

Il rischio eruzione nei Campi Flegrei

I lenti movimenti verticali che periodicamente si verificano nell'area dei Campi Flegrei, e che fanno registrare il massimo sollevamento a Pozzuoli, sono indicati con la parola bradisismo – termine che in greco significa «movimento lento» – un fenomeno legato al vulcanismo, non molto diffuso nella regione del Mediterraneo ma noto sin dall'epoca romana. Consiste in un periodico abbassamento o innalzamento del livello del suolo che normalmente è dell'ordine di un centimetro all'anno: un movimento relativamente lento sulla scala dei tempi umani, ma decisamente veloce rispetto ai tempi geologici.

Il bradisismo è un fenomeno ampiamente studiato. Le prime ricerche in materia sono state condotte da diversi ricercatori nei secoli passati. In particolare Antonio Parascandola, nel 1947, riuscì a ricostruire la storia dei movimenti secolari del suolo nei Campi Flegrei attraverso lo studio dei fori lasciati dai molluschi marini della specie *Lithodomus lithophagus* sulle colonne del Tempio di Serapide a Pozzuoli, le cui basi nei periodi di abbassamento vengono sommerse dalle acque marine.

Il sollevamento del suolo per effetto del bradisismo è stato più intenso nel 1538 e nei periodi compresi tra il 1970 e il 1972 e tra il 1982 e il 1984. Solo nel 1538, dopo un sollevamento del suolo di circa 7 metri, il fenomeno culminò con l'eruzione del Monte Nuovo, ma altri eventi bradisismici hanno interessato i Campi Flegrei prima di quella data. Le datazioni effettuate sulle colonne del Tempio di Serapide con il metodo del carbonio-14 indicano che ve ne sono stati almeno altri due: il primo durante il V secolo d.C., con un sollevamento di circa 7 metri, e il secondo all'inizio del Medioevo. Dopo il 1538 il bradisismo si è manifestato di nuovo nel 1970-1972, con un sollevamento del suolo di un metro, seguito da una subsidenza di 30 centimetri, e nel 1982-1984 con un sollevamento di 1,8 metri. Episodi di minore intensità si sono avuti poi nel 1988-1989, 1993-1994 e 2000-2001 (si

di Benedetto De Vivo,
Annamaria Lima,
Robert J. Bodnar,
Alfonsa Milia
e Frank J. Spera

Secondo un recente modello
che descrive il bradisismo nella zona
di Pozzuoli, il pericolo di eruzioni
vulcaniche nell'area fortemente
antropizzata dei Campi Flegrei
è il più basso da centinaia di anni

IN SINTESI

- Il fenomeno del bradisismo che si verifica nei Campi Flegrei, cioè il periodico innalzamento e abbassamento del livello del suolo, è ampiamente studiato dal punto di vista fenomenologico.
- La causa del bradisismo è però ancora controversa. E la possibilità di capire a fondo la dinamica del fenomeno è fondamentale per la valutazione del rischio in un'area ad alta densità abitativa come quella dei Campi Flegrei.
- Gli autori hanno proposto un modello basato su una complessa interazione tra magmi e fluidi idrotermali, secondo il quale la probabilità di un'eruzione nell'area è, al momento, molto bassa.

vedano i grafici nella pagina a fronte). Attualmente, dal 2007, i Campi Flegrei sono entrati in una nuova fase di bradisismo di piccola entità.

Nel triennio 1982-1984, sulla base di valutazioni del rischio, 30.000 persone furono evacuate da Pozzuoli e successivamente alloggiate nell'insediamento appositamente allestito di Monte Ruscello, a circa tre chilometri di distanza dalla città, sempre all'interno della caldera dei Campi Flegrei. Il sollevamento del 1982-1984, così come gli altri della storia recente dell'area, non ha causato nessuna eruzione, ma ha determinato grosse «incertezze» riguardo le misure da adottare per la salvaguardia della popolazione.

