

ENZO LOCARDI e SILVIA SIRCANA (*)

DISTRIBUZIONE DELL'URANIO E DEL TORIO NELLE VULCANITI QUATERNARIE ALCALINE DEL LAZIO SETTENTRIONALE

RIASSUNTO. — Si presentano e discutono i risultati di 180 determinazioni di U e di Th su rocce vulcaniche alcalino-potassiche del Lazio settentrionale. I campioni sono stati selezionati dopo un accurato studio sulla evoluzione vulcanologica e magmatologica dei vulcani più significativi. E' stato possibile seguire la distribuzione dell'U e del Th nei vari tipi e nelle varie fasi di differenziazione magmatica nei vulcani di Vico e di Latera in particolare, e nelle vulcaniti alcaline laziali a nord di Roma in generale (dai Sabatini ai Vulsini).

Le analisi sono state eseguite con metodo differenziale gamma; l'errore statistico è inferiore al 10%.

Ne è risultato che, nelle zone esaminate, i tenori in U e in Th sono eccezionali, e molto più alti di quelli segnalati in altre province magmatiche alcaline o in massicci granitici variamente differenziati. Gli istogrammi indicano infatti valori medi attorno alle 25 ppm U e 110 ppm Th, oltre ad una popolazione caratterizzata da valori medi di 45 ppm U e 210 ppm Th.

Una correlazione tra distribuzione dell'U e del Th ed i caratteri petrogenetici e vulcanologici, correlazione effettuata grazie ad una serie di analisi chimiche e petrografiche, ha rivelato la particolare dipendenza della distribuzione di questi due elementi con i diversi processi di differenziazione magmatica e con alcune particolari situazioni vulcanologiche. Tale dipendenza è evidenziata anche da rapporti dell'U e del Th col K; infatti tali rapporti, lineari e normali per quanto riguarda i diversi prodotti della differenziazione magmatica dominante, assumono un carattere anomalo per eccesso di elementi radioattivi nelle rocce relative a porzioni apicali di serbatoio magmatico, che hanno subito influenze particolari. Su questi dati si discute la stretta relazione dell'U e del Th con i diversi equilibri dei gas.

ABSTRACT. — Results of 180 analyses of U and Th of alkali-potassic volcanic rocks of Northern Latium are listed and discussed. The samples examined have been selected after a detailed study on the volcanological and magmatological evolution of the volcanic area.

(*) Laboratorio Geominerario del C.N.E.N., C.S.N. Casaccia (Roma).

E. LOCARDI: per la parte geologica.

S. SIRCANA: per la parte analitica e di elaborazione dei dati.

It has been possible to follow the distribution of U and Th in the different trends and in the different stages of magmatic differentiation, particularly in Vico and Latera volcanoes, and generally in volcanic alkalie rocks of Northern Latium (from Sabatini to Vulsini system).

Analyses have been carried out with gamma-ray spectrometry; «standard error» is less than 10%.

The results are that, in the examined area, the U and Th values are exceptional and much higher of those already listed in other alkalie magmatic provinces or in variously differentiated granites.

The histograms show, indeed, main values around 25 ppm in U and 110 ppm in Th, and the existence of a population characterized by main values of 45 ppm in U and 210 ppm in Th.

Correlation between the distribution of U and Th and the petrogenetic and volcanologic characters, correlation that has been arranged with a lot of chemical and petrographic analyses, has showed the particular dependence of the distribution of radioactive elements with the different magmatic differentiation processes and with particular volcanologic situations. The above dependence is also pointed out by ratios between U and Th with K; in effect these ratios, linear and normal for what it concerns the different products of the main magmatic differentiation, become anomalous for an excess of radioactive elements in the rocks related to the summit levels of magmatic chambers, that have been submitted to a particular differentiation.

On these data the close relations between U and Th on one side and the different gas equilibria on the other are discussed.

PREMESSA.

Già agli inizi delle ricerche uranifere in Italia (1956) vennero prese in considerazione le vulcaniti potassiche del Lazio settentrionale (fig. 1). Tale scelta era consigliata dalla conoscenza generica dell'arricchimento in U e in Th nelle rocce alcaline, ed era confortata da varie segnalazioni di minerali radioattivi quali costituenti abituali delle sabbie litoranee derivate dal disfacimento di queste vulcaniti (BONATTI, 1950-1955; BLANC, 1908; GOTTARDI, 1952; GOTTARDI e MITTEMPERGER, 1955-1956).

Furono condotte prospezioni radiometriche su buona parte del territorio, e vennero esaminate in dettaglio le zone anomale. Una di queste fu oggetto di studi particolareggiati da parte di diversi ricercatori (ALBERTI, BETTINALI e SALVETTI, 1958; ALBERTI, BETTINALI, GRASSINI e SILVESTRO, 1960; ANCARANI e BETTINALI, 1960; CAGLIOTI, BETTINALI, GIARDINI-GUIDONI e MELE, 1962; LOCARDI, MITTEMPERGER, TEDESCO, 1962).

In un secondo tempo si è ritenuto opportuno riproporre il problema delle possibilità uranifere e torifere delle vulcaniti alcaline applicando metodi di ricerca geochimica. Questi riguardavano sia lo studio idrogeochimico delle acque superficiali del Lazio (DALL'AGLIO e TONANI, 1962), sia la distribuzione dell'U e del Th nelle vulcaniti stesse.

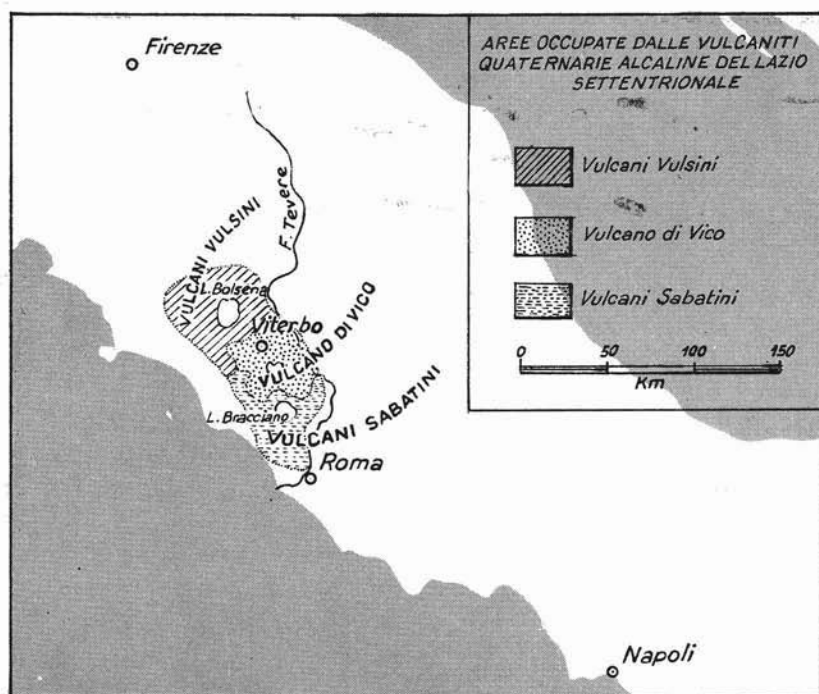


Fig. 1.

Lo studio della distribuzione geochimica dell'U e Th si è pro-
tratto per tre anni. Questo per soddisfare le finalità più vaste che la
ricerca si proponeva, e per le difficoltà incontrate nell'adottare nuove
e rapide tecniche di analisi.

La bibliografia dell'U e Th è ricca di dati sulla distribuzione di
questi elementi nelle rocce e nei singoli minerali delle rocce. Tali cono-
scenze si limitano però principalmente ai graniti. Negli ultimi anni,
specie dalla letteratura russa, si hanno anche notizie riguardanti plu-
toniti alcaline. I dati sulla distribuzione non vengono però accompa-

gnati da sufficienti notizie sulla geologia e petrologia di questi massicci cristallini, per cui non si è segnato un gran progresso nella conoscenza del comportamento dell'U e Th nel corso della cristallizzazione magmatica, comportamento che può essere variabile a seconda delle diverse condizioni magmatologiche nel cui contesto la cristallizzazione avviene. Da sottolineare inoltre che l'interpretazione dei dati su plutoniti di questo tipo è complicata dagli effetti di tutti quei processi che accompagnano la roccia nelle sue fasi finali e tardive di cristallizzazione, e che si riflettono in una ridistribuzione dell'uranio.

Ancora minori notizie si hanno sulla distribuzione dell'U e Th in magmi basici, e specie in quelli alcalini. A questo riguardo sono da segnalare alcuni lavori (HEIER e RODGERS, 1963; HEIER, Mc DOUGALL e ADAMS, 1964; HEIER, COMPSTON, Mc DOUGALL, 1965) che trattano della distribuzione dell'U, Th e K in lave basaltiche di diverso tipo e provenienza. Anche se lo scopo dei lavori è magmatologico, riguardando l'unitarietà di composizione e di origine dei magmi subcrostali, se ne traggono notizie fondamentali sulla distribuzione di questi elementi in magmi appartenenti a vari ambienti profondi.

Il distretto vulcanico laziale si presta bene ad uno studio meno generalizzato della distribuzione dell'U e del Th in diverse condizioni di profondità e di tipo di serbatoio magmatico, ed in diverse fasi di differenziazione del fuso. A questo scopo e per attribuire fruttuosamente i dati quantitativi degli elementi cercati, il campionamento è stato preceduto da uno studio geologico di dettaglio.

Data la vastità della zona vulcanica del Lazio settentrionale (circa 4400 kmq), si è preferito concentrare lo studio su uno dei principali vulcani del distretto, curando la ricostruzione stratigrafica dei prodotti emessi e la loro genesi, sia come meccanica di messa in posto, sia come ricostruzione delle condizioni geologiche e chimico-fisiche del magma prima delle eruzioni. Il vulcano scelto è quello di Vico, ben conservato e altamente indicativo per il volume di magma emesso. I risultati geologico-petrografici sono stati pubblicati a parte (LOCARDI, 1965).

Dalle formazioni litologiche principali del vulcano di Vico sono stati prelevati campioni con frequenza sufficiente ad ottenere delle curve di distribuzione degli elementi radioattivi. Pure accurato è stato lo studio geologico del vulcano di Latera, rappresentativo dei vulcani Vulsini. Il campionamento è stato qui limitato ad un numero di campioni sufficiente ad appurare lo scarto dei valori rispetto a quelli del Vico.

Grossolano è stato invece l'esame dei vulcani Sabatini, dei quali a tutt'oggi si hanno scarse e incomplete notizie geologiche.

Il presente lavoro si propone, oltre alla definizione della quantità di U e Th nelle vulcaniti alcaline del Lazio settentrionale, di analizzare le condizioni che determinano l'arricchimento di questi elementi nei tipi magmatici più rappresentati nella regione. Definito l'ambiente ed i processi più favorevoli ad accentramenti radioattivi, se ne potrà forse ottenere una guida indiretta alla ricerca dell'U e Th in altri tipi di vulcaniti alcaline. Finalità pratica di questo lavoro è l'identificazione ed il cubaggio delle formazioni più radioattive al fine di un eventuale sfruttamento minerario.

CENNI GEOLOGICI.

Il primo argomento da affrontare nello studio della distribuzione degli elementi è quello magmatologico. Va quindi inquadrato il tipo magmatico generale e, dall'esame dei diversi prodotti vulcanici, va ricercato il tipo di differenziazione. Si potranno successivamente analizzare le relazioni tra la distribuzione dell'U e Th ed il tipo magmatico, ed il significato che intercorre tra il tipo di differenziazione e l'arricchimento in elementi radioattivi.

E' comunemente riconosciuta la particolarità delle rocce alcaline ad arricchirsi in U e Th, oltre che in molti altri elementi rari di carattere litofilo e pneumatofilo. Tale arricchimento è variabile da provincia a provincia alcalina, e da tipo a tipo di roccia nella stessa provincia.

I nostri dati analitici non trovano riferimento in alcuna distribuzione « tipo » di U e Th di provincia alcalina. Questo consegue dalla scarshezza di dati bibliografici, o forse anche dalla assoluta particolarità delle rocce alcaline potassiche che stiamo trattando. Conviene quindi, dopo qualche considerazione generale, accennare ai caratteri geologico-petrografici del magmatismo potassico quaternario dell'Italia centrale.

Col termine « rocce alcaline » vengono comunemente compresi molti gruppi di rocce che in comune hanno la sottosaturazione in silice per eccesso di alcali. La vasta gamma di rocce alcaline raramente si dispone lungo la seriazione di un unico processo di differenziazione. Generalmente è la concomitanza di più processi di differenziazione a produrle, ed il prevalere dell'uno o dell'altro è condizionato dal particolare ambiente geologico nel quale il magma si trova a salire. E' rimar-

chevole che nonostante la grande varietà dei processi che interessano sia magmi basaltici primordiali, sia residui « granitici » di anatessi, sia fusi anatettici basici per dare prodotti finali alcalini, questi tendono ad essere preferenzialmente di tipo trachitico più o meno fonolitico (o sientico-monzonitico se si tratta di rocce intrusive). Tale generica convergenza nei rapporti tra i costituenti fondamentali della roccia non viene però riflessa da molti elementi minori, che caratterizzano talmente una provincia da venir ricercati quali elementi guida di una schiatta o di un ciclo magmatico. Ne risulta che, dal semplice riconoscimento del tipo petrografico della roccia alcalina non si può estrapolare l'ordine di grandezza del contenuto in U e Th.

Nel Lazio settentrionale il tipo magmatico più comune è quello trachitico a tendenza fonolitica. Come inquadramento negli schemi classici delle successioni magmatiche postorogenetiche, tali trachi-fonoliti potrebbero rientrare altrettanto bene tra i differenziati finali di magmi primari che si introducono nelle zone ormai rigide, come pure tra gli ultimi differenziati di magmi anatettici, o tra magmi anatettici di composizione particolare. Indipendentemente dall'origine, vogliamo considerare tale magma come il magma « fondamentale » della regione, concentrando l'attenzione sulle sue modificazioni nell'ambiente più superficiale e sull'influenza di queste nella distribuzione dell'U e Th.

La bibliografia geologica non offre alcun lavoro di sintesi che inquadri soddisfacentemente il particolare tipo di magmatismo. Si deve a BURRI (1961) un lavoro generale di sintesi magmatologica in Italia, a SCHNEIDER (1965) un lavoro petrochimico su un settore dei vulcani Vulsini, a SCHERILLO (1948) la ricostruzione della differenziazione magmatica nei vulcani Sabatini, a MARINELLI e MITTEMPERGER (1966) la nuova ipotesi genetica sui magmi « mediterranei », a RITTMANN (1963) gli studi specifici sui processi di differenziazione del magma vesuviano. Da questi autori si estrapola quanto segue.

Le vulcaniti potassiche del Lazio settentrionale appartengono al « vulcanismo finale » (provincia romana quaternaria) che si è sviluppato immediatamente dopo il « vulcanismo susseguente » della provincia toscana pliocenica e quaternaria. Il « vulcanismo susseguente » toscano (del quale ci sono propaggini del nord del Lazio) conclude il plutonismo sinorogenico e tardivo appenninico con effusioni di rioliti-riodaciti. Il « vulcanismo finale » ha prodotto invece lave sottosature, ossia trachiti e fonoliti leucitiche, tefriti leucitiche, accanto a trachiandesiti e

trachibasalti. La risalita di tali magmi è in relazione allo sprofondamento dello zoccolo « tirrenico », ed i diversi tipi litologici deriverebbero da differenziazione per cristallizzazione frazionata del magma trachibasaltico dopo una assimilazione di carbonati che ha determinato la forte desilicizzazione. Le rocce prive di leucite sarebbero derivate direttamente dal magma originario non desilicizzato e poco differenziato. Secondo SCHERILLO tale schema viene ulteriormente complicato da « differenziazione pneumatolitica ». MARINELLI e MITTEMPERGHER invece fanno derivare i magmi alcalini dai magmi anatectici alcali-calcici attraverso processi pneumatolitici particolari.

In Italia tali magmi vengono a giorno, a partire dai bordi settentrionali del Lazio, lungo tutto il versante tirrenico della penisola, ma solo a nord di Roma presentano i massimi tenori in elementi radioattivi. Limitiamo quindi per ora il problema ai gruppi vulcanici di Bolsena, Vico e Sabatini ed esaminiamoli con maggior dettaglio.

VULCANO DI VICO.

Geologia e petrogenesi.

Il vulcano di Vico sorge tra i vulcani Vulsini e quelli Sabatini, lungo il sistema di fessure che ha alimentato il vulcanismo del bordo appenninico. Esso è il più recente dei vulcani alcalini della zona ed è quindi relativamente ben conservato. La sua evoluzione si può così riassumere:

1ª fase: perforazione iniziale con emissione di tufi seguita da una lunga serie di effusioni laviche. Ne risulta un vulcano prevalentemente lavico, alto 1200 m e con un raggio di 10 km circa.

2ª fase: emissione di una grande quantità di magma che si è messo in posto con modalità da laviche a ignimbritiche. Nel corso di queste grandi effusioni è stata asportata la parte terminale del cono. Le ignimbriti si possono dividere in quattro gruppi principali che si sono effusi in tempi ben distinti. Le vulcaniti di questa fase sono il risultato della degassazione a giorno del magma: a seconda delle modalità di degassazione ne sono derivate rocce composte da pomici e ceneri variamente saldate, e rocce compatte, unitarie, di aspetto lavico. Il volume delle ignimbriti è di 15 kmc, il raggio di espansione è di 20-30 km corrispondente a 1250 kmq di territorio ricoperto.

3^a fase: sprofondamento della parte terminale del vulcano con formazione di una caldera di 7 x 6 km di diametro. Dalle fessure che limitano la caldera sono state emesse ceneri e scorie che si rinvennero in debole potenza sulle pendici più alte del rilievo.

4^a fase: innalzamento del Monte Venere, piccolo cono vulcanico sorto all'interno della caldera in posizione eccentrica.

In effetti quello di Vico è uno strato vulcano prevalentemente lavico coperto da espansioni ignimbritiche. L'attività effusiva si è espressa praticamente sempre dal condotto centrale. Tale vulcano non sembra peraltro collegato ad una sacca magmatica più o meno isolata dal serbatoio principale e quindi soggetta ad una differenziazione particolare in relazione alla sua profondità, forma, composizione delle rocce incassanti, ecc. Infatti, la gran massa dei prodotti effusivi del Vico sono quasi identici a quelli dei vulcani Vulsini, Sabatini e, più a sud, a quelli di Roccamonfina e dei Campi Flegrei. Tale coincidenza indica che il Vico rappresenta uno dei punti di fuoriuscita del magma « finale », le cui parti sommitali erano arrivate quasi allo stesso grado di differenziazione. Al contrario, le prime lave uscite, generalmente contaminate per assimilazione carbonatica, potrebbero essere derivate da situazioni di serbatoio magmatico analoghe a quelle del Vesuvio. Tali lave, molto leucitiche e basiche, si alternano a latiti sodiche con le quali mostrano talora dei termini di transizione. Le latiti sodiche sono l'unico tipo magmatico effuso nel Vico dal quale potrebbero derivare, in accordo alla petrogenesi, i successivi prodotti.

