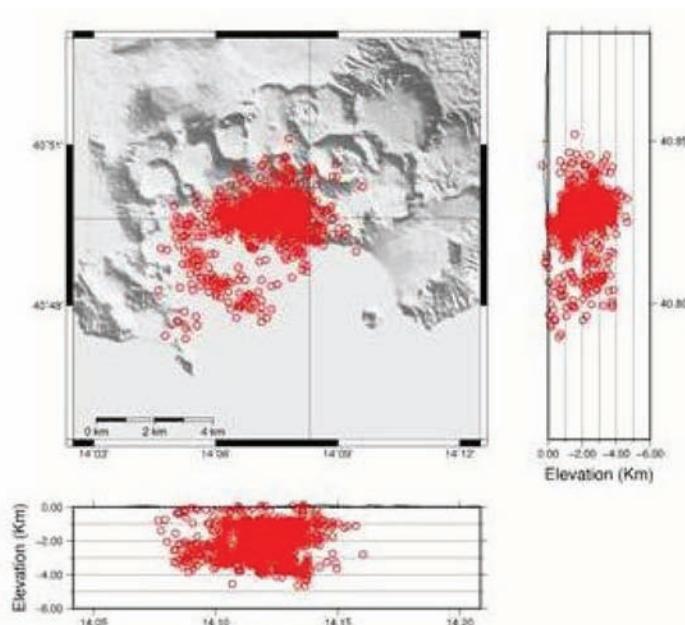


Figura 3. Distribuzione spaziale della sismicità (VT) nel periodo 1982-84.

della baia di Pozzuoli (Figura 3). In entrambi questi periodi non vi è nessuna evidenza sperimentale del verificarsi di eventi LP e/o tremore vulcanico.

Dopo questo secondo episodio, il bradisismo ha invertito la tendenza con un lento abbassamento del suolo, interrotto da brevi (settimane) e poco intensi momenti di sollevamento, generalmente accompagnati da attività sismica (eventi VT) di bassa energia. I terremoti, pur se di bassa energia, sono in alcuni casi avvertiti dalla popolazione a causa della piccola profondità alla quale si originano (1-2 km). Questi brevi eventi di sollevamento dal 2000 sono diventati più persistenti ed intensi e connessi con sciame sismici. Infatti, episodi di sollevamento si sono verificati nel 2000 e poi nel 2005-06, 2008-09 e 2011-12 accompagnati da brevi sciame sismici di bassa energia, principalmente costituiti da eventi VT, ma in alcuni casi, per esempio nel luglio 2000 e nell'ottobre 2006, anche da eventi LP localizzati nell'area della Solfatara e zone circostanti, in particolare verso Pisciarelli [5]. L'individuazione di questi eventi LP è senz'altro dovuta

anche al miglioramento delle capacità di osservazione ed analisi sviluppate negli ultimi anni; in ogni caso, un'analisi retrospettiva sulle registrazioni sismiche degli anni passati, ha evidenziato alcuni eventi LP anche in altre fasi precedenti di lieve sollevamento del suolo [6].

In definitiva, negli ultimi trent'anni nei Campi Flegrei i segnali sismici che vengono rilevati sono essenzialmente costituiti da eventi VT ed in misura minore da eventi LP. Queste caratteristiche della sismicità tendono ad evidenziare come ai Campi Flegrei gioca un ruolo fondamentale la dinamica del sistema idrotermale. Infatti, essa definisce l'interazione dei fluidi con le rocce circostanti nella generazione dei segnali sismici sia di tipo LP, dovuti alle variazioni della pressione di poro per la migrazione di fluidi attraverso le fratture, sia di tipo VT, a causa della riduzione della resistenza al taglio delle rocce a seguito della diffusione di fluidi nelle rocce.

## Bibliografia

1. McNutt S.R. (2005). Volcanic seismology. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 32, 461-91, doi: 10.1146/annurev.earth.33.092203.122459.
2. Chouet B.A. (2003). Volcano seismology. *Pure appl. geophys.*, 160, 739-788.
3. Chouet B.A. (1996). Long-period volcano seismicity: its source and use in eruption forecasting. *Nature*, 380, 309-316.
4. Scandone R.,
5. Saccorotti G., Petrosino S., Bianco F., Castellano M., Galluzzo D., La Rocca M., Del Pezzo E., Zaccarelli L., Cusano P. (2007). Seismicity associated with the 2004-2006 renewed ground uplift at Campi Flegrei Caldera. *Italy. Phys. Earth Planet. Inter.*, 165, 14-24.
6. D'Auria L., F. Giudicepietro, I. Aquino, G. Borriello, C. Del Gaudio, D. Lo Bascio, M. Martini, G. P. Ricciardi, P. Ricciolino, C. Ricco (2011). Repeated fluid-transfer episodes as a mechanism for the recent dynamics of Campi Flegrei caldera (1989-2010). *J. Geophys. Res.*, 116, B4, doi: 10.1029/2010JB007837.