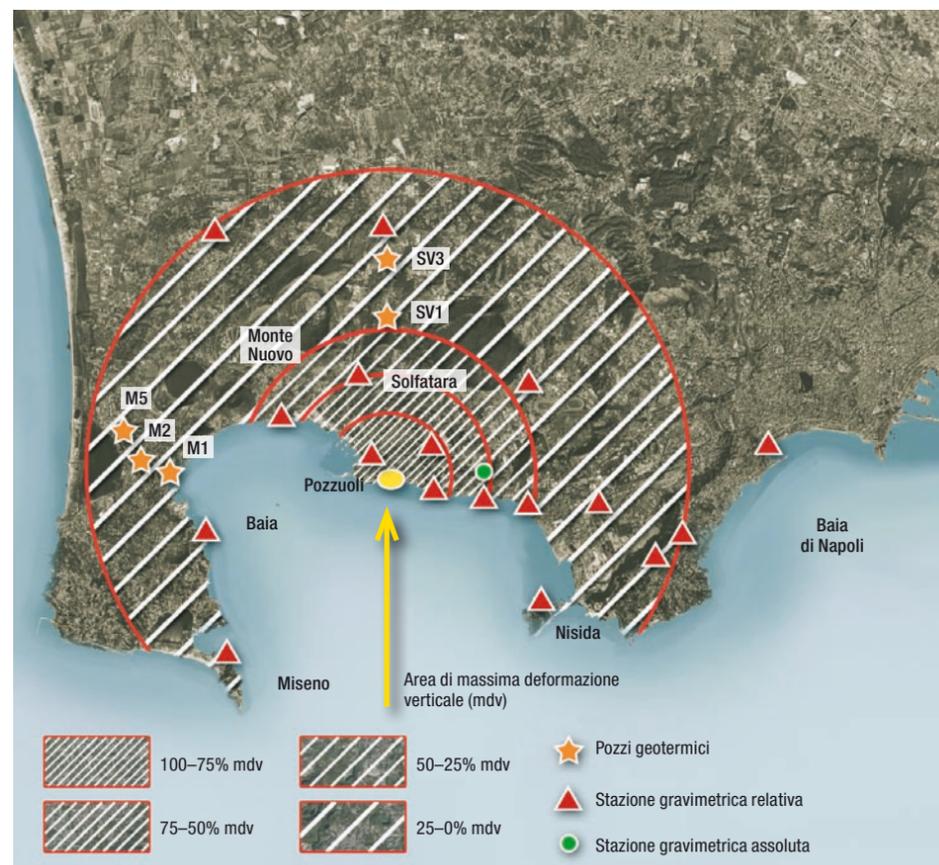
Sebbene sia stato studiato così a lungo e nei dettagli sotto il profilo fenomenologico, la causa del bradisismo è molto controversa, e comporta notevoli implicazioni per la valutazione del rischio in un'area ormai fortemente antropizzata come i Campi Flegrei. È chiara quindi l'esigenza di capire al meglio le possibili conseguenze del bradisismo, soprattutto per ragioni di protezione civile. Il modello che illustriamo in questo articolo vuole dare un contributo in questa direzione.

Il sistema dei Campi Flegrei

Il fenomeno del bradisismo nei Campi Flegrei è stato spiegato, tra gli anni settanta e gli anni ottanta, con un meccanismo secondo il quale un'intrusione di magma a profondità superficiale causerebbe la spinta del suolo verso l'alto, e più recentemente con altri meccanismi fluido-dinamici che comunque comportano l'intrusione di nuovo magma nel sistema. Molti dei modelli proposti riescono a giustificare il fenomeno della risalita del suolo in maniera più o meno convincente, ma non spiegano la subsidenza - ovvero il periodico affondamento del suolo stesso - quando al fenomeno non è associata un'eruzione.

Inoltre, i modelli messi in campo per spiegare il fenomeno nei Campi Flegrei dovrebbero essere compatibili con situazioni geologiche analoghe osservate in altre regioni del globo, come per esempio a Rabaul nella Nuova Guinea, a Long Valley in California e nello Yellowstone National Park, nel Wyoming. Qui, in particolare, è stato dimostrato con studi dettagliati che agli episodi di sollevamento non seguono di norma le eruzioni.

Il modello proposto per i Campi Flegrei viene assimilato, in ossequio al principio base della geologia - il principio dell'attualismo di Carl Lyell - al processo che alla fine del Terziario (circa 60 milioni di anni fa), ha portato alla formazione dei giacimenti, noti in letteratura come *porphyry copper* (sistemi con mineralizzazioni, a basso tenore di ra-

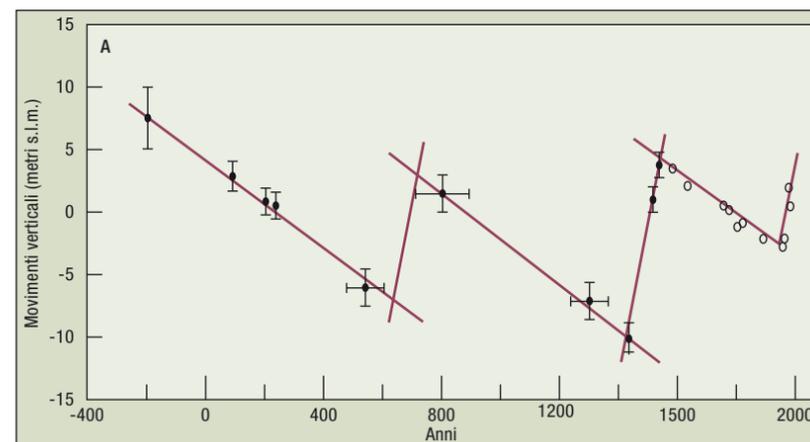


IL SISTEMA VULCANICO dei Campi Flegrei è qui rappresentato con l'indicazione dell'area di massimo sollevamento centrata in Pozzuoli (che corrisponde all'ubicazione del Tempio di Serapide), del Monte Nuovo e dei pozzi geotermici di Mofete (M1, M2, M3) e San Vito (SV1 e SV2).