Faccio seguire uno schema di evoluzione magmatica che soddisfi tutti i dati di osservazione in nostro possesso ⁽¹⁾.

I magmi latitici che lentamente risalgono lungo le fessure limitanti l'arco appenninico vengono a contatto, nelle parti superiori della crosta, con rocce calcaree mesozoiche. Ha inizio così l'assimilazione di carbonati che desilicizza il magma, l'arricchisce indirettamente in alcali e direttamente in gas, e lo porta da tipi tefritici a tipi fonolitici, molto leucitici. A questo chimismo corrispondono le rocce che costituiscono gran parte del cono lavico del Vico.

⁽¹⁾ Per le analisi chimiche vedi LOCARDI, 1965; AMENDOLAGINE et al., 1963.

Successivamente si osserva una generica evoluzione verso tipi progressivamente più trachitici. Sembra pertanto che la parte apicale del magma, oltre agli effetti della sintesi carbonatica, risenta sempre di più gli effetti di una differenziazione complessa che comprende la differenziazione per cristallizzazione frazionata e la differenziazione pneumatolitica s.l. Si osserva di conseguenza una progressiva diminuzione dei componenti ferromagnesiaci e calcici.

La prima ignimbrite (A) segna, rispetto all'ultima grande manifestazione lavica (« petrisco »), una ulteriore evoluzione verso tipi più trachitici, mentre la gran massa effusa in un solo atto (1 kmc) e la diminuzione in numero e dimensione dei fenocristalli (20% della massa), indica una variazione delle condizioni chimico-fisiche del serbatoio magmatico. Le variazioni chimiche e mineralogiche della ignimbrite A riflettono inoltre l'influenza di una differenziazione apicale, essenzialmente pneumatolitica.

Con la seconda effusione ignimbritica (B) si mettono in posto rocce trachitiche di composizione uniforme, ad eccezione di piccole locali variazioni in silice che le portano a cavallo della saturazione. Questo tipo di magma può essere riferito ad uno stadio più avanzato dei processi di differenziazione che agivano nella parte sommitale del serbatoio magmatico prima della effusione della ignimbrite A. La sua quantità limitata (circa 0,2 kmc) e la costanza dei tipi chimici verso i termini più acidi, suggeriscono che durante l'eruzione della ignimbrite B il magma eruttibile si limitava alla frazione « leggera » del differenziato apicale.

Con la terza delle grandi effusioni (ignimbrite C) le condizioni cambiano ancora. Questa volta una porzione di 3 kmc di magma si riversa con una certa omogeneità di prodotti vulcanici e di composizione chimica. Il chimismo è intermedio tra quello della A e quello della B per molti caratteri; per altri è nettamente spostato verso tipi latitici. In questo caso non è stato rinvenuto alcun prodotto di differenziazione apicale del magma. Forse questi si sono dispersi nella gran massa successivamente uscita. La relativa costanza del tipo magmatico in tutti i tre kmc di fuso e la bassa cristallinità riscontrata (5-10%) sembrano peraltro riflettere meglio le condizioni di un magma meno evoluto dei precedenti.

L'ultima grande effusione (formazione D) ha carattere di ignimbrite con transizione a tufo. Tale aumento di esplosività può essere legato alle interferenze con lo sprofondamento della caldera. La composizione chimica varia da trachitica satura a leucit-fonolitica a tendenza tefritica. In particolare le trachiti della formazione D sono il differenziato più silico-alluminifero ed alcalino, ed il meno magnesiacco di tutti i prodotti vicani analizzati; la loro cristallinità ritorna ai valori osservati per le ignimbrite A e B. I tipi leucit-fonolitici hanno invece cristallinità più bassa e caratteri chimico-mineralogici prossimi a quelli della ignimbrite C. Restano così stabilite le testimonianze di una differenziazione apicale in corso.

In definitiva, i punti fondamentali della evoluzione magmatica del vulcano di Vico si possono riassumere come segue.

Un magma, di composizione genericamente latitica, si innalza lungo fessure regionali. Le sue parti sommitali sono soggette ad assimilazione di calcari e si trasformano in tefriti fonolitiche e fonoliti molto ricche in leucite. La parte fondamentale del magma tende intanto a differenziarsi verso latiti a tendenza trachitica sempre più spinta. Questo sviluppo è segnato indirettamente dai prodotti successivamente emessi, i quali però risentono di una differenziazione apicale che esalta la tendenza verso tipi fonolitici. La ignimbrite C rappresenta invece un prodotto intermedio dovuto al fondamentale processo di differenziazione che regola i magmi mediterranei, meno contaminato da implicazioni secondarie.

Campioni analizzati.

Della prima fase di attività vulcanica non sono state campionate le lave più basiche perchè al misuratore di campagna rivelavano un'attività troppo bassa da essere convenientemente misurata dalla strumentazione di laboratorio allora adottata. Abbiamo invece testimonianze pressochè continue dei principali prodotti emessi dalla fase medio-superiore del vulcano di lava alle fasi finali connesse allo sprofondamento della caldera. Pertanto, omesse le lave basiche leucititiche e latitiche, ho preso in considerazione le seguenti formazioni che elenco in ordine cronologico, dalle antiche alle recenti:

1) lave con fenocristalli di sanidino (chimismo variabile, tendenzialmente trachi-fonolitico): colate che compaiono saltuariamente nella porzione intermedia della serie lavica. Sono stati analizzati 7 campioni, dei quali 3 prelevati a diverse altezze di una singola colata;

2) lave a grossi fenocristalli di leucite (prev. leucit-fonoliti tefritiche): complesso molto rappresentato e caratteristico del vulcano di Vico. Sono stati analizzati 7 campioni, dei quali 2 appartenenti alla stessa colata;

3) lave a fenocristalli di leucite e sanidino - « petriscchi » (prev. leucit-fonoliti a minor tendenza tefritica): colate che coronano il ciclo lavico del vulcano di Vico. Sono stati analizzati 9 campioni dei quali 5 prelevati da una estesissima colata;

4) ignimbrite A (da leucit-fonoliti tefritiche acide a trachiti sature): 3 kmc di ceneri e pomici che si fanno sempre più unitarie, compatte e laviche verso il centro di effusione. I settori schiettamente ignimbritici corrispondono alla frazione magmatica più ricca in gas ed in cristalli leggeri; quelli più lavici microvescicolati (« foam-lavas ») alla frazione più profonda e degassata del magma effuso. Di questa formazione sono stati analizzati 29 campioni, dei quali 13 rappresentativi delle facies laviche microvescicolate, e 16 sono pomici delle facies ignimbritiche raccolte a tutte le distanze dal centro di emissione;

5) ignimbrite B (trachiti sature): 0,5 kmc di depositi di ceneri e pomici generalmente semicoerenti, talora invece molto compatti. Questa formazione comprende almeno tre colate principali che si sono succedute quasi in continuità. Sono stati analizzati 15 campioni rappresentativi delle diverse colate e delle diverse facies delle singole colate;

6) ignimbrite C (trachiti latitiche): 10 kmc di depositi di ceneri e pomici coerenti che sono stati effusi in tre fasi principali succedutesi quasi in continuità temporale. Durante la prima è stata messa in posto una coltre di 1 kmc, molto simile alla ignimbrite A come caratteristiche generali, per quanto in questo caso le facies laviche siano meno rappresentate. La successiva effusione di magma in fase di vescicolazione ha portato alla distruzione della parte terminale del cono lavico; ne risulta un deposito a pomici e inclusi lavici di 0,8 kmc. A questa segue la grande effusione, omogenea su tutti i 30 km di raggio, eccetto che nelle sue porzioni basali dove prevalgono grosse pomici e lave microvescicolate. Di questa formazione sono stati analizzati 29 campioni, rappresentativi delle diverse facies delle tre fasi effusive principali;

7) formazione D (da leucit-fonoliti tefritiche a trachiti molto acide): deposito misto di ignimbriti, colate di fango e di tufi del volume globale inferiore ai 0,5 kmc. Di essa sono stati analizzati tre campioni di pomici.

Risultati analitici ⁽²⁾.

- 1) Lave a fenocristalli di sanidino: i valori sono dispersi per l'U, omogeneamente distribuiti per il Th attorno alle medie:

$$U = 25 \text{ ppm} \quad Th = 122 \text{ ppm} \quad Th/U = 5,0$$

- 2) Lave a grossi fenocristalli di leucite: presentano due distribuzioni distinte di U e Th, delle quali la più comune risponde alla media:

$$U = 16 \text{ ppm} \quad Th = 101 \text{ ppm} \quad Th/U = 6,3$$

l'altra:

$$U = 36,5 \text{ ppm} \quad Th = 158 \text{ ppm} \quad Th/U = 4,3$$

- 3) Lave a fenocristalli di sanidino e leucite: i valori si dispongono omogeneamente attorno alle medie:

$$U = 35,3 \text{ ppm} \quad Th = 218 \text{ ppm} \quad Th/U = 6,2$$

- 4) Ignimbrite A: sono ben evidenziati due gruppi di valori; l'uno corrisponde alle facies «laviche microvescicolate»:

$$U = 41,0 \text{ ppm} \quad Th = 198 \text{ ppm} \quad Th/U = 4,8$$

l'altro corrisponde alle facies propriamente ignimbritiche:

$$U = 50,5 \text{ ppm} \quad Th = 222,3 \text{ ppm} \quad Th/U = 4,4$$

- 5) Ignimbrite B: si distinguono tre gruppi di valori, dei quali il primo è di gran lunga il più rappresentato:

$$U = 47,4 \text{ ppm} \quad Th = 208,3 \text{ ppm} \quad Th/U = 4,4$$

$$U = 27,6 \text{ ppm} \quad Th = 162,5 \text{ ppm} \quad Th/U = 5,9$$

$$U = 27,6 \text{ ppm} \quad Th = 96,3 \text{ ppm} \quad Th/U = 3,5$$

- 6) Ignimbrite C: l'U ed il Th sono distribuiti omogeneamente attorno ai valori medi:

$$U = 27,3 \text{ ppm} \quad Th = 118 \text{ ppm} \quad Th/U = 4,4$$

- 7) Formazione D: i pochi dati coincidono sui valori:

$$U = 36,6 \text{ ppm} \quad Th = 202,7 \text{ ppm} \quad Th/U = 5,5$$

(²) I singoli dati analitici ed il metodo di analisi adottato vengono illustrati in appendice.

Discussione dei risultati.

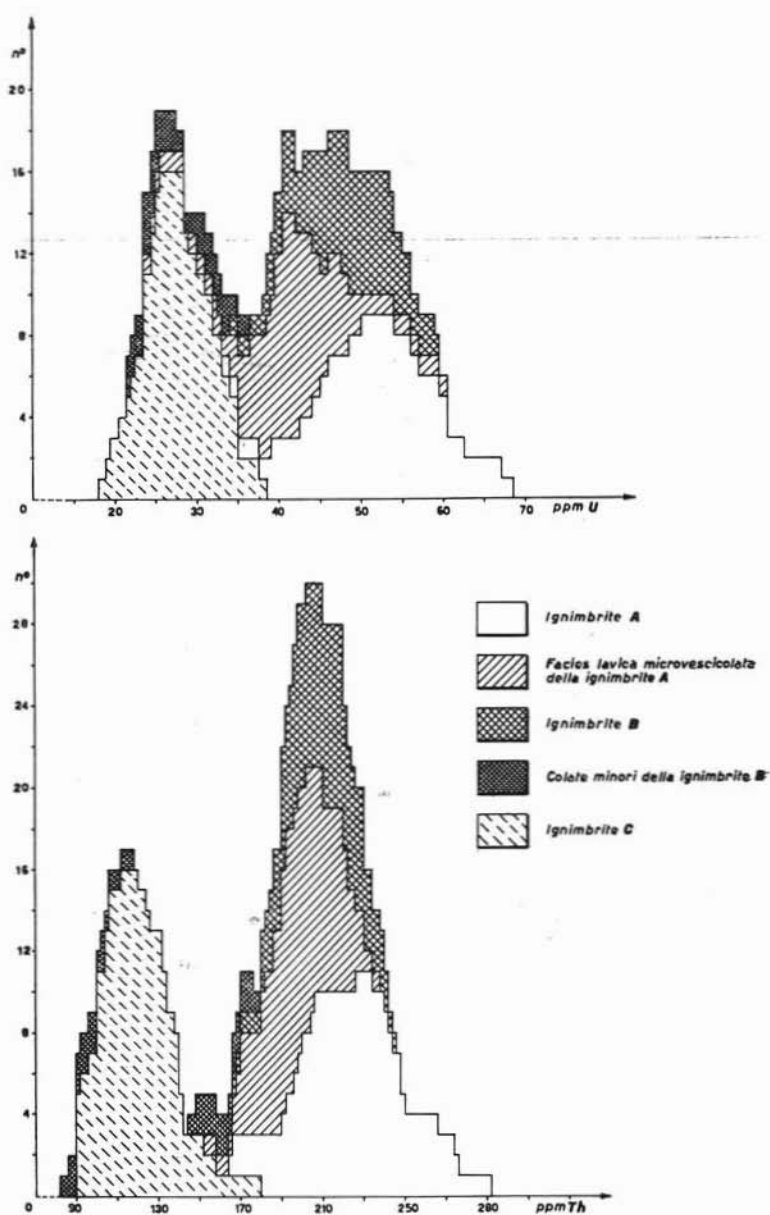
Un primo esame dei risultati porterebbe a segnalare un progressivo aumento nei tenori in U e Th dalle prime alle ultime vulcaniti emesse, aumento però interrotto da ricorrenze verso valori più bassi (figg. 2 e 3).

Tale andamento trova forse un significato se ricordiamo che il nostro « magma fondamentale », ossia il prodotto dei processi fondamentali di differenziazione che caratterizzano il magmatismo laziale, è rappresentato dalla enorme effusione della ignimbrite C. Quindi il più probabile valore « base » di U e Th a cui si può fare riferimento nei nostri ragionamenti, è quello dell'ignimbrite C: $U = 27$ ppm, $Th = 118$ ppm, $Th/U = 4,4$. Evidentemente tali valori sono il risultato di processi di accumulo che sono avvenuti a partire da magmi meno evoluti, dei quali mancano i dati analitici e che pertanto non possono far parte di questa trattazione. Sappiamo solo che le prime lave emesse (latiti basiche, leucit-tefriti, leucit-tefriti fonolitiche) hanno una radioattività bassa, certamente inferiore a quella corrispondente a 10 ppm e 50 ppm Th. Successivamente, ad un certo punto dell'attività lavica si osserva invece un netto incremento nei contenuti di U e Th.

Le lave a fenocristalli di sanidino hanno un chimismo prossimo a quello del « magma fondamentale », del quale probabilmente rappresentano delle limitate effusioni durante la fase « vesuviana » di condizioni del serbatoio magmatico. Anche il tenore in U e in Th è molto simile a quello del « magma fondamentale ». Queste lave contengono generalmente leucite nella pasta di fondo. Può essere significativo che dove non la contengono i valori scendono a 15 ppm U ed a 90 ppm Th.

Il prodotto successivo, le lave a fenocristalli di leucite, segnala processi più avanzati di assimilazione di carbonati, e la quantità di U e Th sale ancora. In questo caso però, su lave simili dal punto di vista petrografico e praticamente coeve, i valori di U e Th si dispongono secondo due popolazioni ben separate. Rispettivamente 16 ppm U - 101 ppm Th e 36,5 ppm U - 158 ppm Th. Il rapporto Th/U dei due gruppi è 6,3 e 4,3.

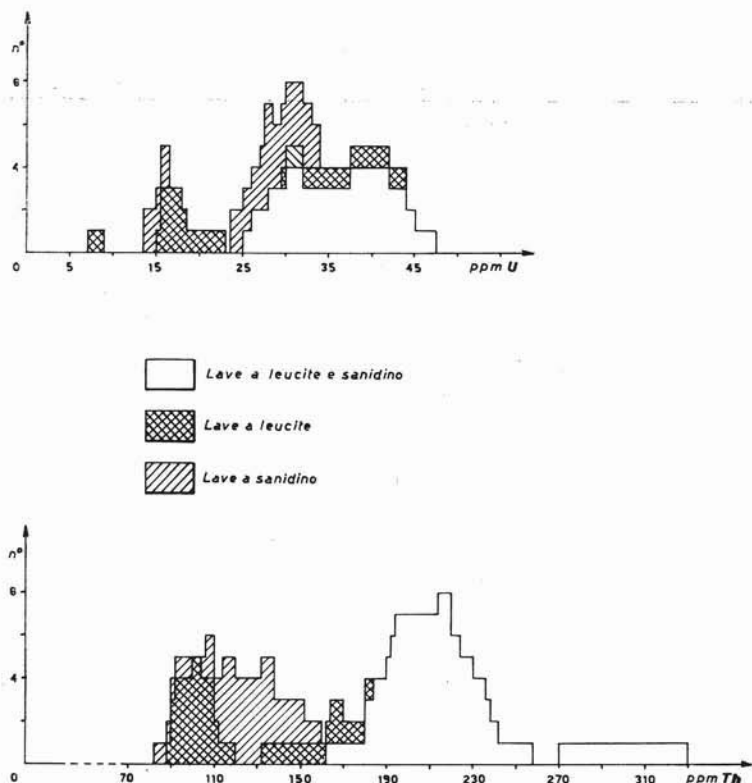
Viene comunemente ammesso che, in una serie magmatica, l'aumento nel rapporto Th/U si realizza solo nei casi estremi di differenziazione, quando il Th tende ad accumularsi di più dell'U. Poichè in questo caso l'alto rapporto Th/U caratterizza la popolazione più povera in elementi radioattivi, il suo valore alto non trova giustificazione in una differenziazione estrema.



VULCANO DI VICO: DISTRIBUZIONE DELL'URANIO E DEL TORIO NELLE IGNIMBRITI

Fig. 2.

Più probabile spiegazione delle caratteristiche di questa doppia popolazione si può invece cercare in un processo già ammesso per i magmi sintetici e recentemente riportato da LEONOV (1964). Quando



VULCANO DI VICO: DISTRIBUZIONE DELL'URANIO E DEL TORIO NELLE LAVE

Fig. 3.

i serbatoi magmatici si impostano in terreni calcarei ha luogo l'assimilazione di carbonati che arricchisce il fuso in CO_2 e H_2O . In queste condizioni si possono formare due fasi nel piromagma, il fuso silicatico ed una fase di vapore contenente CO_2 . L'U ed il Th possono venir estratti dal fuso e concentrati nella soluzione acqua-carbonato. I com-

plessi carbonatici così formati tendono a sfuggire dal fuso: in tale processo il più estraibile è il complesso stabile di uranile.

Interpreto quindi, come origine dello sdoppiamento riscontrato nella distribuzione degli elementi radioattivi nelle lave e fenocristalli di leucite, una estrazione selettiva dell'U rispetto al Th che si è esplicata in un periodo dell'attività vulcanica.

I prodotti successivi mostrano sempre di meno gli effetti di assimilazione di calcari, e sempre di più l'influenza della differenziazione complessa (pneumatolitica e per cristallizzazione frazionata). Peraltro la concentrazione di gas nelle parti apicali del serbatoio si fa sempre più forte e ne interessa progressivamente settori più grandi.

