

FABRIZIO INNOCENTI

STUDIO CHIMICO-PETROGRAFICO
DELLE VULCANITI DI RADICOFANI

RIASSUNTO. — Viene descritto il piccolo apparato vulcanico di Radicofani (Siena) e studiate le rocce che lo costituiscono. L'esame chimico-petrografico eseguito ha permesso di riconoscere una linea di differenziazione che va da rocce trachibasaltiche formanti la parte più profonda del condotto, attraverso olivin-latiti fino ad olivin-trachiti. Queste ultime costituiscono sia la parte sommitale del vulcano dove ha avuto sede un piccolo lago di lava, sia alcune colate ormai ridotte dalla erosione in limitati brandelli. Il tipo di differenziazione riscontrato viene riportato ad un caso di gaseous transfer. Viene discusso il significato delle vulcaniti di Radicofani nella provincia petrografica toscana.

RESUMÉ. — L'auteur fait une description de l'édifice volcanique de Radicofani. L'étude chimique et pétrographique des roches que le constituent, a permis de reconnaître une évolution de la différenciation, qui, en partant des roches trachybasaltiques qui forment la partie basale de l'édifice, conduit, en passant par des olivin-latites, aux olivin-trachytes, constituent soit le sommet du volcan (où était un petit lac de lave) soit quelques coulées désormais réduites par l'érosion en petites lambeaux isolés. Le type de différenciation reconnue est reconduit à un cas de transfert gazeux. On discute enfin la position des vulcanites de Radicofani dans la province pétrographique toscane.

ABSTRACT. — The author describes the volcanic apparatus of Radicofani (south-eastern Tuscany). The chemical and petrographic study points out a differentiation trend from the trachybasaltic lavas, which form the deepest part of the apparatus, to olivine-trachyte passing through olivine-latite. Olivine-trachyte constitutes the upper part of the volcano (where a lava lake was present), and has been found also in some lava flows, now extremely reduced by erosion. The type of differentiation is reconduced to a case of gaseous transfer. The position of these vulcanites in tusean magmatic province is finally discussed.

Premessa.

L'apparato vulcanico di Radicofani è costituito da un'altura isolata, che raggiunge 896 m s.l.m., posta fra i bacini dei due fiumi Orcia e Paglia. Per la sua posizione geografica, molto vicina al Monte Amiata, da cui è separato dalla profonda valle del Paglia, deve essere considerato come il più orientale fra gli apparati vulcanici recenti della Toscana.

Questo piccolo colle si innalza bruscamente dall'ondulata zona circostante costituita prevalentemente da argilla pliocenica. Alla sommità della rupe vi sono resti di un antico castello medievale, fra cui una torre, molto ben conservata, dove ha sede un osservatorio meteorologico dell'Areonautica Militare.

Nel passato numerosi sono gli studiosi che si sono in qualche modo occupati delle rocce di Radicofani. Tuttavia i lavori che si possono rintracciare al riguardo risentono fortemente di teorie petrologiche ormai ampiamente superate. L'ultimo esauriente ed accurato lavoro petrografico su Radicofani infatti porta la data del 1935 ed è opera di F. Rodolico. Tale Autore compie fra l'altro un particolareggiato riesame dei lavori precedenti, e ad esso è quindi doveroso rimandare il lettore che desideri ragguagli sulla precedente bibliografia.

Il Rodolico in tale studio si limita comunque ad effettuare una descrizione dei tipi litologici da Lui raccolti, senza toccare in alcun modo problemi genetici, e sorvolando anche sui fenomeni di differenziazione che hanno dato origine alle vulcaniti da Lui incontrate. Egli infatti descrive ed analizza tre varietà di rocce che riferisce tutte ad una andesite olivinica: una varietà a massa fondamentale intersertale, talora grigio chiara, talora scura, formante la base dell'apparato vulcanico e costituita da olivina, augite e plagioclasio basico; una varietà a massa fondamentale vetrosa ed infine una scoria rosso mattone o grigia. Le considerazioni di questo Autore sono poi concluse affermando che: « la notevole differenziazione della massa andesitica si rileva solo dal lato della struttura » e non dal punto di vista chimico, avendo riscontrato in tutte le rocce composizioni pressoché identiche.