me e molibdeno, diffuse in rocce sub-vulcaniche), che costellano la catena andina. In breve, quanto si verifica attualmente in profondità nei Campi Flegrei non rappresenta altro che una moderna espressione di un fenomeno geologico frequentissimo nelle epoche geologiche passate.

Molte informazioni sul sistema profondo dei Campi Flegrei sono state ottenute dallo studio delle carote dei pozzi Mofete (M1, M2 e M3) e San Vito (SV1, SV3) eseguiti nel 1978 dall'AGIP-ENEL per l'esplorazione geotermica (si veda la mappa qui sopra), e dallo studio delle inclusioni fluide (goccioline di fluido circolante nel sistema sub-vulcanico, che restano intrappolate nelle cavità dei cristalli dei minerali durante la loro crescita; rappresentano un'incredibile testimonianza delle condizioni chimico-fisiche del sistema profondo) presenti nei minerali delle rocce carotate, formati a differenti profondità, e in cristalli di feldspato di noduli sub-vulcanici rinvenuti nei prodotti esplosivi dei Campi Flegrei. Da questi studi si evince che l'area è interessata da un campo geotermico profondo con la prevalenza di fluidi ipersalini, chiamati anche salamoie. Questi fluidi sono confinati in serbatoi multipli e distinti per composizione e temperatura (si veda il box a pp. 100-101). Queste

Disegno di Stefano Carrara su indicazione degli autori; modificato da Modeling of hydrothermal fluid circulation and gravity signals at the Phlegrean Fields caldera, di Todisco G., in «Earth and Planetary Science Letters», Vol. 240, pp. 328-338, 2005.



caratteristiche comportano l'esistenza di più livelli impermeabili, con bassa trasmissività, che impediscono ai fluidi più superficiali di mescolarsi con quelli più profondi e viceversa.

La presenza di salamoie stratificate, sotto forma di serbatoi a differente salinità e le informazioni ottenute dallo studio delle inclusioni fluide e delle inclusioni magmatiche ci hanno portato ad assimilare il sistema dei Campi Flegrei a quelli mineralizzati tipo porphyry copper.

La successione stratigrafica dei Campi Flegrei è

IL MERCATO ROMANO DI SERAPIDE a Pozzuoli (in alto, a sinistra durante i periodi di sollevamento e a destra di subsidenza). Le aree scure delle tre colonne contengono i fori lasciati dai litodomi quando le colonne, in passato, erano sotto il livello del mare. Qui sopra, un grafico dei movimenti verticali del tempio negli ultimi 2400 anni e i movimenti verticali del suolo registrati nella baia di Pozzuoli dal 1969 al 2006.

abbastanza ben dettagliata sulla base dei dati ricavati dalle carote dei pozzi geotermici San Vito e Mofete, dagli studi sismici e da dati geologico-strutturali. Le caratteristiche litologiche della successione stratigrafica (si veda il box a pp. 100-101) dei Campi Flegrei definiscono livelli di permeabilità molto variabili. La struttura tettonica e la permeabilità degli strati sono elementi importanti per il modello di bradisismo che si propone. Nei Campi Flegrei, infatti, il sollevamento maggiore è stato registrato in prossimità di Pozzuoli in corrispondenza dell'apice di una piega anticlinale (cioè una curvatura degli strati rocciosi che hanno la convessità rivolta verso l'alto), espressione di un regime tettonico compressivo attivo localizzato nell'area.

Questa struttura geologica favorisce senz'altro un modello che implica la presenza di fluidi sotto pressione. In un regime tettonico distensivo invece, il sistema di fratturazione aumenta la permeabilità verticale e, di conseguenza, il rilascio di fluidi. Inoltre la presenza di uno strato termometamorfico al di sotto di 2 chilometri, riscontrato nei sondaggi di Mofete e San Vito, suggerisce che nel passato il magma si doveva trovare a una profondità più superficiale (4-5 chilometri) rispetto a quella attuale (più di 6 chilometri).