Le fluide colate di lava a fenocristalli di leucite e sanidino riflettono già l'inizio di questa nuova situazione. I tenori in U e in Th aumentano rispettivamente a 35,3 e 218 ppm. L'alto rapporto Th/U (6,2) indica probabilmente il persistere dell'effetto di estrazione selettiva dell'U rispetto al Th cui abbiamo fatto cenno più sopra. In definitiva continua la tendenza all'accumulo di elementi radioattivi nel tempo.

I valori massimi osservati appartengono alla successiva ignimbrite A. Di questa formazione i campioni analizzati sono sufficienti per costruire degli istogrammi significativi. La suddivisione geologica delle vulcaniti (facies ignimbritica e facies lavica microvescicolata) si riflette nell'andamento degli istogrammi relativi (vedi fig. 4). Considero quindi non casuale la distribuzione dei due tipi considerati attorno ai valori medi di 50,5 ppm U - 222,3 ppm Th per i tipi propriamente ignimbritici, e di 41 ppm U e 198 ppm Th per i tipi più «lavici» microvescicolati. Le facies ignimbritiche rappresentano la parte sommitale e più ricca in gas del magma eruttibile: i dati analitici provano pertanto l'arricchimento in U e Th che avviene nelle parti apicali del serbatoio magmatico. Altra coincidenza che non reputo casuale è il valore 4,4 del rapporto Th/U, identico a quello del «magma fondamentale».

La successiva eruzione (ignimbrite B) consiste di singole emissioni, alcune delle quali in successione continua, altre invece più distanziate nel tempo. La parte principale è rappresentata da tenori medi di 47,4 ppm U e 208,3 ppm Th (fig. 5), che equivalgono alla media aritmetica delle due facies della ignimbrite A. Il rapporto Th/U è anche in questo caso eguale a quello del «magma fondamentale». Le effusioni minori della ignimbrite B hanno invece valori nettamente inferiori in U e Th, che peraltro si approssimano a quelli del «magma

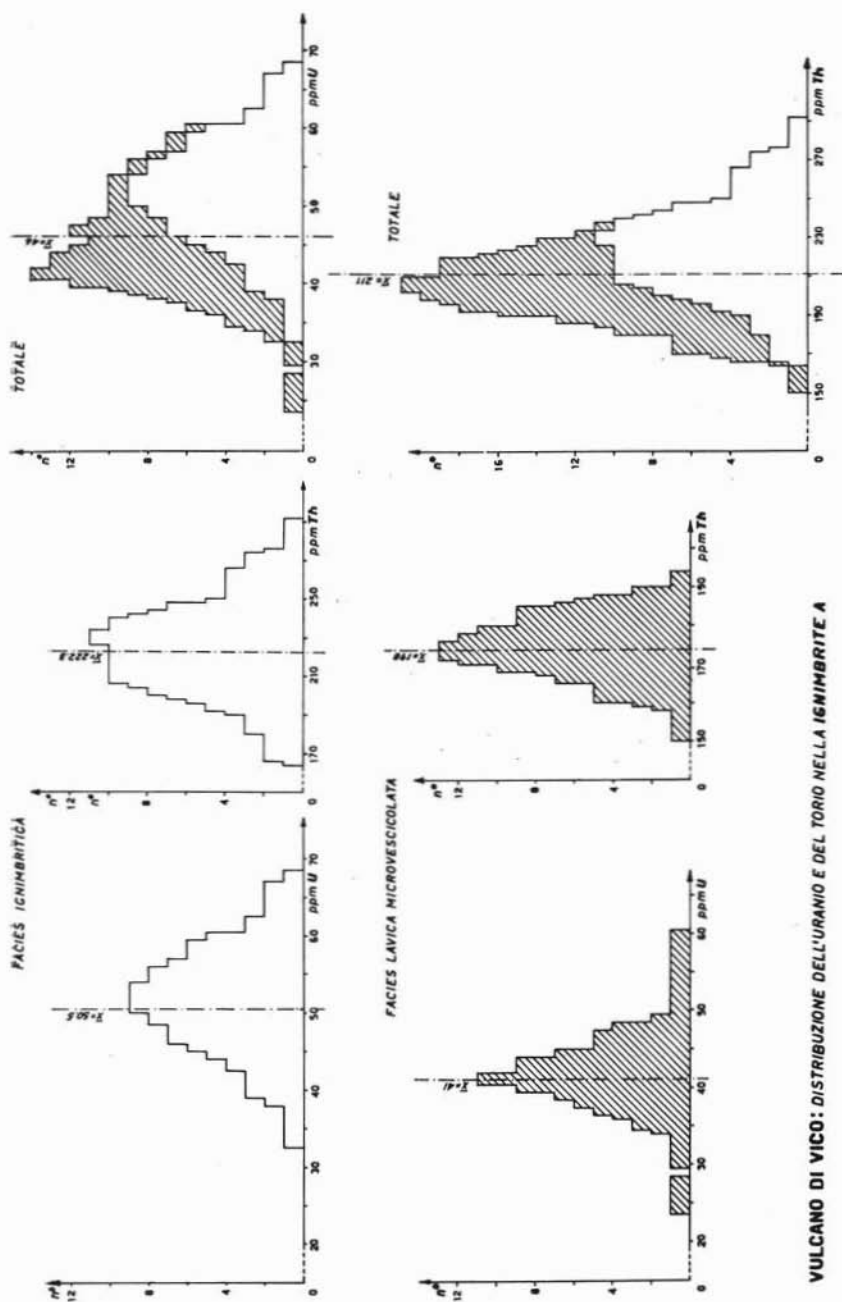
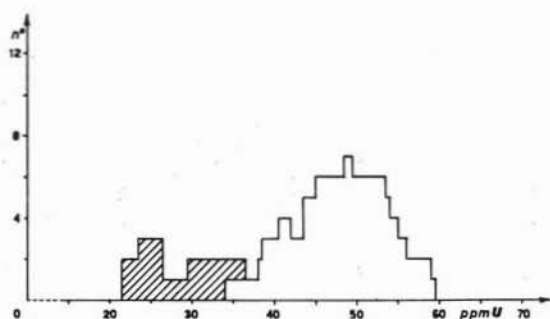


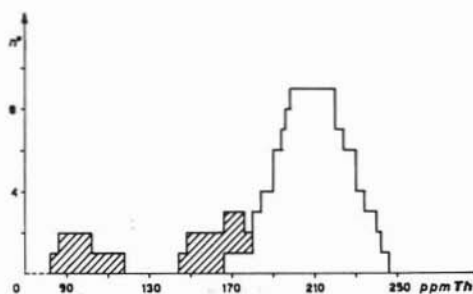
Fig. 4.

VULCANO DI VICO: DISTRIBUZIONE DELL'URANIO E DEL TORIO NELLA IGIMBRITE A

fondamentale». Sembra che le variazioni di chimismo non influenzino più la distribuzione dell'U e del Th. La ignimbrite B ha infatti un



□ Colate principale
 ▨ Colate secondarie



VULCANO DI VICO: DISTRIBUZIONE DELL'URANIO E DEL TORIO NELLA IGNIMBRITE B

Fig. 5.

chimismo più evoluto della precedente ma ne presenta gli stessi tenori di elementi radioattivi. Tuttavia, a minime variazioni di chimismo tra

le diverse colate della stessa ignimbrite B corrispondono variazioni fortissime nei contenuti in U e Th. Tale variabilità va quindi messa in relazione con la posizione occupata entro il serbatoio magmatico dalle diverse porzioni di magma prima dell'eruzione, piuttosto che con le differenze chimiche stesse.

Segue la ignimbrite C. In questo caso (vedi fig. 6) si ha una rigorosa costanza nella distribuzione dell'U e Th, indipendentemente dalle piccole variazioni chimiche e dalla posizione dei diversi livelli di magma eruttibile entro il serbatoio. Infatti le tre effusioni principali che hanno portato a giorno la ignimbrite C presentano gli stessi tenori in U e Th. Ciò potrebbe indicare che con la ignimbrite C è stata emessa rapidamente quella porzione di magma fondamentale profondo entro il quale i gradienti verticali di arricchimento non sono sensibili.

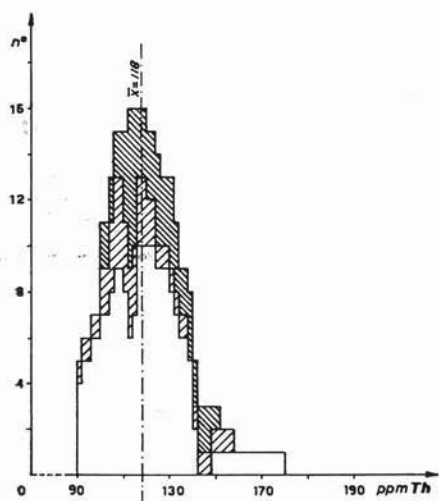
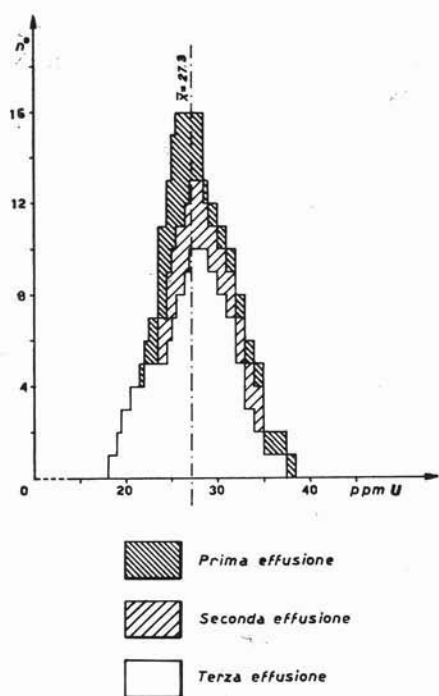
Dell'ultima effusione (formazione D) ci sono soltanto tre dati analitici e poco si può dire. Questi dati tuttavia indicano una ripresa nell'arricchimento in U e Th, in accordo con le condizioni di differenziazione apicale che la vulcanite riflette.

Ho poi voluto verificare se i diversi processi di degassazione nell'ambiente esogeno avessero in qualche modo alterato le originarie quantità di U e di Th. In tutti i casi considerati, qualsiasi fosse stata la velocità di liberazione dei gas (da tipi vitrofirici a tipi completamente cristallizzati a giorno) non si sono trovate modificazioni nei contenuti degli elementi radioattivi.

Concludendo nell'evoluzione del vulcano di Viço si riconoscono due tendenze principali che regolano la concentrazione in U e in Th:

1) una è legata all'assimilazione di calcari, e sembra innestarsi in maniera particolarmente sensibile man mano che le lave si evolvono da latiti e leucit-tefriti verso tipi più fonolitici. L'arricchimento viene tuttavia spesso interrotto dall'estrazione di U, ed in parte minore di Th, dal magma;

2) l'altra tendenza è legata all'equilibrio dei gas nelle parti sommitali del serbatoio magmatico, indipendentemente dalle progressive modificazioni nelle quantità degli elementi maggiori costituenti la roccia (questa naturalmente nei limiti osservati tra trachiti alcaline, trachilatiti, tefriti fonolitiche e fonoliti tefritiche acide). Ossia, quando il serbatoio magmatico dispone ormai di una via facile verso la super-



VULCANO DI VICO: DISTRIBUZIONE DELL'URANIO E DEL TORIO NELL'IGNIMBRITE C

Fig. 6.

ficie e non si riscontrano più gli effetti delle reazioni con le rocce incassanti ed i lunghi ristagni entro i serbatoi male alimentati, la distribuzione dell'U e Th risponde, almeno nelle parti apicali del magma, alle condizioni di equilibrio dei gas.

Dall'esame di alcuni istogrammi si può trovare conferma di quanto asserito.

La fig. 2 mostra le relazioni che intercorrono tra la parte fondamentale del magma e le sue porzioni di tetto: si riconoscono ben distinte per l'U e per il Th le curve di frequenza rappresentative del « magma fondamentale » da quelle dei suoi differenziati apicali. Esaminando in particolare i valori delle prime porzioni emesse rispetto a quelle ultime in ogni effusione (le più vicine quindi alle porzioni principali del magma dal quale si sono differenziate), troveremo i termini di transizione verso i contenuti in U e Th del magma fondamentale. Tale diagramma non è rappresentativo della reale distribuzione di U e Th nelle ignimbriti vicane, poichè il numero dei campioni non è proporzionale alle quantità delle relative vulcaniti emesse. In effetti bisognerebbe almeno triplicare la popolazione della ignimbrite C rispetto alla A e ridurre fortemente la B.

Nelle lave invece i valori del rapporto Th/U sono molto dispersi e più alti di quelli delle ignimbriti. Ciò probabilmente indica, oltre all'estrazione selettiva dell'U rispetto al Th, che i processi di arricchimento durante la fase lavica dell'evoluzione del vulcano di Vico sono diversi da quelli che agivano durante la fase ignimbritica.

Si possono segnalare altre conclusioni degne di rilievo:

a) in tutti i processi considerati, il comportamento geochimico dell'U e del Th è molto simile. Solo nelle fasi più spinte di differenziazione sembra che il Th tenda ad accumularsi più rapidamente dell'U. Tale tendenza può però conseguire semplicemente dalla più facile estraibilità dell'uranio dal fuso;

b) sebbene sia probabile che i due processi principali di arricchimento agiscano con forze diverse, i tenori massimi raggiunti dall'U e dal Th non superano mai il doppio di quelli del « magma fondamentale »;

c) l'U ed il Th, tanto legati alla fase gassosa all'interno del serbatoio magmatico; non ne seguono più le vicissitudini durante e dopo l'effusione del magma.

VULCANI VULSINI.

Geologia e petrogenesi.

I lineamenti evolutivi del vulcanismo e petrogenesi dei Vulsini che vengono qui dati, sono basati su una serie di osservazioni e di analisi (non pubblicate) effettuate nel corso di queste ricerche allo scopo di integrare per grandi linee le notizie bibliografiche (MODERNI, 1903; SABATINI, 1912; SCHNEIDER, 1965).

I vulcani Vulsini sono i più settentrionali e forse i più antichi del complesso effusivo che andiamo esaminando.

Le vulcaniti vulsine sono il risultato della lunga attività di numerosi centri vulcanici. L'assetto geologico della zona è oltremodo complesso, ed i dati geologici da noi direttamente ed indirettamente raccolti non sono sufficienti ad una descrizione concisa e concreta.

Dal principio del Quaternario fino a tempi quasi storici sono stati emessi, da numerose bocche, tufi, lave ed ignimbriti che ricoprono circa 1660 kmq di territorio. La morfologia è caratterizzata dalla grande conca di Bolsena, alla quale, ad occidente, si affianca la conca di Latera. Il più grande edificio vulcanico riconoscibile è quello di Latera, un vulcano misto molto appiattito che termina in una caldera larga più di 7×7 km. La zona del lago di Bolsena non corrisponde al centro vulcanico principale, né il lago occupa una caldera terminale. Si tratta invece di una zolla di sprofondamento rigettata principalmente nella parte orientale secondo una serie di faglie semi-anulari. Queste faglie sono riconoscibili, oltre che sul bordo est della fossa principale, anche in un vasto tratto del territorio orientale, perché contrassegnate dall'allineamento di con vulcanici minori e dall'andamento idrografico parallelo al bordo anziché centrifugo.

Trascuro qui i numerosissimi vulcani che seguono le fratture vulcano-tettoniche tardive e che sono costituiti da modesti con di scorie accompagnati talora da brevi colate laviche, per esaminare meglio la distribuzione dei prodotti vulcanici più rappresentati.

Nei settori S e N prevalgono i grandi pianori di lava, generalmente compresi in una potente serie di tufi più o meno rimaneggiati. Nel settore orientale le facies prevalenti sono tufi rimaneggiati e bacini lacustri che si alternano ad essi. Ad occidente si hanno rare lave basali mentre hanno grande sviluppo le ignimbriti che fanno centro al

vulcano di Latera. Dallo stesso vulcano si sono avute infine una serie di copiose effusioni laviche che concludono l'attività vulcanica della zona.

La successione dei principali eventi vulcanici nell'area vulsina potrebbe essere la seguente:

1) a NW dei Monti Cimini, nella zona compresa tra gli attuali corsi del fiume Paglia e del Tevere, si è impostato il primo vulcanismo. Le sue manifestazioni più vistose si lasciano riconoscere nei grandi pianori di lava della zona a nord e a sud del lago di Bolsena;

2) in un secondo tempo l'attività principale si concentra più ad W, a Latera, dove da un vulcano centrale vengono emesse almeno sette coltri ignimbritiche. Queste, dopo 15 km di percorso, vengono arginate dalla cinta di colli che limita la zona vulcanica a N, NW e W;

3) un terzo periodo è caratterizzato da una intensa vulcano-tettonica e dal vulcanismo ad essa associato: si ha la caldera terminale del vulcano di Latera, e lo sprofondamento della regione ora occupata dal lago di Bolsena.

I vulcani Vulsini si prestano male a correlazioni temporali tra i vari prodotti emessi, data la forte dispersione dei centri di eruzione. La ricostruzione della evoluzione chimica è possibile invece nel vulcano principale dei Vulsini, quello di Latera, nel quale si lasciano riconoscere i successivi prodotti emessi. Il vulcano di Latera è inoltre per molti aspetti simile a quello di Vico ed è quindi idoneo alle correlazioni che mi sono proposto di fare tra vulcaniti analoghe nel Lazio settentrionale. Limitiamo quindi ad esso la nostra attenzione.

In linea generale il tipo magmatico più rappresentato è analogo a quello di Vico, ossia trachifonolitico di schietto carattere seriale mediterraneo. A differenza del Vico abbiamo però anche prodotti a tendenza seriale alcali-calceici più o meno marcata.

La evoluzione del vulcano di Latera ricalca molti dei motivi riconosciuti nel vulcano di Vico, e si può riassumere come segue:

1) *fase di vulcano misto*, durante il quale ad effusioni laviche si alternano abbondanti depositi di tufi. Tra le lave più antiche ci sono frequentemente leucit-tefriti, seguite da potenti e fluide colate di leucit-tefriti fonolitiche a carattere seriale alcali-potassico forte;

2) *fase di eruzioni ignimbritiche*. Si mettono in posto numerose colate ignimbritiche alternate a depositi piroclastici. Le prime effusioni ignimbritiche sono relativamente acide, corrispondenti ad alcali-trachiti e trachiti debolmente soprassature. Le successive, corrispondenti come quantità e tipo al « magma fondamentale », hanno composizione leucit-trachitica quasi satura, a tendenza molto meno latitica e fonolitica delle corrispondenti vicane. Il carattere seriale delle ignimbriti è alcali-potassico medio;

3) *fase di sprofondamento a caldera terminale*. Lungo le fessure limitanti la caldera si ergono numerosi coni di scorie e di ceneri. Segue la gran colata di « foam-lava » (lava microvescicolata con transizioni ad ignimbrite) di composizione da latitica a leucit-trachitica, più basica del « magma fondamentale ». Il carattere seriale è alcali-potassico da medio a debole. Seguono, in conseguenza della depressione esercitata dalle fessure limitanti la caldera e della spremitura da parte della zolla in sprofondamento, estesissime colate basiche il cui chimismo varia da trachibasaltico, a trachiandesitico a latitico. Il loro carattere seriale è intermedio tra quello alcalino e quello alcali-calceico.