A conclusioni completamente diverse è giunto l'ultimo Autore che si è occupato, anche se non specificamente, del vulcanismo di Radicofani e cioè G. Marinelli (1961), che in un recente lavoro cerca di inquadrare in una visione genetica unitaria tutte le rocce recenti toscane. Secondo tale Autore le vulcaniti di Radicofani sono da considerarsi come differenziati in senso basico di un magma originario sia-litico di origine anatettica, secondo modalità di differenziazione analoghe a quelle che hanno dato origine ad altri tipi di rocce basiche che si rinvennero in Toscana, sia come inclusi nelle formazioni vulcaniche del M. Amiata e di S. Vincenzo, sia in colate, in filoni od in ammassi subvulcanici, e che ha denominato differenziazione pneumatolitica in senso lato. Egli inoltre ha riconosciuto una differenziazione nell'ambito

dello stesso apparato vulcanico, differenziazione che ha come termini estremi da un lato l'andesite olivinica, che forma la parte basale della struttura, e dall'altro una trachite olivinica a fondo autallotriomorfo di sanidino, che si rinviene come lembi residui di colate nelle zone circostanti.

E' sulla base di questa nuova ed interessante ipotesi di lavoro che mi sono accinto allo studio del vulcanismo di Radicofani, cercando nella puntualizzazione quanto più precisa e dettagliata possibile dei fatti di trovare o meno una conferma ad una teoria apparsa finora come la più convincente, o almeno quella che allo stato attuale delle nostre conoscenze spiega il maggior numero di fatti osservati.

L' apparato vulcanico.

L'apparato di Radicofani costituisce un piccolo vulcano centrale a forma grossolanamente tronco-conica, con diametro basale di circa 400 m, ed altezza intorno al centinaio di metri; la parte sommitale più o meno pianeggiante, ha un diametro di circa 200 m. La sua età non è stata ancora determinata con metodi radiometrici, in ogni modo, la posizione delle colate laviche, che ricoprono le argille azzurre piacentiane, ed in generale l'aspetto del tipo di attività vulcanica nettamente sub-aerea, l'hanno fatto ritenere a tutti gli Autori che se ne sono occupati, come di età quaternaria o al più al limite fra pliocene e quaternario. Con ogni probabilità il ciclo di attività di Radicofani è strettamente legato nel tempo al vicino e più importante apparato amiantino, per il quale è stata determinata un'età assoluta di 430.000 anni (J. F. Evernden, G. H. Curtis 1965).

Le rocce che lo costituiscono sono facilmente erodibili e soggette a franamenti; tracce di frane si trovano infatti un po' ovunque attorno al colle; alcune di esse devono essere state di entità non trascurabile, come ad esempio quella distaccatesi nella parte occidentale, proprio sopra il paese. E' a questo gran numero di frane, notevolmente facilitate dalla natura argillosa del substrato, che si deve sia l'impossibilità di rinvenire alcun contatto fra rocce vulcaniche ed argille plioceniche, sia lo smantellamento dell'apparato. Questo ultimo fatto risulta particolarmente importante in quanto ha portato alla luce una sezione interna dell'originario camino vulcanico, mettendo in evidenza fenomeni altrimenti difficilmente osservabili.

Della parte esterna dell'originario vulcano, costituita con ogni probabilità da scorie, non è rimasto quasi nulla, salvo alcuni accumuli che si rinvencono nella parte alta in posizione nettamente marginale.

La roccia che costituisce la parte basale del condotto è un trachibasalto, talora grigio chiaro, talora molto scuro, quasi nero, compatto ed omogeneo, solo con rarissimi vacuoli. I rapporti fra la varietà grigia e quella scura sono difficilmente rilevabili e comunque piuttosto irregolari; sembra in generale però che la varietà grigia sia sottostante a quella scura. Caratteristica molto vistosa è un orlo di separazione che si sviluppa al contatto fra i due tipi, che peraltro hanno caratteristiche petrografiche pressoché uguali, differenziandosi principalmente per il diverso grado di ossidazione del ferro. Tale orlo, in generale di pochi mm di spessore, è sempre ben visibile per il suo colore rosso ruggine.

La roccia di base affiora per circa 70-80 m di dislivello ed è caratterizzata da una fessurazione colonnare molto evidente. Nelle parti più basse dell'affioramento sono osservabili prismi allungati secondo la verticale, per lo più a base triangolare, nettamente individualizzati. Man mano che si sale però il colonnato da abbastanza regolare diviene irregolare ed è costituito, più che da prismi, da blocchi più o meno distinti, con variazioni di struttura conseguenti alla diversa modalità con cui si è verificato il raffreddamento nelle parti più alte e nelle parti più profonde della stessa massa rocciosa.

Molto frequenti in tutto l'ammasso affiorante sono inclusi di quarzo, alcuni dei quali, visibili anche ad occhio nudo, raggiungono dimensioni di qualche cm (A. Lacroix 1893). I più numerosi però hanno dimensioni variabili attorno ad alcuni mm e sono frequentemente fratturati e con evidenti tracce di dissoluzione; comune è attorno a questi inclusi un orlo di reazione fatto di microliti di clinopirosseni disposti con la direzione di allungamento ortogonale alla superficie esterna dell'incluso stesso (Tav. II, fig. 1).