Una complessa dinamica tra magmi e fluidi idrotermali

Per spiegare il bradisismo registrato nell'area dei Campi Flegrei, abbiamo usato come riferimento il modello sviluppato negli anni settanta da Wayne Burnham, della Pennsylvania State University, e da altri ricercatori per la formazione dei depositi minerali tipo porphyry copper. Il modello di Burnham ha costituito, in quel periodo, la base teorica per la ricerca e lo sfruttamento delle enormi miniere a cielo aperto di rame e molibdeno che corrono lungo la catena andina dal Cile fino alla Bolivia. Questi sistemi mineralizzati, sviluppati in diverse ere geologiche, si rinvengono in varie

4500 anni di attività sotto la superficie

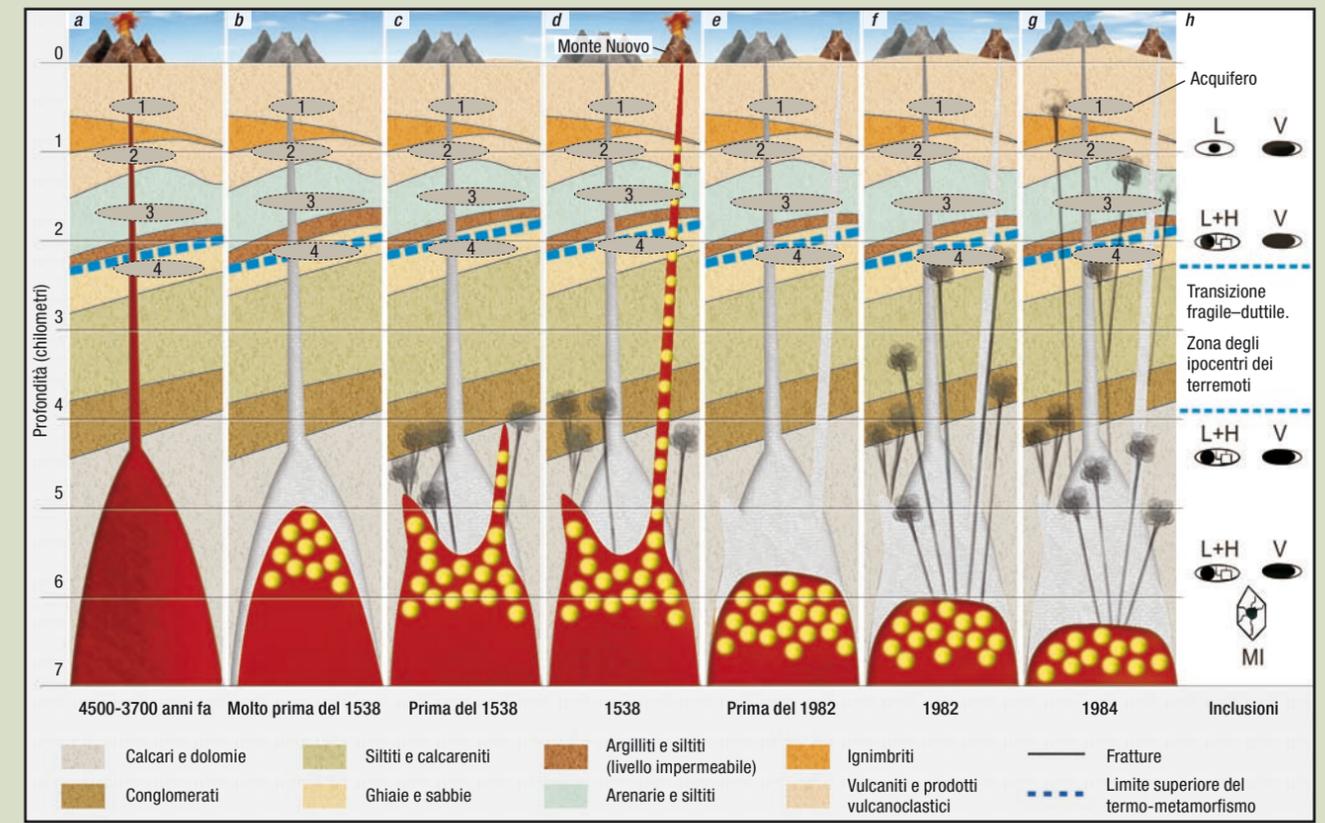
L'attività magmatico-idrotermale profonda ai Campi Flegrei negli ultimi 4500 anni circa può essere schematizzata come nei disegni a fronte, dove sono indicati anche la stratigrafia e i serbatoi d'acqua a salinità e temperature variabili rinvenuti attraverso i sondaggi eseguiti dall'AGIP-ENEL per l'esplorazione geotermica.