Rispetto al Vico, le vulcaniti di Latera formano un quadro chimico più ampio. In un verso si arriva infatti a trachibasalti, nell'altro a trachiti soprassature in quarzo.

I dati petrografici raccolti non portano ad una interpretazione petrogenetica sostanzialmente diversa da quella proposta per il vulcano di Vico. Ci sono però alcune deviazioni che indicano per i prodotti di Latera una evoluzione meno complessa.

La prima fase è analoga a quella del Vico, solo che in questo caso alle lave sintettiche si alternano tufi in grande quantità. La fase successiva, che riguarda la emissione della parte « fondamentale » del serbatoio magmatico, non più inquinata da assimilazioni, mostra una successione continua di tipi trachibasaltici-trachiandesitici-latitici-trachitici. In questo caso non si osserva più la tendenza fonolitica che abbiamo visto instaurarsi in alcuni prodotti vicani. Ciò sembra indicare che la successione magmatica osservata risponde ai successivi svuotamenti del serbatoio nel quale il magma era stratificato secondo gli effetti della differenziazione fondamentale, e che le rapide effusioni e le frequenti degassazioni non avevano permesso l'instaurarsi della differenziazione prevalentemente pneumatolitica che porta ai tipi fonolitici.

Campioni analizzati.

Sono state analizzate le seguenti formazioni vulcaniche, che elenco in ordine cronologico di messa in posto:

1) lave basiche a grana fine molto ricche in leucite e in femici (prevalentemente leucit-tefriti): sono state analizzate cinque colate che su tutto il perimetro di Latera affiorano alla base della serie vulcanica (un campione per colata);

2) lave a fenocristalli di leucite e molto sanidiniche (prevalentemente leucit-fonoliti tefritiche): sono stati analizzati 10 campioni, dei quali 2 appartenenti alla stessa colata;

3) ignimbrite 1 (trachiti e alcali-trachiti leggermente soprassature): formazione composta da ceneri e pomici chiare a fenocristalli di sanidino. E' la più cospicua tra le prime emissioni ignimbritiche. Sono stati analizzati sei campioni di pomici prelevati in varie parti della colata;

4) ignimbrite 2 (trachiti a lieve tendenza fonolitica): formazione composta da ceneri e pomici scure a leucite e sanidino. E' la più diffusa tra le formazioni ignimbritiche. Sono stati analizzati 11 campioni di pomici prelevati in varie parti della colata;

5) ignimbrite 3 — « foam-lava » — (da trachilatite e trachifonolite): formazione prevalentemente pomicea a fenocristalli di leucite. Sono stati prelevati 7 campioni rappresentativi delle diverse facies della complessa colata;

6) lave basiche prive di leucite (latiti-trachiandesiti-trachibalsiti): estese colate di lava che chiudono la serie effusiva del vulcano di Latera. Sono stati analizzati 3 campioni.

Del pianoro di lava caratterizzante l'estremo nord-orientale del distretto vulcanico sono state prelevate anche due lave sanidiniche di chimismo trachitico nettamente soprassaturo. SCHENEIDER ha riconosciuto prodotti analoghi anche tra gli inclusi dei tufi dei con i tardivi di Latera. L'attribuzione stratigrafica è dubbia e, secondo diversi autori, tali lave potrebbero anche appartenere al contiguo vulcanismo alcali-calciotoscane.

Di piccole colate ignimbritiche senza sicuro riferimento stratigrafico abbiamo inoltre analizzati tre campioni.

Risultati analitici.

Sebbene i campioni rappresentativi di ogni formazione siano molto pochi, i tenori di U e Th si scostano sufficientemente da caratterizzarli secondo i valori medi seguenti:

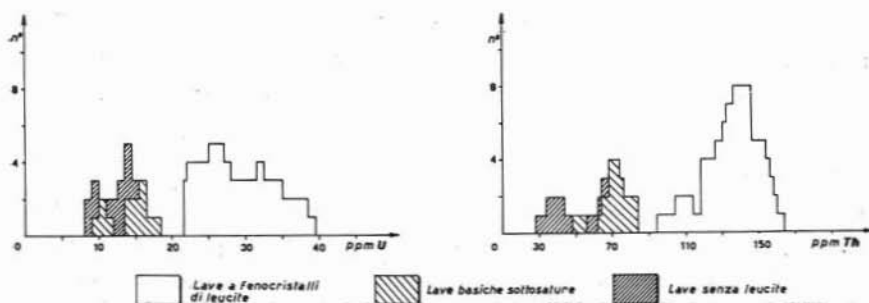
- 1) Lave basiche a grana fine molto ricche in leucite e femici:
 $U = 13,6 \text{ ppm}$ $Th = 67,8 \text{ ppm}$ $Th/U = 5,0$
- 2) Lave a fenocristalli di leucite e molto sanidiniche:
 $U = 28,6 \text{ ppm}$ $Th = 133,3 \text{ ppm}$ $Th/U = 4,7$
- 3) Ignimbrite 1:
 $U = 24,5 \text{ ppm}$ $Th = 109 \text{ ppm}$ $Th/U = 4,4$
- 4) Ignimbrite 2:
 $U = 20,6 \text{ ppm}$ $Th = 88,6 \text{ ppm}$ $Th/U = 4,3$
- 5) Ignimbrite 3 (foam-lava):
 $U = 16 \text{ ppm}$ $Th = 74,1 \text{ ppm}$ $Th/U = 4,6$
- 6) Lave basiche prive di leucite:
 $U = 8 \text{ ppm}$ $Th = 40 \text{ ppm}$ $Th/U = 5,0$
- 7) Lave acide prive di leucite:
 $U = 13,5 \text{ ppm}$ $Th = 49 \text{ ppm}$ $Th/U = 3,6$
- 8) Piccole colate ignimbritiche:
 $U = 26 \text{ ppm}$ $Th = 175 \text{ ppm}$ $Th/U = 6,7$
 $U = 28 \text{ ppm}$ $Th = 94 \text{ ppm}$ $Th/U = 3,4$
 $U = 36 \text{ ppm}$ $Th = 174 \text{ ppm}$ $Th/U = 4,8$
- 9) Un settore sanidinico di una colata leucitica basica:
 $U = 39 \text{ ppm}$ $Th = 183 \text{ ppm}$ $Th/U = 4,7$

Discussione dei risultati.

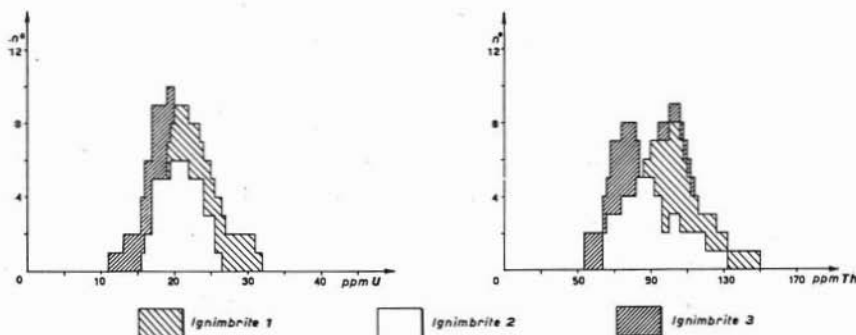
Analogamente a quanto osservato per il vulcano di Vico, anche qui si delineano due tendenze ben distinte di arricchimento in U e Th (fig. 7): l'una relativa alle lave sintettiche, l'altra relativa ai magmi trachitici in fase di differenziazione complessa (per cristallizzazione frazionata e pneumatolitica s.l.).

Tra le prime lave tefritiche a tendenza leucititica e le ultime lave fonolitico-tefritiche, il tenore di U e di Th si raddoppia. Non si arriva tuttavia ai valori alti del vulcano di Vico.

Le ignimbriti di Latera hanno un rapporto Th/U analogo a quelle vicane, ma i contenuti assoluti in elementi radioattivi ricalcano, su te-



VULCANI VULSINI: DISTRIBUZIONE DELL'URANIO E DEL TORIO NELLE LAVE



VULCANI VULSINI: DISTRIBUZIONE DELL'URANIO E DEL TORIO NELLE IGNIMBRITI

Fig. 7.

nori un po' più bassi, solo la popolazione inferiore delle due che caratterizzano le ignimbriti del Vico.

Le deviazioni che si osservano nei contenuti delle prime ignimbriti uscite rispetto a quelle «fondamentali», e a quelle («foam-lava») uscite tardive, si prestano a qualche considerazione interessante.

I valori in U e Th della ignimbrite 1 sono più alti di quelli della

ignimbrite 2 nella stessa misura nella quale sono più bassi nella 3. Le tre popolazioni (vedi fig. 7) si sommano in una curva omogenea di valor medio eguale a quello della ignimbrite 2 (quella « fondamentale »). Il tipo chimico delle tre formazioni considerate varia secondo una linea continua che dalle alcalitrachiti-trachiti va alle trachifonoliti e quindi alle trachilatiti.

Se si ammette che queste tre formazioni rispecchino l'originaria stratificazione di tipi magmatici entro il serbatoio prima che si instaurassero le condizioni adatte alle grandiose e rapide effusioni ignimbritiche, se ne avrebbe anche un quadro della distribuzione dell'U e del Th nel serbatoio magmatico stesso. Ossia verrebbe provata la diversa concentrazione in U e Th nei diversi settori del serbatoio magmatico, dipendente in parte dal grado di evoluzione chimica del magma nei diversi settori considerati, ed in parte dalla più attiva partecipazione gassosa nelle parti terminali del serbatoio. Queste tre grandi effusioni si sono succedute in maniera sufficientemente rapida da limitare gli effetti della differenziazione apicale. I prodotti di questa si rinvengono invece saltuariamente in qualche effusione di portata limitata nella quale si osservano i massimi tenori in U e Th (vedi pag. 188). Questo forte incremento in elementi radioattivi in serbatoi di portata limitata è stato riscontrato anche in una colata di lava basica a piccole leuciti che presenta passaggi gradualmente verso un suo differenziato sanidinic (di composizione trachifonolitica). Il differenziato sanidinic è il prodotto più ricco in U e Th riscontrato nel vulcano di Latera.

L'ultima colata emessa dal vulcano di Latera, quella di chimismo da latitico a trachibasaltico, presenta i valori più bassi in U e in Th (rispettivamente 8 e 40 ppm) seppur superiore di almeno un fattore 10 al tenore comunemente ammesso per lave di quel chimismo. Sotto questo profilo, i trachibasalti di Latera potrebbero ben rappresentare il magma capostipite dei differenziati vulsini, come vogliono BURRI e SCHNEIDER.

Le colate trachitiche soprassature invece, con i loro valori di 13,5 ppm U e 49 ppm Th, non presentano alcuna eccezionalità rispetto ai corrispondenti tipi di altre province vulcaniche. Pertanto, piuttosto di farle derivare dai radioattivi trachibasalti è più giusto considerarle prodotti del contiguo vulcanismo toscano.

VULCANI SABATINI.

Geologia e petrogenesi.

Vulcani Sabatini è la denominazione geografica di un complesso di edifici e di prodotti vulcanici eterogenei che occupano circa 1400 kmq di superficie a nord di Roma. L'attività di questo gruppo vulcanico è estremamente lunga, varia e complessa. I suoi prodotti più recenti si alternano con quelli del vulcano di Vico a nord; a sud perfino con quelli del vulcano Laziale, ritenuto il più giovane della « provincia romana ».

Un esame stratigrafico completo di questo gruppo vulcanico è impossibile senza l'ausilio di sondaggi, poiché l'erosione ha intaccato soltanto marginalmente il complesso: né gli sprofondamenti vulcano-tettonici hanno rigetti sufficienti per mettere in luce una stratigrafia apprezzabile. Ci si limita perciò a riconoscere, oltre alle parti affioranti dei con i lavici, le grandi serie piroclastiche e lacustri che si sono spinte fino alla valle del Tevere verso est, o sulle sponde tirreniche verso ovest, ed a constatare gli allineamenti di recenti caldere che hanno sconvolto la parte centrale dei vulcani Sabatini.

Notizie sulla successione e sui caratteri di questi terreni si hanno da MODERNI (1898) e, soprattutto, dalla serie di lavori petrografici di SCHERILLO (1933, 37, 40, 41, 43, 44, 46), ai quali rimandiamo.

La evoluzione petrografica è oggetto di un lavoro dello SCHERILLO (1948), di cui riportiamo le principali conclusioni.

I vulcani Sabatini, nell'ambito della provincia alcalino-potassica romana, presentano caratteri di alcalinità ancora superiori a quelli osservati nei vulcani Vulsini e di Vico, specie nei prodotti più basici. In linea generale i magmi più acidi (trachitici, più o meno fonolitici e tefritici) sono più antichi dei magmi più basici (tefriti fonolitiche a leucite fino a leucititi). Tale evoluzione trova spiegazione nella assimilazione di calcari da parte di magmi trachitoidi, oltre che in processi di differenziazione gravitativa e pneumatolitica. La successione irregolare ed alterna dei vari termini deriva probabilmente dalla molteplicità dei punti di emissione del serbatoio magmatico, ognuno dei quali si trovava in condizioni diverse di differenziazione.

In generale, i vulcani Sabatini mostrano una evoluzione analoga a quella da me riconosciuta per i vulcani di Vico e di Latera. In questo caso però la molteplicità di bocche di effusione, e la mancanza di un edificio vulcanico a condotto centrale sufficientemente evoluto da racchiudere le principali tappe petrogenetiche, impedisce un controllo rigoroso della evoluzione degli elementi radioattivi con la differenziazione del magma del serbatoio.

Per il nostro studio ci siamo limitati a campionare alcune tra le formazioni più estese, e specialmente quelle che si potevano confrontare con le analoghe del Vico e di Latera.

Trascurando la gran massa di tufi basali alternati alle serie lacustri che affiorano soprattutto a ovest, ho preso in considerazione la prima grande manifestazione ignimbritica (« tufi gialli » dello SCHERRILLO), qualche eruzione ignimbritica minore (« tufi terrosi » della C.G.U.), ed i successivi « tufi litoidi a scorie nere ». Tra le formazioni vulcaniche a minor diffusione abbiamo selezionato alcune colate laviche.

Controlli petrografici eseguiti hanno confermato la stretta analogia chimica della formazione dei « tufi litoidi » sabatini, con quelli vicani e vulsini (rispettivamente ignimbrite C e ignimbrite 2). Differenze ci sono invece per i « tufi gialli », che si scostano dalle corrispondenti formazioni vicane (ignimbrite B) e vulsine (ignimbrite I) per una tendenza riolitica più che alcali-trachitica, nonostante il contenuto di leucite oltre all'abbondante sanidino.

Campioni analizzati.

Lave: sono stati analizzati sei campioni di lava, rappresentativi di colate antiche e recenti, di tipo leucit-tefritico basico a tendenza fonolitica.

Ignimbriti: della prima effusione ignimbritica (ignimbrite 1) di chimismo acido a tendenza seriale alcali-calcica (trachiti-rioliti), sono stati analizzati cinque campioni. Altri quattro rappresentano una formazione molto cineritica che affiora principalmente sul versante orientale dei Sabatini (ignimbrite 1 bis) della quale però non disponiamo di dati chimici. Della ignimbrite fondamentale (ignimbrite 2), di chimismo trachitico a tendenza fonolitica, sono stati analizzati 16 campioni, rappresentativi di tutti i settori affioranti nel territorio sabatino. Sono stati analizzati infine altri due campioni di formazioni pomicee minori.

Risultati analitici.

Le ignimbriti cineritiche (ignimbrite 1 bis) hanno valori medi di: stano poco dal valor medio di:

$$U = 18 \text{ ppm} \quad Th = 100 \text{ ppm} \quad Th/U = 5,5$$

Le ignimbriti cineritiche (ignimbrite 1 bis) hanno valori medi di:

$$U = 27 \text{ ppm} \quad Th = 110 \text{ ppm} \quad Th/U = 4,1$$

La ignimbrite più rappresentata (ignimbrite 2) ha valori medi di:

$$U = 24,5 \text{ ppm} \quad Th = 116 \text{ ppm} \quad Th/U = 4,7$$

I sei campioni di lava non sono accomunabili in una unica popolazione, e presentano tenori oscillanti per l'U da 10 a 39 ppm, per il Th da 34 a 97 ppm.

Le formazioni pomicee minori danno per l'U da 20 a 33 ppm, per il Th da 114 a 142 ppm.

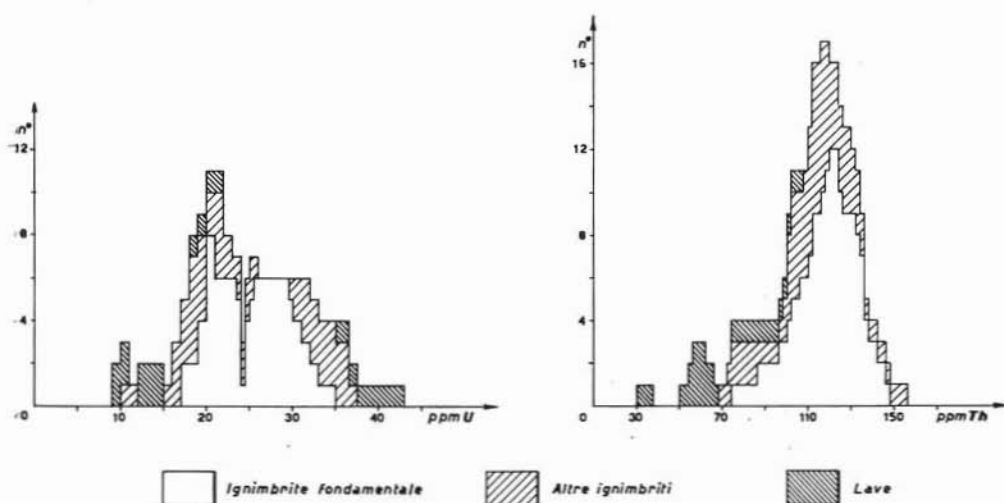
Discussione dei risultati.

I risultati analitici dei pochi campioni di lava sono in accordo con quelli rilevati per le lave del Vico e dei Vulsini. Gli elementi radioattivi sono contenuti entro tenori relativamente bassi nelle lave più basiche; essi sono suscettibili peraltro ad aumentare nei termini più acidi. I valori massimi che abbiamo riscontrato in alcune lave degli altri vulcani non vengono in questo caso raggiunti perché mancano nei Sabatini analoghi termini di differenziati in senso acido.

Per quanto riguarda le ignimbriti (fig. 8) è importante sottolineare che i tenori in U e Th della ignimbrite principale (ignimbrite 2) sono praticamente identici a quelli delle formazioni analoghe del Vico e dei Vulsini. Molto lieve, e sentito solo dall'uranio, è invece l'incremento degli elementi radioattivi nelle effusioni che precedono la ignimbrite 2, e che potrebbero corrispondere ai differenziati apicali del « magma fondamentale ». Incrementi più decisi si notano peraltro in alcune effusioni ignimbritiche minori che potrebbero rappresentare meglio le condizioni di arricchimento nelle parti sommitali del serbatoio magmatico.