L'ultimo periodo di intensa attività vulcanica si è registrato tra 4500 e 3700 anni fa (a). Nel periodo compreso fra 3700 anni fa e l'eruzione del Monte Nuovo nel 1538 d.C. (b), il magma, inizialmente sottosaturato in volatili, si raffredda lentamente: cristallizzano minerali anidri, e inizia a svilupparsi un carapace saturo in acqua (composto di cristalli + melt + fluidi salini e vapore), al di sotto del guscio impermeabile alla sommità e lungo i fianchi del corpo magmatico, che isola il magma rispetto alle rocce sovraciocenti. In questo contesto si trovano testimonianze, attraverso le inclusioni fluide di intrappolamento simultaneo, di fluidi ipersalini, vapore e melt (h). Poco prima dell'eruzione del 1538 (c) il carapace che si è sviluppato, unitamente allo strato impermeabile che lo circonda, si frattura, consentendo al magma e ai fluidi di sfuggire. L'eruzione del Monte Nuovo del 1538 (d) è dovuta a un fluido magmatico che, attraverso una frattura, è riuscito a penetrare un acquifero superficiale, innescando un'eruzione inizialmente idromagmatica e successivamente freatomagmatica. Dopo l'eruzione del 1538 (e) il magma viene isolato, e il sistema si chiude nuovamente ai fluidi magmatici.

Nel 1982 (f) il sistema magmatico profondo si apre ai fluidi che comunque vengono trattenuti dallo strato impermeabile più superficiale, posto a 2-3 chilometri di profondità e composto da argilliti e siltiti, dando inizio al processo

di sollevamento. Lo strato impermeabile a 2-3 chilometri si frattura (g), permettendo una completa connettività tra l'ambiente magmatico profondo e gli acquiferi superficiali. Il sollevamento del suolo cessa e inizia la deflazione. La cristallizzazione del magma e la precipitazione dei minerali dai fluidi depressurizzati producono la risigillatura del corpo magmatico per produrre di nuovo un sistema chiuso. A questo punto il corpo magmatico ritorna nelle condizioni originarie prima che si verificasse la fatturazione, tranne per la circostanza che il carapace esterno saturo in acqua è migrato nel frattempo a profondità maggiore rispetto alla posizione di partenza. Ulteriore cristallizzazione produce fluidi magmatici nella porzione superiore del corpo magmatico, determinando un incremento di pressione e poi una riattivazione del processo già precedentemente attivo.

Le inclusioni intrappolate nei minerali (h) rivelano l'ambiente in cui si sono formati i cristalli che le contengono. Le inclusioni magmatiche (MI) idrosaline (L+H) e a vapore dominante sono presenti in cristalli che si formano a pressioni litostatiche (dominio plastico) e intrappolano fluidi sprigionati dal magma in via di cristallizzazione. Le inclusioni a liquido dominante (L), molto saline (salamoie), insieme alle inclusioni a vapore dominante (V), possono essere intrappolate nella zona di transizione dal dominio plastico al dominio fragile (vapore + fluidi ipersalini/salamoie). Le inclusioni intrappolate nei cristalli che si formano nel dominio idrostatico sono a liquido dominante con salinità da moderata a molto diluita. Se queste ultime coesistono con inclusioni a vapore dominante, con temperature di omogeneizzazione simili, significa che hanno intrappolato un fluido acquoso in ebollizione.



Nell'area dei Campi Flegrei, le eruzioni associate al sollevamento del suolo sono rare

aree della Terra caratterizzate dallo stesso regime tettonico delle Ande.

Si formano - in ambiente tettonico di placche convergenti - in seguito alla messa in posto di intrusioni magmatiche a bassa profondità (inferiore ai dieci chilometri) che, per effetto del graduale raffreddamento e della conseguente cristallizzazione, essolvono fluidi di origine magmatica - praticamente dal magma si separa un fluido acquoso salino - che entrano a far parte dei fluidi idrotermali superficiali (formati da acque di origine meteorica e/o marina) dando origine al sistema denominato «magmatico-idrotermale». A mano a mano che questi sistemi evolvono, a testimonianza dei processi che operano, i minerali che si vanno formando a differenti condizioni di pressione e temperatura intrappolano goccioline di fluidi silicatici e acquosi (sotto forma di inclusioni sia fluide che magmatiche) con caratteristiche peculiari dell'ambiente di formazione.

Il sistema magmatico profondo dei Campi Flegrei, così come è stato dimostrato per l'apparato vulcanico di White Island, in Nuova Zelanda, rappresenterebbe quindi un'espressione attuale di un fenomeno che è stato frequentissimo in epoche geologiche passate, anche se ai Campi Flegrei non ci



COME AI CAMPI FLEGREI, in molte altre località della Terra si manifestano fenomeni bradisismici. La più famosa è probabilmente lo Yellowstone National Park, nel Wyoming, il primo parco nazionale del mondo, istituito nel 1872.

sono mineralizzazioni importanti ma solo limitate deposizioni di galena, sfalerite, pirrotina, pirite, arsenopirite ed ematite in piccole fratture.

Ai Campi Flegrei, come nei porphyry copper, lo stadio iniziale dell'evoluzione del sistema, che richiede un arco di tempo dell'ordine di decine o centinaia di migliaia di anni, comporta un'intrusione di magma sottosaturato in acqua che staziona in condizioni sub-vulcaniche e cristallizza lentamente per effetto del raffreddamento (si veda la prima figura nel box a p. 102). In questa prima fase, il sistema è aperto rispetto ai componenti volatili (quali H₂O, CO₂, Cl, S e altri), ma nel tempo, e con il progredire della cristallizzazione di fasi anidre, alla sommità del corpo intrusivo (il magma) si sviluppa uno strato cristallino impermeabile che porta all'isolamento del magma sottostante rispetto alle rocce sovrastanti. Il sistema si chiude rispetto ai volatili, e solo il calore si disperde per conduzione.

Il fronte della cristallizzazione migra gradualmente e lentamente verso il basso, il magma si satura in acqua e si determina lo sviluppo, alla sommità del corpo magmatico intrusivo e immediatamente sotto lo strato impermeabile cristallino, di un carapace composto di cristalli, liquido silicatico (magma/melt) e fluidi magmatici (acque sali-

ne/salamoie e vapore). Tra lo strato impermeabile cristallino, che funge da barriera rispetto ai fluidi magmatici, e lo strato impermeabile più superficiale è presente una zona di transizione che separa il dominio litostatico (chiuso), a comportamento plastico, dal sovrastante dominio idrostatico (sistema idrotermale, aperto), nel quale i fluidi circolano liberamente e le rocce si deformano in modo fragile (si veda la prima figura nel box a p. 102).

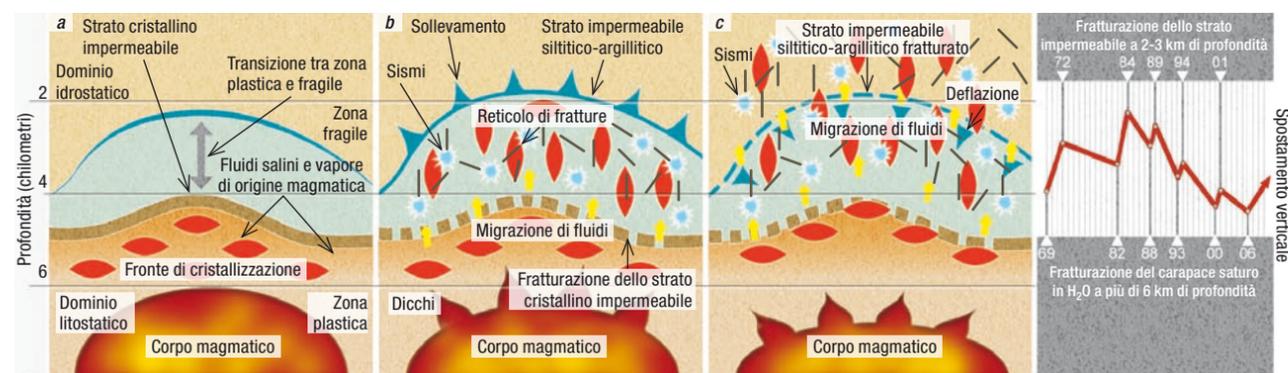
L'essoluzione di volatili (espressi per semplicità come acqua) da magmi idrati in via di cristallizzazione, in un sistema «chiuso» può essere esemplificata dalla reazione: *magma idrato* → *cristalli anidri + H₂O*. Questa reazione produce elevate sovrappressioni, in quanto comporta una variazione positiva di volume, a causa della differenza tra il volume molare parziale di acqua disciolto nel magma rispetto al volume molare di acqua esistente come fase separata, a condizioni di pressione e temperatura magmatiche.

L'energia meccanica rilasciata nella reazione può essere considerevole. Da calcoli termodinamici quantitativi, eseguiti per testare il modello sviluppato per i Campi Flegrei, il massimo sollevamento che si può ottenere è dell'ordine dei 40 metri: ben superiore quindi al massimo sollevamento registrato, di

GLI AUTORI

BENEDETTO DE VIVO è professore ordinario di geochimica all'Università «Federico II» di Napoli e *adjunct professor* presso Virginia Tech. Nel 2001 è stato nominato *fellows* della Mineralogical Society of America. È *Chief Editor* di «Journal of Geochemical Exploration». **ANNAMARIA LIMA** è professore associato di geochimica all'Università «Federico II» di Napoli. Si occupa di prospezioni geochimiche, geochimica ambientale e studio delle inclusioni fluide e silicatiche nei minerali. **ROBERT J. BODNAR** è C.C. Garvin Professor di geochimica al Virginia Tech. Le sue ricerche riguardano le proprietà e il ruolo dei fluidi in diversi ambienti geologici. **ALFONSA MILIA** è ricercatrice presso l'IAMC-CNR di Napoli. Si occupa di analisi dei bacini sedimentari e relazioni tra sedimentazione, tettonica e vulcanismo nel margine tirrenico. **FRANK J. SPERA** insegna scienze terrestri e planetarie all'Università della California a Santa Barbara. Le sue ricerche riguardano fluidodinamica e termodinamica dei processi magmatici.