In completo disaccordo con quanto verificato finora sono i dati

relativi alla prima grande effusione (ignimbrite 1), eccezionalmente bassi. Il valore del rapporto Th/U di questa formazione è inoltre anormale. E' probabile che le rocce della ignimbrite 1 siano il risultato di un processo petrogenetico che non trova riscontro nei prodotti degli altri vulcani considerati. Dal punto di vista petrochimico infatti il magma della ignimbrite 1, a tendenza riolitica, non può derivare da differenziazione del « magma fondamentale », trachitico a tendenza fo-



VULCANI SABATINI: DISTRIBUZIONE DELL'URANIO E DEL TORIO NELLE IGIMBRITI E NELLE LAVE

Fig. 8.

nolitica. Altri processi devono essere intervenuti a conferire il particolare chimismo e la scarsa concentrazione di elementi radioattivi a queste rocce. Primaria importanza potrebbe avere al riguardo l'ibridizzazione del « magma fondamentale » del Lazio settentrionale con residui acidi alcali-calcei di anatessi. Il settore orientale dei vulcani Sabatini ospita molti duomi e colate di rocce acide alcali-calceiche. Inoltre, sempre in questa zona, ho avuto modo di constatare che, tra i tipi nettamente alcali-calcei ed i tipi schiettamente « mediterranei », c'è tutta una successione di prodotti a chimismo intermedio.

CONFRONTI BIBLIOGRAFICI

HEIER e ROGERS (1963) dimostrano le relazioni lineari che intercorrono tra Th, U e K, e ne danno il campo di variabilità in rocce ignee rappresentative delle diverse stirpi magmatiche e serie di differenziazione. La costanza da loro riscontrata nei valori dei rapporti Th/K e U/K è tale da poter servire a definire le quantità di U e Th una volta note le quantità di K nelle serie comuni di rocce.

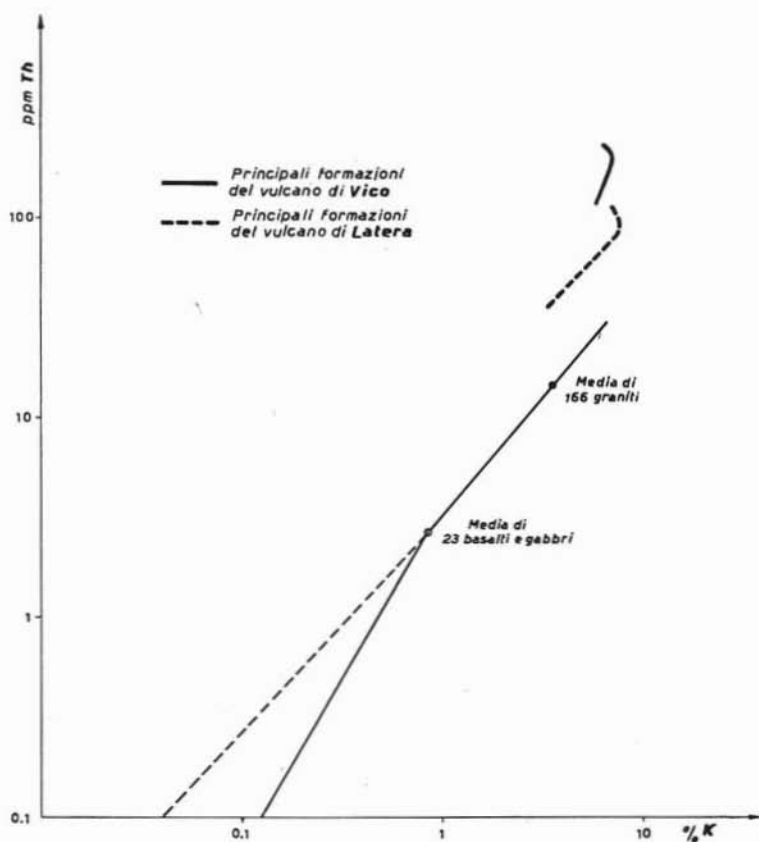
Nelle figg. 9 e 10 sono rappresentate le curve passanti per i valori medi dei rapporti Th/U e U/K dei vari tipi di rocce considerate nella statistica di HEIER e ROGERS, ed i punti rappresentativi dei gruppi caratteristici del vulcanismo alcalino laziale. Lo scartamento delle vulcaniti del Lazio settentrionale, come quantità assoluta di U e Th e valore dei loro rapporti col K, è di molto superiore a quello dei casi più eccezionali riportati dalla letteratura.

In base ai tenori di K si sarebbero dovute prevedere quantità di Th da 15 a 40 ppm, e di U da 4 a 20 ppm, a differenza delle 40-220 ppm Th e 10-50 ppm U riscontrate.

In accordo con i dati bibliografici è il fattore di arricchimento (circa 6) che si raggiunge col procedere della differenziazione. Tutti gli autori concordano nel rilevare che il meccanismo di arricchimento in U e Th in una serie magmatica è legato alla differenziazione per cristallizzazione frazionata. Il fattore di arricchimento non varia sensibilmente nelle serie di differenziazione di rocce batolitiche, ipoabissali o nelle lave. Nelle rocce alcaline questo sembra superiore (circa 10), ma in effetti i più elevati tenori in U e Th che si rinvenivano in queste rocce caratterizzano già i termini meno evoluti della serie di differenziazione. Peraltro anche nei magmi alcalini (sodici) non si superano generalmente i tenori medi massimi dei prodotti finali di differenziazione dei magmi alcali-calcei di alcune regioni.

I valori massimi finora riscontrati sono quelli relativi alle intrusioni sienitico-granitiche del Tien Shan settentrionale (valori medi: U = 10 ppm, Th = 57 ppm), che sono analoghe a quelli del granito di Conway (White Mountain series). Tenori più prossimi a quelli minimi del Lazio settentrionale sono stati invece misurati nelle rocce alcaline del Sussex Country N. J. (19-44 ppm U) e nei settori soggetti a metasomatosi alcalina nell'ambito di massicci granitici alcalini. Ad esempio nei graniti albitizzati di Ognitskii, l'U sale a valori medi di 14 ppm ed il Th di 90 ppm.

Il rapporto Th/U (4,4 nei prodotti effusivi più rappresentati nel Lazio) è normale. La media di tutti i basalti ha un valore $\text{Th}/\text{U} = 4,8$, le lave hawaiane 4,1, leggermente maggiore di quello che caratterizza le rocce plutoniche (circa 3,5).

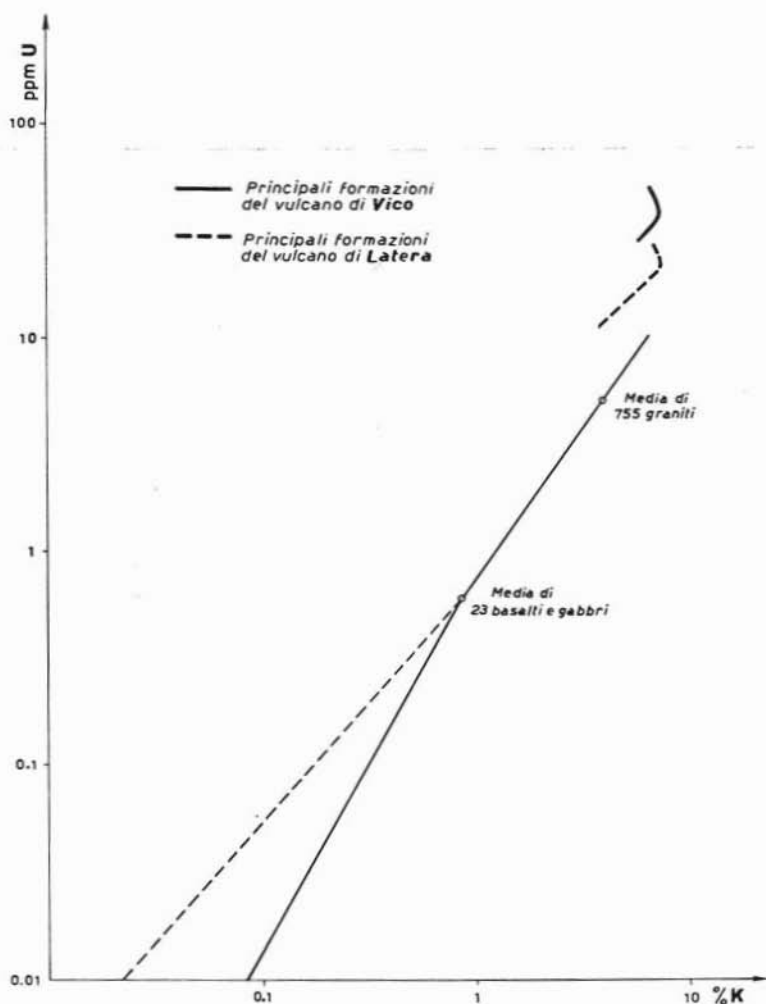


RELAZIONE TRA IL TORIO ED IL POTASSIO

Fig. 9.

Eccezionalmente alti sono invece i rapporti Th/K e U/K nonostante che la caratteristica dei magmi che stiamo considerando sia l'alta quantità di K. La media di tutti i tipi di basalti è di $\text{Th} \cdot 10^4/\text{K} = 2,8$ (circa 5,5 nei tipi più alcalini), e di $\text{U} \cdot 10^4/\text{K} = 0,6$ (circa 1 nei tipi più alcalini). Nel Lazio settentrionale da valori minimi di $\text{Th} \cdot 10^4/\text{K} = 11$

si arriva a $\text{Th} \cdot 10^4/\text{K} = 34$, mentre il rapporto $\text{U} \cdot 10^4/\text{K}$ varia da 2,2 a 7,7.



RELAZIONE TRA L'URANIO ED IL POTASSIO

Fig. 10.

In definitiva le vulcaniti del Lazio settentrionale, caratterizzate da alti valori di K, rappresentano una eccezione nel bilancio geochi-

mico delle serie magmatiche finora esaminate come quantità di U e Th. Sebbene l'U ed il Th si scostino per eccesso dalle normali relazioni che li lega alla quantità di K, il valore del rapporto tra i due elementi radioattivi è normale.

Altra conclusione fondamentale alla quale sono arrivati diversi ricercatori (vedi in particolare HEIER, McDUGALL, ADAMS, 1964), è che la concentrazione di Th, U e K con la differenziazione magmatica avviene con un incremento relativo di $Th > U > K$, con un conseguente leggero aumento nei rapporti Th/K , U/K e Th/U . La validità di questa legge sarebbe tale da far escludere la derivazione per differenziazione progressiva l'una dall'altra una serie di rocce che presenti una stretta analogia in questi rapporti. Nel Lazio settentrionale l'evoluzione petrogenetica è accompagnata da un generico aumento nei rapporti considerati, ma in maniera alquanto particolare sulla quale è utile soffermarci.

Dal diagramma Th - K (fig. 9) si vede che nel caso dei vulcani Vulsini (Latera) gran parte della serie di differenziazione è caratterizzata da un rapporto Th/K quasi costante. L'ultimo differenziato si scosta nettamente perché ai massimi tenori in Th corrisponde una diminuzione del K. Nel caso del vulcano di Vico i valori assoluti di Th sono molto più alti ed i valori dei suoi rapporti col K aumentano molto rapidamente tra il magma «fondamentale» ed i suoi differenziati. Però, raggiunto un certo limite, in tali vulcaniti si verifica un aumento di Th a K costante o decrescente. Le stesse correlazioni valgono per l'U e K nei due vulcani considerati.

In precedenza abbiamo ammesso che la successione dei prodotti del vulcano di Latera rispecchia la originaria stratificazione dei tipi magmatici entro il serbatoio, derivata dalla prevalente differenziazione per cristallizzazione frazionata in corso. I parametri considerati per le varie zone sono i seguenti:

	U ppm	Th ppm	K %	Th. $10^4/K$	U. $10^4/K$	Th/U
Trachiandesiti e						
Trachibasalti ⁽³⁾	8	40	3,5	11,4	2,2	5,0
Latiti (ign. 3)	16	74	6,9	10,7	2,3	4,6
Trachiti (ign. 2)	21	89	7,7	11,4	2,7	4,3
Tr. Alcaline (ign. 1)	25	109	7,1	15,3	3,4	4,4

⁽³⁾ I tenori di questo gruppo corrispondono al limite inferiore del metodo analitico adottato in routine; i dati riportati hanno pertanto valore indicativo.

Nelle prime tre tappe della serie di differenziazione l'aumento del Th, U e K è generalmente graduale. L'aumento dell'U e del Th è proporzionale a quello del K con un lieve incremento relativo che porta il rapporto U/K e Th/K a valori progressivamente crescenti. La diminuzione finale di K è compensata da un aumento di Na, per cui si può considerare rispettata la regola generale e l'ordine di grandezza dell'aumento in U e Th col procedere della differenziazione, il grado della quale è rappresentato dal contenuto in alcali.

Il vulcano di Vico ci permette di esaminare l'andamento dei parametri considerati in condizioni magmatiche diverse da quelle dei Vulcini. Abbiamo infatti considerato le ignimbrite A, B e D come progressivi differenziati apicali di un magma fondamentale di composizione prossima a quella della ignimbrite C. Ordinando i dati nel senso di U e Th crescente abbiamo:

	U ppm	Th ppm	K %	Th. $10^4/K$	U. $10^4/K$	Th/U
Ignimbrite C	27	118	5,8	20	4,7	4,4
Ignimbrite D	37	203	7,2	28	5,1	5,5
Ignimbrite B	47	208	7,0	30	6,8	4,4
Ignimbrite A	50	222	6,5	34	7,7	4,4

Con l'U ed il Th crescono i valori dei rapporti Th/K e U/K, sebbene tale incremento non sia accompagnato da un graduale aumento di K. Poiché la diminuzione di K non è compensata da un aumento di Na (al contrario, si osserva una diminuzione del sodio col crescere degli elementi radioattivi) non si può in questo caso invocare una correlazione diretta col grado di differenziazione del magma. Appare invece la correlazione tra le quantità di U e Th e le quantità di magma eruttato nelle singole effusioni, che aumenta dalla D, alla B, alla A.

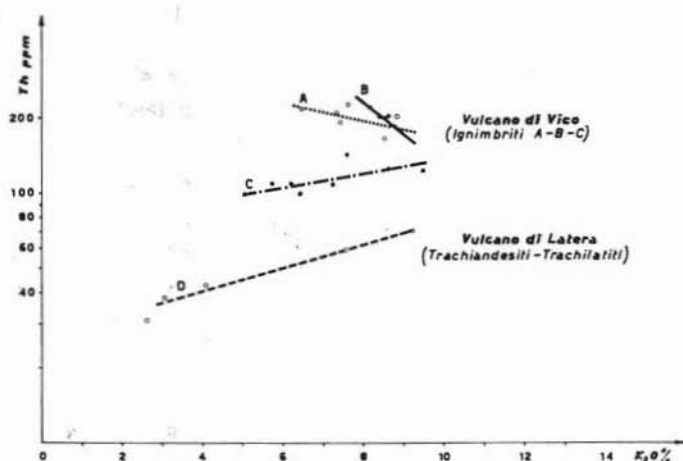
A differenza delle grandi effusioni del vulcano di Latera, le quantità di magma eruttibile nelle effusioni A, B e D del Vico sono dipese dallo spessore di colonna magmatica entrata in condizioni di soprassaturazione per accumulo di gas, piuttosto che per depressione legata alla vulcano-tettonica. Poiché tale accumulo gassoso dipende dal tempo durante il quale è stata possibile la realizzazione ed il mantenimento dei moti convettivi che apportavano il gas e gli elementi ad esso affini, se ne deduce che, in determinate condizioni, sia più importante il fattore « tempo » del fattore « grado di differenziazione ». Peraltro le modalità

di arricchimento dell'U e Th si scostano da quelle degli elementi maggiori che caratterizzano il chimismo della roccia. La ignimbrite A è infatti la più simile alla C come chimismo pur essendo la più ricca in elementi radioattivi: il magma della ignimbrite A è il prodotto di una lenta differenziazione complessa nella quale la componente pneumatolitica ha avuto funzione sempre maggiore. L'effusione successiva, B, molto più evoluta chimicamente della A, è un prodotto di una differenziazione prevalentemente pneumatolitica: il suo volume modesto ed il carattere ritmico delle sue effusioni, che la portano a termini rapidamente impoveriti in U e Th, indicano che una porzione limitata di magma era interessata dai processi di accumulo. Segue, per rilassamento della pressione di carico, la grande effusione della ignimbrite C che ci dà luogo di conoscere la composizione chimica raggiunta in quella fase dal « magma fondamentale ». La ignimbrite D, la più limitata tra le grandi effusioni, sebbene sia la più evoluta chimicamente non raggiunge i tenori massimi in U e Th, poiché lo sgravio di pressione legato allo sprofondamento della caldera ha costretto il magma ad uscire prima che si sia completato il processo di arricchimento in gas per propri moti convettivi.

Si stanno così delineando due meccanismi principali di arricchimento da tenere distinti. Uno è quello già riconosciuto, per varie serie magmatiche, dell'aumento delle quantità di U e di Th col procedere della differenziazione magmatica. Dalla figura 11 risulta la gradualità di questo processo nelle parti relativamente profonde del serbatoio magmatico (transizione trachibasalti-latiti nel vulcano di Latera, differenziazione nell'ambito della ignimbrite C nel vulcano di Vico), soggette ad una lenta differenziazione, prevalentemente per cristallizzazione frazionata. Quando invece il serbatoio magmatico è in livelli sufficientemente superficiali da rendere possibile ed efficace la differenziazione pneumatolitica, l'arricchimento in U e Th è rapido e non più parallelo a quello di alcuni elementi maggiori, pur interessati dal nuovo tipo di differenziazione.

Finora abbiamo esaminato le modificazioni dei tenori in U e in Th per unità effusiva ossia prendendo i valori medi dei membri vulcanici principali. Se invece analizziamo l'andamento degli stessi elementi nell'ambito della singola effusione, possiamo definire più strettamente alcune particolarità dianzi denunciate.

La figura 11 visualizza le variazioni del torio e del potassio nelle diverse condizioni di differenziazione del vulcano di Vico. Il « magma fondamentale » (ign. C) che si sta evolvendo principalmente per cristallizzazione frazionata, ha un incremento in K che è parallelo a quello del Th: entrambi aumentano col procedere della differenziazione. Il magma della ignimbrite A, invece, evolutosi in condizioni più superficiali che rendevano efficace la differenziazione pneumatolitica, ha va-



RELAZIONE TRA IL TORIO ED IL POTASSIO

Fig. 11.

lori del K solo leggermente superiori a quelli del « magma fondamentale », mentre i valori del torio sono quasi raddoppiati. L'andamento della variazione del Th e del K è inverso rispetto al caso precedente: l'aumento del Th è accompagnato dalla diminuzione del K.

Analogo andamento, ma ancora più accentuato si osserva nel magma della ignimbrite B, che rappresenta la frazione evolutasi in condizioni ancora più apicali del serbatoio magmatico. I tenori medi di K e di Th praticamente non variano rispetto a quelli della ignimbrite A, ma il verso della loro variazione, ossia la diminuzione del potassio corrispondente all'aumento del Th, è molto più accentuato.

Le particolarità che legano le variazioni del Th e del K nel-

l'ambito delle singole formazioni considerate, si ripetono esattamente per l'U.