Quando Pozzuoli si solleva



Sistema magmatico-idrotermale dei Campi Flegrei in lento raffreddamento e autosigillato rispetto ai fluidi che essolvono dal magma. Quando lo strato cristallino impermeabile che circonda il sistema magmatico si frattura (b), i fluidi di origine magmatica situati più in profondità migrano nella zona di transizione (fra dominio litostatico e idrostatico) sottostante lo strato impermeabile più superficiale, causando il sollevamento del suolo e la crisi bradisismica. Il sistema magmatico profondo (a e b) è analogo a quello dei *porphyry copper*, e la sua evoluzione richiede tempi dell'ordine delle decine di migliaia di anni. Il fenomeno del bradisismo si manifesta in modo transitorio e in tempi brevi (b e c).

Il sollevamento del suolo si arresta e la subsidenza ha inizio (c) quando la fratturazione interessa lo strato impermeabile più superficiale, e i fluidi possono migrare nella regione a pressione idrostatica, mescolandosi con le acque meteoriche e marine che alimentano il sistema idrotermale superficiale. All'estrema destra, abbiamo tracciato una rappresentazione schematica degli spostamenti verticali registrati a Pozzuoli in funzione del tempo (sia lo spostamento verticale che il tempo indicano soltanto la direzione del movimento del suolo nei diversi periodi di tempo). Le frecce gialle indicano la fratturazione iniziale dello strato cristallino profondo e successivamente dello strato impermeabile più superficiale.

circa 7 metri, prima dell'eruzione del 1538. L'entità del sollevamento dipende naturalmente dalla capacità del sistema di trattenere i fluidi in modo più o meno efficace, cioè dalla sua permeabilità.

In sacche isolate di magma saturo in acqua che cristallizza sono possibili valori di sovrappressioni interne elevatissimi (fino a più di 500 megapascal). Nel caso dei Campi Flegrei, durante una fase bradisismica, questa sovrappressione porta alla fratturazione, in un primo momento, del guscio cristallino

impermeabile che separa il magma saturo in volatili rispetto alle rocce incassanti sovrastanti, e poi anche del livello siltitico-argillitico impermeabile più superficiale (si veda la figura nel box in alto). Il sistema può comunque fratturarsi per il verificarsi di altri eventi, quali l'arrivo di nuovo magma oppure per sismi anche a scala regionale.

Quale che sia il meccanismo che determina la «apertura» del sistema, contemporaneamente alla fratturazione, il magma degassa e si raffredda bru-



FUMAROLE NELLA CALDERA DI WHITE ISLAND. Quello dell'isola al largo della Bay of Plenty, in Nuova Zelanda, è un sistema vulcanico simile ai Campi Flegrei, che però – a differenza dell'area campana – presenta mineralizzazioni importanti.



no impermeabile profondo, mentre la fratturazione dello strato impermeabile più superficiale (tra 2 e 3 chilometri di profondità) segnerebbe la completa apertura del sistema e la fine della crisi, con l'inizio della subsidenza. I dati registrati ai Campi Flegrei evidenziano un'intensa attività fumarolica e idrotermale, concentrata nel cratere della Solfatarata, dove i flussi di CO₂ e H₂O aumentano durante il sollevamento e raggiungono il massimo subito dopo che inizia la deflazione (abbassamento del suolo), a testimonianza della avvenuta connettività tra il sistema più profondo e quello più superficiale.

Agli episodi di sollevamento, nei Campi Flegrei, è associata infatti un'attività sismica causata proprio da questi eventi di fratturazione. Durante l'episodio del triennio 1982-1984 sono state registrate più di 16.000 scosse sismiche, di magnitudo compresa tra 0,4 e 4,0.

Poche probabilità di eruzione

Nei Campi Flegrei, le eruzioni associate al sollevamento del suolo sono rare; l'unico caso documentato negli ultimi 2000 anni è stata l'eruzione del Monte Nuovo nel 1538, e forse un piccolo evento freatico (eruzione di acque, vapori, gas e fanghi bollenti) verificatosi nel 1198. Nel modello esposto, con il progredire del raffreddamento del magma in profondità, la probabilità che si verifichi un'eruzione nei Campi Flegrei diventa sempre più bassa, e oggi è la più bassa in assoluto negli ultimi 500 anni, e dovrebbe ancora diminuire nel tempo. Lo scenario può cambiare, e la possibilità di un evento eruttivo divenire probabile, se si dovesse registrare arrivo di nuovo magma da maggiori profondità, nella camera di alimentazione dei Campi Flegrei, situata a più di sei chilometri di profondità, e non a livelli molto superficiali come previsto da altri modelli.