La dissociazione riscontrata nell'arricchimento dell'U e del Th da una parte e del K (e del Na nel caso del Vico) dall'altra nei settori più superficiali dei condotti magmatici, trova spiegazione ammettendo che gli alcali escano dalla camera magmatica assieme a parte della frazione gassosa, superata una certa concentrazione. I campioni di roccia corrispondenti a questi settori di magma sono generalmente al limite della saturazione in alluminio, ed è quindi probabile che il potassio non ad esso legato sia potuto uscire dal sistema.

Che il potassio possa uscire dal magma è stato recentemente verificato da RICHTER e MOORE (1966) nel lago di lava del Kilauea. Questo lago, profondo 120 m e svasatissimo in quanto racchiude 40 milioni di mc di magma, in due anni è solidificato solo nei 14 m superiori. Sotto questa crosta è stato trovato costantemente un arricchimento di potassio superiore al 100% del contenuto medio della crosta stessa e delle lave che colmano il lago. Sembra quindi che gli alcali salgano dalla profondità e si concentrino sotto la crosta. Quando quest'ultima zona cristallizza, l'eccesso di alcali viene estratto e depositato come sublimati di solfati alcalini nelle parti più fredde della crosta.

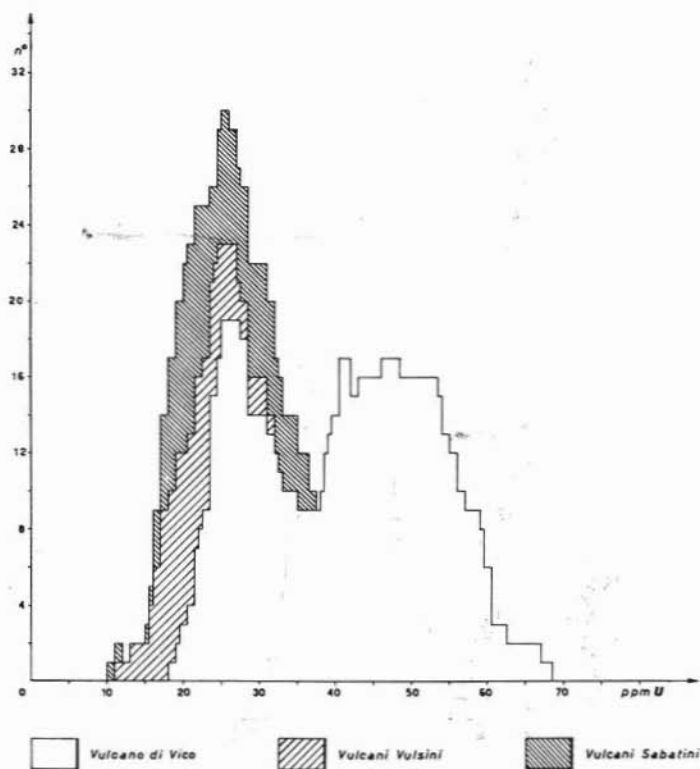
Ci sembra quindi pertinente applicare un meccanismo analogo anche nelle camere magmatiche superficiali, specialmente dove il magma si sta evolvendo in piromagma.

CONCLUSIONI.

Le figg. 12, 13 e 14 mostrano gli istogrammi cumulativi della distribuzione dell'U e del Th nelle ignimbriti e nelle lave del Lazio settentrionale. Ho tenuto distinti questi due tipi di prodotti vulcanici per i diversi significati che possono avere nella linea evolutiva che stiamo esaminando.

Le ignimbriti infatti rappresentano le grandi effusioni, ossia quella parte del magma che abbiamo considerato « fondamentale » nel Lazio settentrionale, e le sue differenziazioni apicali. Le lave invece sono generalmente il risultato di processi di differenziazione più localizzati, che si sono applicati su parti epidermiche, limitate del serbatoio magmatico, soprattutto per assimilazione di calcari.

La distribuzione dell'U e del Th nelle ignimbriti è normale attorno a due valori medi nettamente distinti: rispettivamente 25-47 ppm per l'uranio e 110-210 ppm per il torio.

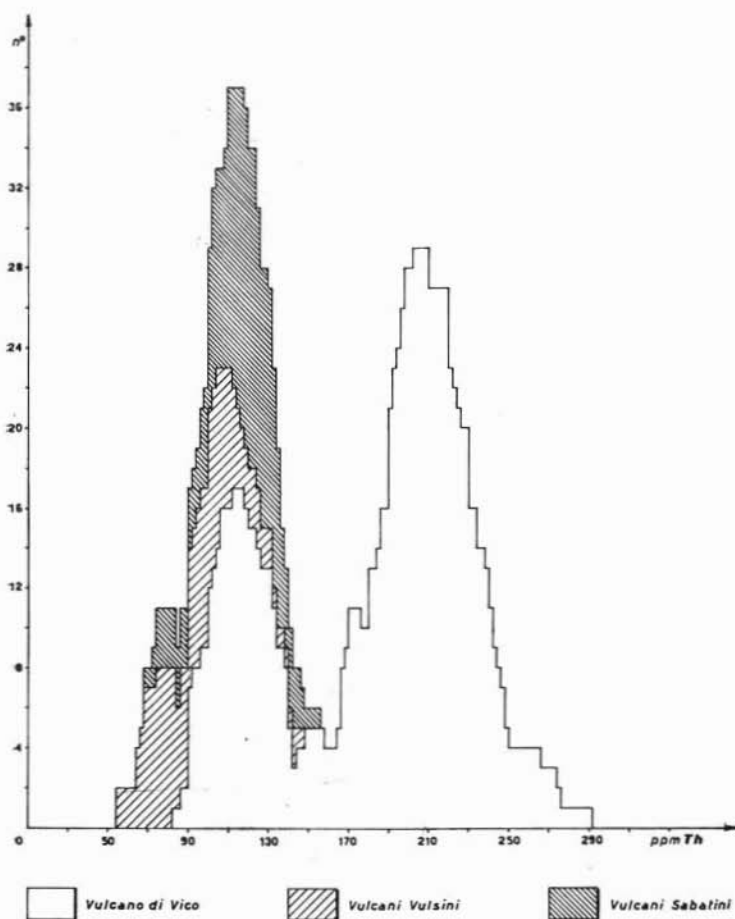


DISTRIBUZIONE DELL'URANIO NELLE IGNIMBRITI DEL LAZIO SETTENTRIONALE

Fig. 12.

Che la distribuzione sia normale e non logaritmica è in accordo con la bassissima cristallinità delle rocce. Ai controlli autoradiografici è risultato inoltre che gli elementi radioattivi sono distribuiti uniformemente nel vetro di tutti i campioni esaminati, campioni scelti in modo che rispondessero alle più diverse condizioni di cristallizzazione e di arricchimento. Tuttavia la dispersione osservata è probabilmente

troppo bassa perché appaia evidente la normalità o meno di una popolazione.



DISTRIBUZIONE DEL TORIO NELLE IGIMBRITI DEL LAZIO SETTENTRIONALE

Fig. 13.

Stupisce invece la netta divisione e limitata dispersione delle due curve cumulative di distribuzione.

Le curve corrispondenti ai tenori più bassi rappresentano rispet-

tivamente la distribuzione dell'U e del Th nel « magma fondamentale » del Lazio settentrionale. Tali curve sono, in ogni caso considerato, la risultante della sovrapposizione delle curve parziali corrispondenti alle

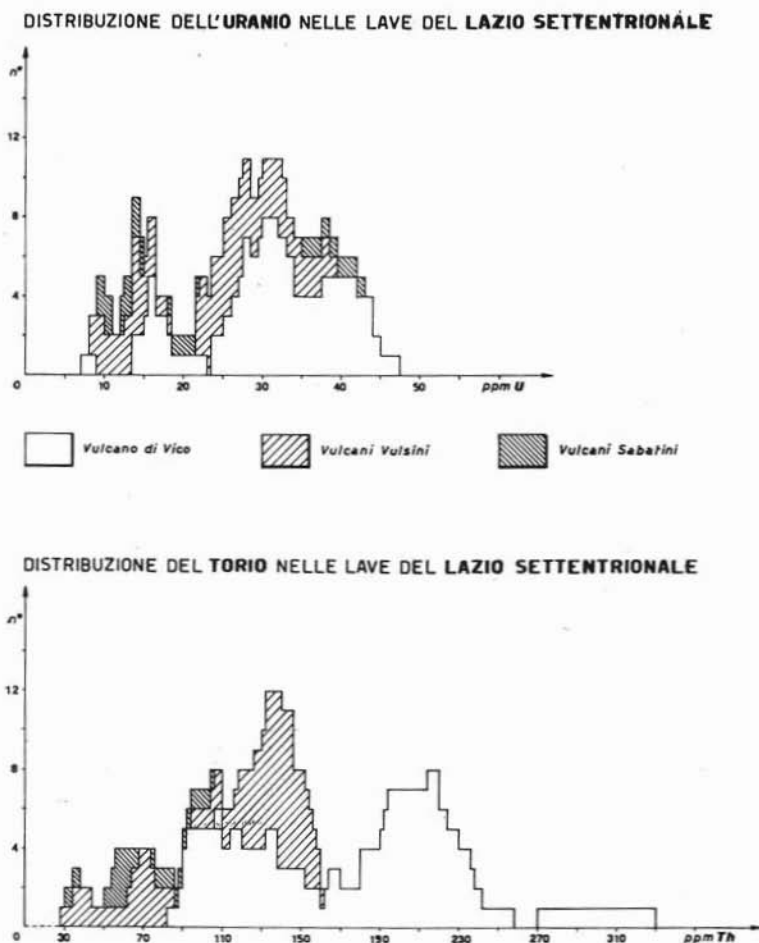


Fig. 14.

diverse condizioni originarie dei vari settori del magma eruttato. Il processo graduale ed omogeneo di differenziazione di questo settore si riflette nelle variazioni degli elementi maggiori e minori esaminati: questi ultimi si compongono in una curva di distribuzione omogenea.

Dal punto di vista vulcanologico tali blandi processi hanno avuto luogo in un « ipomagma » (⁴), e la loro risultante è espressa per l'U e per il Th dai tenori medi di 25 ppm e 110 ppm rispettivamente. L'origine della alta concentrazione in elementi radioattivi è connessa all'origine dell'ipomagma in questione, origine attualmente dibattuta dai magmatologi. Sarà pertanto utile al vaglio genetico tener conto che, anche gli estremi più femici della serie di differenziazione riconosciuta, hanno tenori in U e in Th che superano di almeno 10 volte quelli che competerebbero ai gruppi magmatici classici petrograficamente più affini.

Le curve corrispondenti ai tenori più alti rappresentano invece rispettivamente la distribuzione dell'U e del Th nei settori apicali del serbatoio magmatico, nel caso che ivi si instaurino condizioni adatte a creare e mantenere moti convettivi bifasi (RITTMANN, 1962). Questo caso si verifica prevalentemente quando il vulcano è soggetto a periodi relativamente lunghi di quiescenza in condizioni di parziale comunicazione diretta con l'esterno (RITTMANN, comunicazione personale). I moti convettivi che così si instaurano determinano un progressivo aumento dell'U e del Th nelle parti più superficiali del serbatoio, data l'affinità di questi elementi con la fase gassosa o con i componenti di questa. Forse non è solo la convenzione a determinare questi arricchimenti; vi si possono sommare gli effetti della « filtrazione » (MARINELLI, MITTEMPEGHER, 1966), o genericamente quei vari e difficilmente definibili tipi di differenziazione che si instaurano attivamente nei settori magmatici sottoposti a forti gradienti di pressione e di temperatura. In effetti, la frequenza sui valori massimi in U e in Th corrisponde a differenziati apicali del solo vulcano di Vico che, nel gruppo vulcanico del Lazio settentrionale, caratterizzato da una moltitudine di bocche effusive, è l'unico edificio isolato ed a forte sviluppo verticale. Ciò probabilmente è conseguenza della forma stessa del suo serbatoio magmatico, che poteva trovare preferenzialmente sfogo in un unico punto. Nel caso del Vico quindi, all'altezza del camino magmatico entro l'edificio, si sommerebbe la forma allungata del serbatoio alimentatore. I processi di differenziazione apicale che ivi si instaurano saranno più sviluppati

(⁴) Nei riferimenti vulcanologici sono stati adottati i termini ed i concetti illustrati da RITTMANN (1963).

di quelli che interessano camere magmatiche più areali che sboccano attraverso una moltitudine di condotti minori.

Il grado di arricchimento di U e in Th dipende dalla durata di questi processi, quindi da un fattore « tempo ». Anche le curve cumulative corrispondenti ai tenori massimi di U e di Th sono la componente omogenea di più curve di arricchimento. Ciò che differenzia in primo luogo queste curve di arricchimento è il « tempo » durante il quale si sono mantenute le condizioni di arricchimento stesse. Il fattore « tempo » non sempre viene riflesso dalla composizione chimica della roccia. Infatti un « tempo » lungo su magmi relativamente poco evoluti comporta arricchimenti maggiori in U e in Th di quelli che si verificano per un « tempo » poco più breve su magmi molto più evoluti chimicamente. Nella valutazione della evoluzione chimica bisogna però considerare l'asporto di alcali che colpisce il piromagma nelle parti apicali del serbatoio e che confonde le caratteristiche chimiche della roccia.

In definitiva si può dire che il secondo gruppo di curve di frequenza rappresenta la distribuzione dell'U e del Th in condizioni di piromagma.

In questo tipo di distribuzione c'è tuttavia un'importante particolarità che deve trovare spiegazione: ossia il perché dello sdoppiamento delle curve di frequenza ed il perché della limitata dispersione dei valori.

Nel caso dell'arricchimento in condizioni di piromagma ci devono essere tutti i termini di transizione all'ipomagma sottostante, e quindi la distribuzione dei valori dovrebbe essere continua con un massimo di frequenza sui valori bassi caratteristici di quel magma, e con un'ampia dispersione verso i tenori alti, corrispondenti al magma apicale arricchito in gas ed in elementi pneumatofili. Questa situazione si verifica certamente nel magma del serbatoio, ma non può venir riprodotta dalle sue effusioni. Il magma eruttibile si identifica infatti con il piromagma: essendo lo stesso il fattore che determina l'effusione del magma e l'arricchimento dell'U e del Th, ossia la liberazione della fase gassosa, avremo la stretta concomitanza tra il materiale eruttato e quel tenore in elementi radioattivi. Questo è valido nel caso di effusioni provocate dalla tensione interna dei gas che vincono la pressione esterna. Se invece intervengono altri fenomeni a determinare un brusco rilassamento della pressione esterna, avremo la effusione di magma che solo

in quel momento si trasforma in piromagma, e nel quale pertanto non ci sono state le condizioni di arricchimento ad opera della fase gassosa.

Riprova di quanto ora asserito si può trovare nelle figg. 2 e 11 che illustrano le relazioni tra i differenziati apicali ed il magma fondamentale del vulcano di Vico. La effusione dei differenziati apicali termina quando diminuisce la concentrazione di gas libero nel magma. Le ultime porzioni, meno gassate, emesse nel corso delle effusioni dei differenziati apicali, hanno tenori in U e in Th che si avvicinano a quelli dell'ipomagma della regione.

La meccanica delle eruzioni riesce così a chiarire il perché dalla doppia distribuzione degli elementi radioattivi. Resta da spiegare il perché l'arricchimento non è indefinito ma, al contrario, non supera valori poco dispersi attorno al valore medio. Anche in questo caso la meccanica delle eruzioni può venir in aiuto.

Abbiamo detto che il processo che determina l'eruttibilità del magma e l'accumulo degli elementi radioattivi è lo stesso. Poiché l'accumulo di gas nelle parti sommitali non può essere indeterminato, ma sfocia in una eruzione del magma sovrassaturo in gas, oppure in una emissione della frazione gassosa, così pure non può essere indefinito l'arricchimento degli elementi radioattivi legati ai gas. Nei casi considerati l'arricchimento avveniva in corrispondenza di settori magmatici apicali e superficiali, in condizioni di debole percolazione gassosa con l'esterno. Ciò significa che durante il processo di arricchimento parte degli elementi radioattivi possono essere usciti dal sistema; l'ampliarsi delle fessure con l'esterno, o l'aumento della pressione interna, hanno interrotto il processo di arricchimento e di degassazione provocando l'effusione di magma, la cui concentrazione in U e Th si era stabilizzata a quel determinato equilibrio.

A spiegare la limitata dispersione verso i valori alti basterebbe forse l'ammettere che, oltre una determinata concentrazione gassosa, il magma debba erompere e che, a quella concentrazione gassosa, in quelle condizioni vulcanologiche particolari, corrisponda il grado di arricchimento in U e in Th osservato. Ci sono tuttavia alcuni fattori che confermerebbero la parziale uscita degli elementi radioattivi con la fase gassosa, ad una determinata pressione parziale dei gas.

Un processo di arricchimento comporta un gradiente di concentrazione, che sarà molto elevato nelle parti sommitali di un serbatoio magmatico. Il gradiente può peraltro venir addolcito da una omogeneizzazione dei tenori, grazie soprattutto ai moti convettivi. Tuttavia, tale

gradiente non è stato osservato neanche in prodotti di effusione i cui « tempi » di arricchimento sono stati relativamente brevi. La frazione più ricca costituisce piccola parte della massa effusa, e si può disperdere in essa. Nel Lazio settentrionale è stata però eseguita un'attenta prospezione radiometrica che avrebbe dovuto rilevare la sporadica presenza di settori più radioattivi nell'ambito dei prodotti vulcanici. La parte arricchita potrebbe peraltro erompere non come lava o ignimbrite, ma come piroclastite. Non è stato però rinvenuto alcun deposito tufaceo con tenori eccezionali in elementi radioattivi.

Che l'uranio possa uscire dal serbatoio magmatico sembra inoltre confermato dalla distribuzione degli elementi radioattivi nelle lave.

La maggiore inomogeneità di distribuzione che si osserva nell'istogramma cumulativo delle lave deriva dalla molteplicità di situazioni che interessano le limitate porzioni di serbatoio dalle quali le lave derivano. In questo caso, alla normale evoluzione per differenziazione per cristallizzazione frazionata, si somma la desilicizzazione e l'indiretto aumento in alcali per assimilazione di carbonati. Dal momento che questo processo si può applicare, in maniera variabile, su ogni termine della gamma di differenziazione normale, ne risulta un campo finale estremamente vasto di tipi magmatici.

A differenza di quanto osservato nel caso delle ignimbriti, nelle lave compare un accenno di massimo di frequenza su tenori molto bassi. Si tratta dei tenori relativi ai magmi che rappresentano l'estremo più femico della serie di differenziazione normale. I tenori si elevano leggermente quando questi tipi sono sintetici per assimilazione di carbonati.

Il successivo massimo di frequenza corrisponde a tipi magmatici evoluti in senso acido per differenziazione normale, successivamente desilicizzati per assimilazione di carbonati. Il processo di arricchimento si spiega analogamente a quello delle ignimbriti, con la differenza che in questo caso, ai gas magmatici, si somma l'effetto della anidride carbonica e dell'acqua derivante dall'assimilazione di calcari. Non si arriva tuttavia ai tenori medi massimi osservati per le ignimbriti. Fa eccezione una fase del vulcano di Vico, le cui lave risentono ormai poco dell'effetto dell'assimilazione di calcari, e preludono, dal punto di vista chimico e chimico-fisico, le grandi espansioni ignimbritiche.

In effetti, l'abbassamento dei tenori massimi e l'alto rapporto Th/U riscontrato nelle lave, troverebbero spiegazione nella perdita degli elementi radioattivi, e più attiva per l'U che per il Th.

A parità di tipo magmatico e di processo di arricchimento, l'intro-

duzione di anidride carbonica dovrebbe costituire un fattore favorevole ad alte concentrazioni di elementi radioattivi nel magma; si dovrebbe inoltre supporre un arricchimento selettivo dell'U rispetto al Th, data la maggior stabilità dei carbonati di uranile. Il verificarsi della situazione inversa indica invece che il gas, oltre a fungere da agente di arricchimento, può fungere da agente disperdente.

A conclusione esaminiamo le possibilità di sfruttamento minerario delle rocce alcaline laziali.

I valori massimi rilevati nelle grandi manifestazioni effusive, sono limitati ad alcune formazioni del vulcano di Vico, e presentano tenori troppo costanti con una dispersione troppo limitata da rendere probabile la possibilità di rinvenire diffusi accentrimenti di elementi radioattivi con tenori maggiori.

La frequenza massima nel Lazio settentrionale è su tenori medi di 25 ppm U e di 110 ppm Th: tali valori portano la provincia alcalino-potassica esaminata al primo posto tra tutte le serie magmatiche note come contenuto in elementi radioattivi.

Sono state inoltre riconosciute formazioni dell'ordine del kmc il cui contenuto medio in U e Th è rispettivamente 45 e 210 ppm. Detti tenori sono quattro volte maggiori di quelli ritenuti già interessanti ai fini estrattivi da ADAMS et al. (1962) su un granito del New Hampshire. Se teniamo conto che nel granito in questione gli elementi radioattivi sono legati a cristalli inclusi nella biotite, mentre nel nostro caso sono legati al vetro, il costo di estrazione notevolmente abbassato rispetto al granito americano, potrebbe portare le rocce alcaline del Lazio settentrionale ai limiti della competitività. A questo va aggiunto che gli elementi radioattivi potrebbero costituire un sottoprodotto della coltivazione di altri elementi contenuti in quantità anomala nelle rocce alcaline laziali. A questo punto il problema diventa campo di studio dei tecnologi.

Ci sarebbero possibilità di mineralizzazioni secondarie conseguenti all'estrazione di U e di Th dal serbatoio magmatico da parte dei gas. Il complesso vulcanico di cui stiamo trattando è però poco eroso, quindi i settori dove l'eventuale fissaggio di elementi radioattivi potrebbe aver avuto luogo, non sono aggredibili all'osservazione diretta.

Desidero ringraziare il Prof. Alfredo Rittmann per la accurata revisione critica del manoscritto. Un ringraziamento particolare va inoltre al Prof. Mario Mittempergher che mi ha seguito in tutte le fasi della ricerca con vivaci e proficue discussioni.

APPENDICE

Strumentazione adottata.

I contenuti di U, Th e K di un campione di roccia possono essere determinati contemporaneamente e in modo rapido mediante spettrometria γ . Poiché questo metodo di analisi è ormai largamente adottato non riteniamo utile dilungarci sulle sue premesse teoriche. Ci limiteremo quindi a dare una rapida descrizione dell'apparecchiatura e dei procedimenti usati, discutendo infine la validità dei risultati ottenuti.

Lo spettrometro da noi usato è costituito da:

— un cristallo di NaI(Tl) di $3'' \times 3''$ della Harshaw con fotomoltiplicatore e preamplificatore incorporato (Integral Line 102 S.E.F. 102);

— un amplificatore rapido mod. 374 costruito dal Laboratorio di Elettronica della Casaccia;

— un analizzatore a 200 canali Laben mod. C 31 Cise.

Per ridurre a un livello accettabile il fondo ambiente, il cristallo è stato schermato mediante un castello di piombo di dimensioni interne $50 \times 50 \times 50$ cm³ e pareti spesse 10 cm. Le pareti interne del castello sono state ricoperte con una lastra di Cd (spessore 0,5 mm), e quindi con una lastra di Cu (spessore 0,4 mm), onde assorbire i raggi X del piombo.

I campioni da analizzare sono macinati a 100 mesh e racchiusi in contenitori cilindrici di 120 cm³. La base del contenitore ha un diametro circa uguale a quello del cristallo su cui si appoggia durante la misura. Il tempo di conteggio varia da 90' a 180', in funzione dell'attività del campione, in modo da ottenere sempre uno spettro con fotopicchi ben individuabili. Il fondo viene sottratto automaticamente dal sistema di conteggio. L'analisi è eseguita mediante confronto con spettri ottenuti da standard a contenuto noto di U, Th e K. Il metodo di valutazione delle aree dei fotopicchi è simile a quello descritto da B. JOUVE e altri (1961).

Per l'analisi del contenuto di U e Th abbiamo scelto i fotopicchi a 0,24 e 0,61 MeV.

Scegliendo picchi a energia inferiore si avrebbe una troppo forte variazione di autoassorbimento in funzione della densità del campione, mentre per i picchi di energia superiore al MeV, la diminuzione di efficienza del sistema di conteggio porterebbe ad allungare troppo il tempo di misura.

Abbiamo inoltre verificato che i risultati delle misure sono indipendenti da:

- la granulometria del campione;
- la sua densità, per valori compresi tra $1,25 \text{ g cm}^{-3}$ e $1,67 \text{ g cm}^{-3}$ quali sono quelli delle polveri da noi analizzate;
- la natura dell'inerte (SiO_2 — CaCO_3 —lava laziale) da cui ottenere gli standard a contenuto noto.

Per evitare errori sistematici, dovuti al metodo di preparazione dei campioni e al sistema di rivelazione e di conteggio, sono state fatte alcune prove, aggiungendo quantità note di uranio a campioni di vulcaniti già analizzati. L'analisi ha dato i seguenti risultati:

	campione puro		campione + 40 ppm di U in equil.
C403	$\left\{ \begin{array}{l} \text{U} = 28 \pm 3 \text{ ppm} \\ \text{Th} = 227 \pm 7 \text{ ppm} \end{array} \right.$	C403	$\left\{ \begin{array}{l} \text{U} = 65 \pm 4 \text{ ppm} \\ \text{Th} = 226 \pm 6 \text{ ppm} \end{array} \right.$
C364	$\left\{ \begin{array}{l} \text{U} = 43 \pm 4 \text{ ppm} \\ \text{Th} = 210 \pm 9 \text{ ppm} \end{array} \right.$	C364	$\left\{ \begin{array}{l} \text{U} = 85 \pm 3 \text{ ppm} \\ \text{Th} = 204 \pm 10 \text{ ppm} \end{array} \right.$

Come si vede dai dati sopra riportati, l'errore aumenta col diminuire della quantità di uranio presente, a causa dell'elevato rapporto Th/U caratteristico delle rocce magmatiche.

Il nostro metodo è stato messo a punto in modo da contenere l'errore entro il 10% su tenori medi dell'ordine delle 30 ppm di U e 120 ppm di Th. Per ottenere, con lo stesso errore, analisi di campioni di rocce magmatiche particolarmente povere, è necessario aumentare il tempo di conteggio e migliorarne la geometria. L'errore sugli standard a contenuto noto non è mai superiore al 3%.

Prima di terminare la parte riguardante l'analisi strumentale facciamo presente che in tutto il lavoro è stato usato il termine tenore in U in luogo di quello reale tenore in rU (radio equivalente U). Infatti i fotopicchi usati per le analisi sono dovuti al contributo del RaTh e ThC'' della famiglia del Th e del RaB e RaC della famiglia del Ra. Tali picchi sarebbero presenti con uguale intensità anche in assenza dei progenitori del Radio. Questa ipotesi è però senz'altro inaccettabile a causa dell'età della roccia, (nota per altra via) che è sufficiente al raggiungimento dell'equilibrio radioattivo anche nel caso in cui, durante i processi di differenziazione, fossero avvenute estrazioni selettive dei vari componenti della famiglia dell'uranio.

A complemento di queste misure sono state eseguite, su una ventina di campioni, delle analisi autoradiografiche per determinare la distribuzione degli elementi radioattivi. Tali analisi, fatte su sezioni sottili di roccia, hanno confermato che più del 90% della radioattività è contenuta nel vetro, la rimanente parte, più che a strutture cristalline è legata ad inomogeneità della roccia. Questa constatazione ci è servita per l'interpretazione degli istogrammi costruiti coi dati analitici.

Elenco dei campioni analizzati ⁽⁵⁾.

VULCANO DI VICO

Lave a fenocristalli di sanidino.

	U ppm	Th ppm		U ppm	Th ppm
C 10	31	125	C 135(*)	26	138
C 15	35	118	C 387	15	90
C 133(*)	30	125	C 390	31	113
C 134(*)	26	145			

(*) da una stessa colata rispettivamente il testo, il nucleo e la base.

Lave a fenocristalli di leucite.

	U ppm	Th ppm		U ppm	Th ppm
C 156(*)	17	100	C 363	33	145
C 345	40	170	C 375	21	110
C 355	8	100	C 389	17	102
C 356(*)	16	95			

(*) da una stessa colata.

Lave a fenocristalli di leucite e di sanidino.

	U ppm	Th ppm		U ppm	Th ppm
C 53(*)	29	200	C 371	43	180
C 54(*)	41	216	C 399	33	300
C 55(*)	35	220	C 403	28	235
C 57(*)	38	210	C 404	40	204
C 58(*)	31	200			

(*) da una stessa colata.

Ignimbrite A: pomici della ignimbrite.

	U ppm	Th ppm		U ppm	Th ppm
C 87	42	184	C 402	55	265
C 95	36	182	C 408	62	249
C 366	57	226	C 410	54	242
C 370	55	210	C 412	52	223
C 386	42	214	C 414	45	219
C 391	50	220	C 438	47	225
C 398	51	253	C 435	61	218
C 393	50	228	C 444	49	199

(⁵) L'errore analitico è contenuto entro il 10%, fatta eccezione per i tenori minimi di uranio (10 ppm), per i quali può arrivare al 25%.

Ignimbrite A: lave microvescicolate.

	U ppm	Th ppm		U ppm	Th ppm
C 149	40	190	C 426	41	206
C 343	38	186	C 428	43	217
C 346	44	190	C 429	33	200
C 373	55	202	C 430	40	167
C 378	26	200	C 431	45	186
C 383	45	210	C 432	38	206
C 385	41	209			

Ignimbrite B: pomici della ignimbrite.

	U ppm	Th ppm		U ppm	Th ppm
C 39	45	210	C 422	49	218
C 116	53	204	C 434	51	214
C 328	38	183	C 349(a)	24	165
C 336	53	204	C 351(a)	31	160
C 342	42	200	C 325(b)	26	89
C 364	43	220	C 417(b)	33	107
C 380	54	210	C 419(b)	24	93
C 406	51	224			

(a) (b) campioni di colate tardive chiudenti il ciclo della ign. B.

Ignimbrite C: pomici della ignimbrite.

	U ppm	Th ppm		U ppm	Th ppm
C 348(a)	26	110	C 405(c)	31	100
C 352(a)	35	122	C 416(c)	21	128
C 394(a)	26	120	C 418(c)	29	100
C 396(a)	24	133	C 421(c)	29	127
C 397(a)	25	110	C 433(c)	23	113
C 400(a)	28	137	C 437(c)	28	119
C 341(b)	26	110	C 439(c)	30	117
C 353(b)	32	144	C 440(c)	20	122
C 357(b)	26	115	C 441(c)	30	102
C 368(b)	27	100	C 442(c)	34	125
C 415(b)	32	114	C 443(c)	27	127
C 324(c)	25	100	C 445(c)	28	130
C 335(c)	26	100	C 447(c)	32	164
C 360(c)	27	110	S 222(c)	22	130
C 379(c)	24	105			

(a) (b) (c) rispettivamente la prima, la seconda e la terza fase di effusione.

Formazione D: pomici della ignimbrite.

	U ppm	Th ppm		U ppm	Th ppm
C 392	43	195	C 413	39	214
C 411	28	199			

VULCANI VULSINI

Lave basiche ricche in leucite e femici.

	U ppm	Th ppm		U ppm	Th ppm
V 6	15	76	V 64	15	69
V 8	10	67	V 87	17	51
V 41	11	76			

Lave a fenocristalli di leucite e molto sanidiniche.

	U ppm	Th ppm		U ppm	Th ppm
V 10	27	132	V 16(*)	24	149
V 12	29	144	V 17	25	145
V 13	30	114	V 18	24	139
V 14	32	142	V 56	24	104
V 15(*)	36	132	V 62	35	132

(*) rispettivamente parte inferiore e parte superiore di una colata.

Ignimbrite 1: pomici della ignimbrite.

	U ppm	Th ppm		U ppm	Th ppm
V 28	23	99	V 31	21	106
V 29	25	116	V 46	28	135
V 30	21	101	V 58	29	96

Ignimbrite 2: pomici della ignimbrite.

	U ppm	Th ppm		U ppm	Th ppm
V 21	19	73	V 57	23	69
V 26	17	109	V 59	22	96
V 27	18	119	V 60	23	97
V 40	20	72	V 61	24	87
V 45	19	83	V 63	19	87
V 53	22	82			

Ignimbrite 3: lava microvescicolata.

	U ppm	Th ppm		U ppm	Th ppm
V 34	15	60	V 50	18	103
V 38	17	71	V 77	12	60
V 44	14	76	V 95	18	76
V 48	18	73			

Lave basiche prive di leucite:

	U ppm	Th ppm		U ppm	Th ppm
V 49	8	37	V 74	10	52
V 52	6	31			

Lave acide sovrassature:

	U ppm	Th ppm		U ppm	Th ppm
V 85	13	59	V 86	14	39

Varie lave microvescicolate:

	U ppm	Th ppm		U ppm	Th ppm
V 19	26	175	V 55	36	174
V 54	28	94			

Settore sanidिनico di una lava leucitica basica: (V 64):

	U ppm	Th ppm
V 65	39	183

VULCANI SABATINI

Ignimbrite I: pomici.

	U ppm	Th ppm		U ppm	Th ppm
S 244	24	95	S 268	17	109
S 248	18	79	S 271	11	109
S 249	20	107			

Ignimbrite I bis: pomici e ceneri.

	U ppm	Th ppm		U ppm	Th ppm
S 266	23	121	S 275	34	119
S 272	33	123	S 280	18	76

Ignimbrite 2: pomici.

	U ppm	Th ppm		U ppm	Th ppm
S 86	21	102	S 246	22	129
S 88	22	113	S 258	19	82
S 239	27	134	S 259	28	114
S 240	27	124	S 270	22	93
S 241	27	123	S 278	32	123
S 242	30	132	S 279	29	122
S 243	25	125	S 284	21	118
S 245	22	106	S 287	19	112

Lave leucitiche basiche a diverso grado di sottosaturazione:

	U ppm	Th ppm		U ppm	Th ppm
S 137	14	62	S 260	10	81
S 255	20	56	S 282	10	34
S 257	39	97	S 286	13	60

Depositi pomicei minori:

	U ppm	Th ppm		U ppm	Th ppm
S 250	20	142	S 269	33	114

Elaborazione dei dati.

Come risulta dalla trattazione svolta finora, il tipo della distribuzione dell'uranio e del torio nelle vulcaniti del Lazio settentrionale, non ha potuto essere affrontato a priori sulle basi di conoscenze teoriche. Infatti, né lo studio geologico e petrografico, né le ipotesi sui più probabili tipi di differenziazione magmatica, erano in grado di permetterci di prevedere un particolare tipo di distribuzione nelle rocce in esame. Abbiamo quindi dovuto rinunciare a qualsiasi tipo di ipotesi di lavoro, cercando di ricavare più informazioni possibili dai dati analitici. E' evidente che è stato necessario adattare i nostri mezzi di indagine a queste condizioni, in modo da avere un sistema analitico che, pur lavorando in routine, fosse capace di fornirci dei dati aventi una sufficiente attendibilità.

Il problema successivo è stato quello di elaborare i dati analitici in modo da ottenere da essi il maggior numero di informazioni, senza peraltro alterarne il contenuto.

Come è noto la trattazione statistica dei valori ottenuti dalle analisi quantitative è molto utile nel caso in cui si abbia a che fare con molti campioni; quando al contrario questi sono pochi si rischia addirittura di falsare la realtà, applicando dei criteri che basano la loro validità principalmente sul grande numero delle prove effettuate.

Se il numero dei dati analitici è minore o uguale a 30 si può avere un'idea della loro distribuzione semplicemente disponendoli in una tabella. Una maggiore evidenza si ottiene però adottando un procedimento grafico che riproduca approssimativamente la forma della distribuzione, cioè costruendo un istogramma. Dividendo però, i dati tra intervalli prefissati si perde sempre una parte del contenuto dell'osservazione originaria (H. CRAMER, 1955) in quanto tutti i valori compresi tra gli estremi vengono attribuiti al centro dell'intervallo stesso.

Considerando che i dati analitici non corrispondono a un punto ma ad un intervallo di ampiezza pari all'errore di cui è affetta la misura, abbiamo pensato di costruire gli istogrammi attribuendo ad ogni valore un rettangolino di area unitaria, con base uguale all'errore analitico, centrata intorno al risultato sperimentale. In realtà, per semplicità di rappresentazione, gli istogrammi presentati sono stati ottenuti variando la base e tenendo costante l'altezza del rettangolino. Questo è stato ritenuto possibile dopo aver verificato in alcuni casi (ignimbrite A e C) che l'andamento generale della curva non veniva deformato in modo apprezzabile da questa approssimazione.

Per la popolazione rappresentata dal maggior numero di campioni (ignimbrite C) abbiamo calcolato, sia per l'uranio che per il torio, il valore medio, la deviazione standard e il coefficiente di variazione, si ha:

U	Th
$\bar{x} = 27,3 \pm 0,7$	$\bar{x} = 118,0 \pm 2,8$
$\sigma = 3,7$	$\sigma = 15$
$V = \frac{\sigma}{\bar{x}} = 13,5\%$	$V = 12,7\%$

Come si vede il coefficiente di variazione è, in ambedue i casi, minore del 15%. A causa di questa piccola dispersione e della scarsa statistica in nostro possesso può sembrare gratuito fare delle ipotesi sulla forma reale della funzione di distribuzione dell'uranio e del torio in queste vulcaniti. Infatti per coefficienti di variazione inferiori a

15-20% è molto difficile poter rivelare la presenza di una eventuale asimmetria. D'altra parte, dagli istogrammi riportati appare che tutte le popolazioni da noi analizzate sono ben rappresentabili da una funzione di distribuzione simmetrica intorno al valore medio, di forma simile a una gaussiana. Poichè questo risulta da diverse serie di campioni, qualunque sia il loro numero, siamo portati ad ammettere che, almeno nel nostro caso, la normalità (gaussianità) delle curve sia reale. Non abbiamo prove sufficienti per dire se questa sia una legge valida generalmente per la distribuzione degli elementi in tracce in rocce vulcaniche vetrose, tuttavia vogliamo tentare di analizzare il significato.