Il modello da noi proposto per la spiegazione del bradisismo ha conseguenze significative rispetto agli scenari ipotizzati da molti ricercatori, che viceversa, applicando modelli che comportano il coinvolgimento del magma nel fenomeno della risalita del suolo, ipotizzano che, in occasione di ogni evento bradisismico, il rischio di un'eruzione ai Campi Flegrei sia molto elevato, benché non ci sia dimostrazione di arrivo di nuovo magma nella camera magmatica e benché sia stato dimostrato, con studi dettagliati, in situazioni geologiche analoghe a quella dei Campi Flegrei – per esempio a Rabaul nella Nuova Guinea, a Long Valley in California e nello Yellowstone National Park – che agli episodi di sollevamento del suolo non seguono di norma le eruzioni. Queste ultime costituiscono eventi assolutamente eccezionali. ■

scamente. In particolare la fratturazione e la conseguente brecciazione delle rocce determinano una decompressione dei fluidi che passano da un dominio a pressione litostatica a un dominio a pressione idrostatica, vanno in ebollizione (ed effervescenza), penetrano nella miriade di fratture, causano a loro volta fratturazione idraulica, determinando perdita di acqua e calore, fino a quando, per effetto della precipitazione sia di minerali come il quarzo che di mineralizzazioni, le fratture si «autosigillano». Analogamente, i fluidi associati ai sistemi mineralizzati tipo porphyry copper sono caratterizzati da ebollizione, elevate temperature (da 400 a 750 gradi Celsius) e salinità (salamoie: 30-60 per cento in peso di NaCl equivalente). Alla brecciazione è anche associata la messa in posto di piccole intrusioni magmatiche sotto forma di dicchi.

Quando il sistema magmatico si «autosigilla» torna allo stesso punto di partenza, tranne per il fatto che nel frattempo il carapace saturo in acqua, insieme al fronte di cristallizzazione, è migrato a maggiore profondità, come si vede confrontando la prima e l'ultima immagine del box a pp. 100-101.

Nell'area vulcanica dei Campi Flegrei gli eventi bradisismici sarebbero dunque la conseguenza di un processo che si esplica in due fasi distinte nel tempo: la prima, dell'ordine delle decine o centinaia di migliaia di anni, si riferisce all'evoluzione del sistema magmatico profondo; la seconda, di tipo transitorio, si riferisce a eventi ciclici (di sollevamento e abbassamento del suolo) sul breve periodo (da un anno a decine di anni) dovuti alla propagazione di una fratturazione episodica dello strato impermeabile superficiale che consente ai fluidi di passare dal dominio litostatico a quello idrostatico, fino a quando la connettività è impedita dalla deposizione di minerali di nuova formazione.

Come indicato nel disegno a fronte (c), il sollevamento del suolo durante la crisi bradisismica sarebbe innescato dalla fratturazione del guscio cristallino

BAIA A BASSO RISCHIO. Secondo il modello messo a punto dagli autori, la probabilità che si verifichi un'eruzione ai Campi Flegrei (nella foto, il porto di Pozzuoli) è oggi la più bassa degli ultimi 500 anni.

Letture

Thermodynamic model for uplift and deflation episodes (bradyseism) associated with magmatic-hydrothermal activity at the Campi Flegrei active volcanic center (Italy). Lima A. e altri, in «Earth Science Review», 2009. doi: 10.1016/j.earscirev.2009.10.001

Quantitative model for magma degassing and ground deformation (bradyseism) at Campi Flegrei, Italy: implications for future eruptions. Bodnar R.J. e altri, in «Geology», Vol. 35, pp. 791-794, 2007.

The Campi Flegrei caldera: unrest mechanisms and hazard. De Natale G. e altri, in *Mechanisms of activity and unrest at large calderas*, di Troise C., De Natale G. e Kilburn C.R.J. (a cura), Geological Society, London, Special Publications, 2006.

A hydrothermal model for ground movements (bradyseism) at Campi Flegrei, Italy. De Vivo B. e Lima A., in *Volcanism in the Campania Plain: Vesuvius, Campi Flegrei, Ignimbrites*, di De Vivo B. (a cura), «Developments in Volcanology», Elsevier, 2006.

Historical unrest at large calderas of the world. Newhall C.G. e Dzurisin D., in «U.S. Geological Survey Bulletin», 1988.

Frans Lanting/Corbis (White Island); Stefano Carrara, su indicazione degli autori (disegni)

Lars Halbauer/dpa/Corbis