E' stato generalmente riscontrato che la curva di distribuzione degli elementi in tracce nelle rocce ignee non è normale, ma presenta una spesso marcata asimmetria positiva (media aritmetica maggiore della massima frequenza). Poichè in questo caso si avvicina molto di più ad una curva gaussiana la distribuzione dei logaritmi dei tenori che quella dei tenori stessi, AHRENS (1954) ha proposto « la lognormalità degli elementi in tracce nelle rocce ignee » come legge fondamentale della geochimica. A tale enunciato si sono opposti vari autori, tra cui F. CHAYES (1954) i cui argomenti ci sembrano particolarmente convincenti. Indipendentemente dal risultato di questa polemica, vogliamo rilevare che tutte le discussioni sono state fatte sulla distribuzione degli elementi in tracce nelle rocce ignee olocristalline. In queste gli elementi minori sono generalmente legati ad uno o più minerali costituenti la roccia e risentono quindi della legge di distribuzione del minerale interessato. Noi abbiamo invece una situazione totalmente diversa, infatti le rocce da noi analizzate hanno una bassissima cristallinità, ed in essa gli elementi minori si trovano, per il 90% circa, dispersi nel vetro. Poichè l'arricchimento in uranio e torio è piuttosto rilevante il valore medio dei loro tenori è sufficientemente lontano dallo zero per non risentire affatto, anche a causa della bassa dispersione, l'effetto di schiacciamento verso l'origine. Riteniamo quindi che le popolazioni da noi esaminate seguano realmente una legge di distribuzione normale. Tale normalità rispecchia la distribuzione degli elementi in tracce nelle parti di magma emesse, ed è rispondente alle particolari situazioni che si instaurano nella parte eruttibile del magma stesso. Infatti, poichè nel serbatoio magmatico esiste un gradiente di concentrazione, dovuto ai processi di differenziazione in atto, la situazione in esso sarebbe probabilmente meglio rappresentata da una curva con asimmetria positiva.

BIBLIOGRAFIA

- ADAMS J. A. S. (1954) - *Uranium and thorium contents of volcanic rocks*, in Faul H., Ed., *Nuclear Geology*, New York, John Wiley and Sons Inc., pp. 89-98.
- ADAMS J. A. S. (1955) - *The uranium geochemistry of Lassen Volcanic National Park, California*. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, Vol. 8, pp. 74-85.
- ADAMS J. A. S., KLINE M. C., RICHARDSON K. A., ROGERS J. J. W. (1962) - *The Conway granite of New Hampshire as a major low - grade thorium resource*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 48, No. 11, pp. 1898-1905.
- ADAMS J. A. S., OSMOND J. K., ROGERS J. J. W. (1959) - *The Geochemistry of thorium and uranium*. *Phys. Chem. Earth*, Vol. 3, pp. 298-348.
- AHRENS L. H. (1954) - *The lognormal distribution of the elements (A fundamental law of geochemistry and its subsidiary)*. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, Vol. 5, pp. 49-73.
- AHRENS L. H. (1954) - *The lognormal distribution of the elements (2)*. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, Vol. 6, pp. 121-131.
- AHRENS L. H. (1957) - *Lognormal-type distributions - 3*. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, Vol. II, pp. 205-212.
- AHRENS L. H. (1963) - *Lognormal-type distributions in igneous rocks - 4*. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, Vol. 27, pp. 333-343.
- AHRENS L. H. (1963) - *Lognormal-type distributions in igneous rocks - 5*. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, Vol. 27, pp. 877-890.
- AHRENS L. H. (1963) - *Element distributions in igneous rocks - 6. Negative skewness of SiO_2 and K*. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, Vol. 27, pp. 929-938.
- ALBERTI G., BETTINALI C., SALVETTI F. (1958) - *Un interessante caso di disequilibrio in rocce uranifere: accumulo di radio D in tufi vulcanici e sua determinazione*. *Studi e Ricerche della Div. Geomin.*, Vol. 1, Parte 2, pp. 691-698, Roma.
- ALBERTI G., BETTINALI C., GRASSINI G., SILVESTRO F. (1959) - *Prove di lisciviazione sui minerali uraniferi di Canale Monterano*. *Studi e Ricerche della Div. Geom.* Vol. 2, pp. 129-153, Roma.
- AMENDOLAGINE M., DELL'ANNA L., MATTIAS P. P. (1963a) - *I petrischi del vulcano vicano*. *Per. Mineralogia*, anno XXXII, No. I, pp. 157-183, Roma.
- AMENDOLAGINE M., DELL'ANNA L., MATTIAS P. P. (1963b) - *Lave dell'apparato vicano. Zona orientale, Soriano, Canepina, Vignanello, Fabrica*. *Per. Mineralogia*, anno XXXII, No. I, pp. 197-249, Roma.
- ANCARANI L., BETTINALI C. (1960) - *Analisi isotopica dell'uranio e dello zolfo nello studio delle mineralizzazioni di Canale Monterano*. *Studi e Ricerche della Div. Geomin.*, Vol. 3, pp. 455-474, Roma.
- AUBREY K. V. (1955) - *Frequency-distributions of elements in igneous rocks*. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, Vol. 8, pp. 83-89.
- BACHELET F., FERRETTI-SFORZINI M., IPPOLITO F. (1951) - *Studio della radioattività di lave vesuviane*. *Il Nuovo Cimento*, S. 9°, Vol. 8, pp. 851-856, Bologna.

- BLANC G. A. (1908) - *Sulla presenza del torio nel suolo di Roma*. Rend. Acc. Lincei, Vol. 12, Fasc. 3°, pp. 101-106, Roma.
- BONATTI S. (1950) - *Sulla torite di Nettuno (Roma)*. Mem. Soc. Tosc. Sc. Nat., Vol. 57, pp. 182-183, Pisa.
- BONATTI S. (1955) - *Minerali radioattivi di alcune sabbie del litorale laziale*. Atti del I° Convegno di Geologia Nucleare, pp. 17-21, Roma.
- BURRI C. (1961) - *Le province petrografiche postmesozoiche dell'Italia*. Rend. Soc. Min. It. anno XVII, pp. 3-40, Pavia.
- BURRI C., NIGGLI P. (1945) - *Die jungen Eruptivgesteine des mediterranen Orogens*. Vulkaninst. I. Friedländer, Guggenbühl & Huber, Schweizer Spiegel Verlag, Zurich.
- CAGLIOTI V., BETTINALI C., GIARDINI-GUIDONI A., MELE A. (1962) - *Isotopic abundance of some native sulphur and sulphide minerals*, Rapporti Tecnici del C.N.E.N., Geo 9, pp. 202-213, Roma.
- CHAYES F. (1954) - *The lognormal distribution of the elements: a discussion*. Geochim. et Cosmochim. Acta, Vol. 6, pp. 119-120.
- CHEMINEE J. L., NORDEMANN D. (1963) - *Dosage du potassium, de l'uranium, du radium et du thorium, par spectrométrie gamma dans les laves d'Auvergne, du Velay et de la province sicilienne*. Bull. Soc. Géol. France, Serie 7, T. 5, T. 5, pp. 218-231.
- CHERDYNTSEV V. V. et al. (1964) - *Isotopic Composition in Uranium and Thorium in the Supergene Zone*. Geochemistry International, No. 3, pp. 398-401.
- COPPENS R., JURAIN G. (1966) - *Considerations generales sur la distribution de l'uranium dans les roches granitoides*. Geologische Rundschau, Band 55, Heft 2, pp. 427-436.
- COULOMB R., GOLDSZTEIN M. (1961) - *Utilisation d'un spectromètre gamma à 100 canaux dans quelques problèmes de géologie nucléaire*. Bull. Soc. franc. Minér. Crist., Tome 84, pp. 13-19.
- COULOMB R., GOLDSZTEIN M. (1964) - *Geochemical behavior of Ta, Th, Co, Sc, U in lava from the Chaîne Des Puys*. Geochemistry International, No. 5, pp. 1035-1037.
- CRAMER H. (1959) - *The elements of probability theory and some of its applications*. John Wiley & Sons, New York, pp. 1-281.
- CROUTHAMEL C. E. (1960) - *Applied gamma-ray spectrometry*. Pergamon Press, pp. 1-443, Oxford.
- DALL'AGLIO M., TONANI F. (1962) - *Studio idrogeochimico delle acque superficiali del Lazio*. Estr. da Notiziario del C.N.E.N., anno 8, n. 11, pp. 1-25, Roma.
- GIORIA G. (1966) - *Microdeterminazione selettiva dell'Uranio e del Torio nelle rocce e nei minerali mediante autoradiografia*. In corso di stampa.
- GOTTARDI G. (1952) - *La sabbia di Nettuno (Roma)*. Mem. Soc. Tosc. Sc. Nat., Serie A, Vol. 59, pp. 36-62, Pisa.
- GOTTARDI G., MITTEMPERGER M. (1955) - *La sabbia di Ladispoli (Roma)*. Mem. Soc. Tosc. Sc. Nat., Serie A, Vol. 62, pp. 31-48, Pisa.
- GOTTARDI G., MITTEMPERGER M. (1956) - *La sabbia della foce del Garigliano*. Mem. Soc. Sc. Nat., Serie A, Vol. 63, pp. 78-88, Pisa.

- HEIER K. S., COMPSTON W., MC DOUGALL I. (1965) - *Thorium and uranium concentrations, and the isotopic composition of strontium, in the differentiated Tasmanian dolerites*. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, Vol. 29, pp. 643-659.
- HEIER K. S., ROGERS J. J. K. (1963) - *Radiometric determination of thorium, uranium and potassium in basalts and in two magmatic differentiation series*. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, Vol. 27, No. 2, pp. 137-154.
- HEIER K. S., MC DOUGALL I., ADAMS J. A. S. (1964) - *Thorium, uranium and potassium concentrations in Hawaiian Lavas*. *Nature*, Vol. 201, pp. 254-256.
- IPPOLITO F. (1952) - *Sulla radioattività delle lave del Somma-Vesuvio*. *Boll. Soc. Natural.*, Vol. 60 (1951), pp. 53-56, Napoli.
- JIZBA Z. V. (1959) - *Frequency distribution of elements in rocks*. *Geoch. et Cosmochim. Acta*, Vol. 16, pp. 79-82.
- JOUYE B., LANSIART A., LETOLLE R., MORUCCI J. C. (1961) - *Utilisation de la radioactivité naturelle du potassium pour son dosage dans les roches par spectrométrie gamma*. *Bull. Soc. Géol. France, Serie 7*, Tome 3, pp. 533-543.
- KAZACHEVSKII I. V. et al. (1964) - *Isotopic Composition of Uranium and Thorium in the Supergene Zone and in Volcanic Products - Natural Waters and Volcanic Deposits*. *Geochemistry International*, No. 6, pp. 1068-1073.
- KOVALENKO V. I. et al. (1964) - *Behavior of U, Th, Nb, and Ta during Albitization of Granitoids of the Ognitskii Complex (Eastern Sayan Mts.)*. *Geochemistry International*, No. 5, pp. 868-874.
- LARSEN E. S. Jr., PHAIR G. (1964) - *The distribution of uranium and thorium in igneous rocks*, in Faul H. Ed., *Nuclear Geology*, New York, John Wiley and Sons, Inc., pp. 75-89.
- LARSEN E. S. Jr., PHAIR G., GOTTFRIED D., SMITH W. L. (1956) - *Uranium in Magmatic Differentiation*. U. S. Geol. Survey, Profess. Papers, No. 300, pp. 65-74.
- LARSEN E. S. Jr., GOTTFRIED D., MOLLOY M. (1958) - *Distribution of uranium in volcanic rocks of the San Juan Mountains, South-western Colorado*. *Proc. Second United Nations Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva*, Vol. 2, pp. 509-515.
- LARSEN E. S. III, GOTTFRIED D. (1960) - *Uranium and Thorium in selected suites of igneous rocks*. *Am. J. Sci.*, 258-A, pp. 151-169.
- LEBEDEV-ZINOV'YEV A. A. - *Behavior of Uranium and Thorium During the Formation of a Potassic Alkalic Complex in Northern Kazakhstan*. *Geochemistry International*, Vol. 2, No. 1, 1965.
- LEONOVA L. L. (1964) - *Uranium and Thorium in the Variscan Alkalic Intrusives of Southern Tien-Shan (Matcha and Turpi Massifs)*. *Geochemistry International*, No. 5, pp. 925-929.
- LEONOVA L. L., GAVRILIN R. D., BAGREYEV V. V. (1961) - *Behavior of Uranium and Thorium in a Highly Alkalic Intrusive Complex (The Kzyl-Ompul massiv, Northern Tien-Shan)*. *Geochemistry*, No. 12, pp. 1173-1179.
- LEONOVA L. L., BALASHOV YU. A. (1963) - *Distribution of Uranium, Thorium and Rare Earths in the Granitoids of the Susamyr Batholith (Central Tien Shan)*. *Geochemistry*, No. 11, pp. 1047-1055.
- LOCARDI E. (1965) - *Tipi di ignimbrite di Magmi Mediterranei - le ignimbriti del Vulcano di Vico*. *Atti Soc. Tosc. Sc. Nat., Serie A*, Vol. 72, pp. 55-173, Pisa.

- LOCARDI E., MITTEMPERGER M. (1965) - *Study of an uncommon lava sheet in the Bolsena district (Central Italy)*. Bull. Vole., Tome 28, pp. 75-84, Napoli.
- LOCARDI E., MITTEMPERGER M., TEDESCO C. (1962) - *Ricerche sulle mineralizzazioni uranifere connesse ai tufi quaternari del Lazio Settentrionale*. Simposio sulle mineralizzazioni ad uranio della Jugoslavia e dell'Italia, pp. 1-57, Roma.
- MARINELLI G. (1961) - *Genesi e classificazione delle vulcaniti recenti toscane*. Atti Soc. Tose. Sc. Nat., Serie A, Vol. 68, pp. 74-116, Pisa.
- MARINELLI G., MITTEMPERGER M. (1966) - *On the genesis of some magmas of typical Mediterranean (potassic) suite*. In corso di stampa.
- MILLER S. R., GOLDBERG E. D. (1955) - *The normal distribution in geochemistry*. Geochim. et Cosmochim. Acta, Vol. 8, pp. 53-62.
- MODERNI P. (1896) - *Le bocche eruttive dei Vulcani Sabatini*. Boll. Com. Geol. d'It., Vol. 27, No. 1, pp. 57-148, Roma.
- MODERNI P. (1903) - *Contribuzione allo studio geologico dei Vulcani Vulsini (con una carta geologica 1:100.000)*. Boll. R. Com. Geol., Vol. 34, pp. 1-223, Roma.
- POLYKOV A. I., KOT G. A. (1964) - *Geochemistry of Thorium in the Nepheline Syenites of Kola Peninsula*. Geochemistry International, No. 3, pp. 479-488.
- POLYKOV A. I., KOT G. A. (1965) - *Distribution of Thorium Among the minerals of Nepheline Syenites of the Lovozero Massif*. Geochemistry International, Vol. 2, No. 1.
- RICHTER D. H., MOORE J. G. (1966) - *Petrology of the Kilauea iki lava lake, Hawaii*. U. S. Geol. Survey, Prof. Paper, No. 537-B, pp. 1-26.
- RINGWOOD A. E. (1955) - *The principles governing trace element distribution during magmatic crystallization. Part 1: The influence of electronegativity*. Geochim. et Cosmochim. Acta, Vol. 7, pp. 189-202.
- RITTMANN A. (1933) - *Die Geologisch bedingte Evolution und Differentiation des Somma-Vesuviumagma*. Zeitschr. für Vulkan., 15, pp. 8-94, Berlin.
- RITTMANN A. (1962) - *On the mechanism of persistent volcanic activity*. Bull. Vole., Tome 24, pp. 301-313, Napoli.
- RITTMANN A. (1963) - *Les volcans et leur activité*. Masson et C., Parigi.
- RODIONOV D. A. (1965) - *Distribution Functions of the Element and Mineral Contents of Igneous Rocks (traduzione dal russo)*. New York, Consultants Bureau, pp. 1-80.
- ROGERS J. J. W. (1965) - *3. Statistical Test of the Homogeneity of the Radioactive Components of Granitic Rocks*. The Natural Radiation Environment, edited by J. A. S. Adams & M. L. Wayne, Rice University, pp. 51-62.
- ROGERS J. J. W., RAGLAND P. C. (1961) - *Variation of thorium and uranium in selected granitic rocks*. Geochim. et Cosmochim. Acta, Vol. 25, pp. 99-109.
- ROGERS J. J., ADAMS A. S. (1963) - *Lognormality of thorium concentrations in the Conway granite*. Geochim. et Cosmochim. Acta, Vol. 27, pp. 775-783.
- SABATINI V. (1912) - *Relazione preliminare sulla campagna geologica del 1911: Vulcani Vulsini*. Boll. R. Com. Geol. d'It., 43, pp. 1-75, Roma.
- SABATINI V. (1912) - *I vulcani dell'Italia Centrale - Parte II: Vulcani Cimini*. Mem. descr. Carta Geol. d'Ital., Vol. 15, pp. 1-617, con carta geologica 1:75.000, Roma.

- SCHERILLO A. (1933) - *Studi petrografici sulla regione Sabazia (I)*. Per. Mineralogia, Vol. 4, pp. 267-309, Roma.
- SCHERILLO A. (1937) - *Studi petrografici sulla regione Sabazia (II)*. Per. Mineralogia, Vol. 8, pp. 169-178, Roma.
- SCHERILLO A. (1940) - *I tufi litoidi a scorie nere della regione Sabazia e Cimina*. Per. Mineralogia, Vol. 11, pp. 301-338, Roma.
- SCHERILLO A. (1941) - *Studio su alcuni tufi gialli della regione Sabazia orientale*. Per. Mineralogia, Vol. 12, pp. 381-417, Roma.
- SCHERILLO A. (1943) - *Studi petrografici sulla regione Sabazia (III)*. Per. Mineralogia, Vol. 14.
- SCHERILLO A. (1944-1946) - *I vulcani Sabatini*. Boll. Soc. dei Naturalisti, Vol. 55, Napoli.
- SCHERILLO A. (1948) - *La differenziazione magmatica nei Vulcani Sabatini (Lazio)*. Schweiz. Min. Petr. Mitt., Bd. XXVIII, Heft I, pp. 65-70.
- SHAW D. M. (1961) - *Element distribution laws in geochemistry*. Geochim. et Cosmochim. Acta, Vol. 23, pp. 116-134.
- SCHNEIDER H. (1965) - *Petrographie des Lateravulkans und die Magmenentwicklung der Monti Volsini*. (Prov. Grosseto, Viterbo und Orvieto, Italien), pp. 331-455, Dissertationsdruckerei Leeman AG.
- TOLSTOI M. I., OSTAFIICHUK I. M. (1963) - *Some regularities of the distribution of the elements in rocks and their geochemical significance*. Geochemistry, No. 10, pp. 986-991.
- WHITFIELD J. M., ROGERS J. J. W., ADAMS J. A. S. (1959) - *The relationship between the petrology and the thorium and uranium contents of some granitic rocks*. Geochim. et Cosmochim. Acta, Vol. 17, pp. 248-271.
- ZHURAVLEV R. S., OSIPOV D. K. (1965) - *Uranium in the Mafic Rocks of the Patyn and Bol'shaya Kul'-Tayga Massifs of Gornaya Shoriya*. Geochemistry International, Vol. 2, No. 2, pp. 308-312.