Salendo verso la sommità del colle, si può rinvenire, grazie ai lavori di costruzione e di ampliamento della nuova strada per la fortezza situata sulla cima del rilievo, al disopra del trachibasalto di base, la parte che può essere considerata come la più interna dell'originario cammino vulcanico. Si tratta di una roccia già di aspetto nettamente differenziabile dal compatto ed omogeneo trachibasalto, in quanto largamente vacuolare e di colore violaceo con toni tendenti ora al rossastro ora al grigio. Le sue caratteristiche macroscopiche e microscopiche per-

mettono di dire che essa occupava la parte del condotto in cui la pressione della colonna magmatica sovrastante permetteva alla fase gassosa, già separata da quella liquida (piromagma), di concentrarsi in piccole bolle che si sarebbero poi man mano ingrandite verso l'alto per coalescenza. L'affioramento principale di questo tipo litologico, che per il suo chimismo può essere definito come una latite olivinica, compare circa 10-15 m al disopra del piccolo ripiano dove è situato il cimitero del paese, e si può seguire lungo un piccolo fronte di cava che ha fornito parte del materiale per la costruzione della massicciata stradale. La potenza di questo livello non è rilevabile con esattezza, però si può logicamente supporre che esso non fosse maggiore di 4-5 m. Infatti è possibile osservare, pochi metri oltre questo affioramento, proprio lungo la strada, un bel passaggio ad una roccia scoriacea e bollosa, che occupa praticamente tutta la parte sommitale del condotto vulcanico, pur presentando aspetti diversi da punto a punto o meglio da quota a quota, in quanto le caratteristiche di insieme di questo tipo litologico dovevano essere fortemente influenzate dalla pressione della sovrastante colonna magmatica. La scoria sommitale infatti diventa sempre più vacuolare verso la vetta, dove assume una colorazione rosso mattone molto intensa. E' possibile rinvenire tale roccia in vari punti, esistendo ancora delle piccole sezioni conservate che permettono una buona osservazione. Tra queste, la migliore è senza dubbio quella che si trova al di sotto delle fondamenta della torre, sul lato sud-occidentale, in una posizione che è probabilmente la più elevata fra quelle in cui affiora la scoria rossa. In ogni modo un fatto vulcanologico di estrema importanza è l'esistenza di numerose « fiammature », ben visibili per la loro colorazione violacea, che nettamente si staglia sul rosso della roccia base. In alcuni punti questi livelletti violacei, ugualmente bollosi e scoriacei, hanno un evidente andamento sinuoso, alternando talvolta fittamente con apparenti livelletti pressoché di uguale spessore e diversa colorazione. Nel complesso le caratteristiche della parte alta dell'apparato vulcanico testimoniano la presenza di moti convettivi, che trovano la loro giustificazione ammettendo l'esistenza di un piccolo lago di lava; il piromagma che veniva ad alimentare l'attività del lago, man mano che arrivava alla superficie doveva perdere i gas che lo costituivano; tali gas, combinandosi col vapor d'acqua e con l'aria, attraverso reazioni esotermiche, dovevano contribuire alla forte deposizione di ematite nel materiale lavico, che veniva a mutare il suo colore da un grigio

violaceo fino al rosso della scoria ormai completamente ossidata. L'esaurimento dell'attività del lago e la conseguente cessazione dei moti convettivi impediva agli ultimi flussi di corrente di piromagma non ancora ossidato di raggiungere la superficie; sono questi i flussi di corrente che ora possiamo osservare sotto forma di lingue o fiamme di una scoria grigio violacea nella massa di lava bollosa ormai completamente arrossata.

Infine dobbiamo ricordare come l'attività del piccolo vulcano abbia generato sicuramente anche dei prodotti lavici che si rinvennero in blocchi smembrati ed isolati fino anche a notevole distanza dal centro effusivo. Purtroppo i residui delle colate sono scarsi e non permettono una ricostruzione precisa dell'andamento originario. Probabilmente oggi ritroviamo soltanto le parti terminali di colate che, scorse su una morfologia differente da quella attuale, si ispessivano nelle porzioni finali, assottigliandosi in quelle centrali. L'erosione successiva determinava poi la scomparsa delle parti più sottili e l'isolamento delle zone frontali di maggiore accumulo. A questa azione distruttrice della natura si è aggiunta anche quella dell'uomo: per la coltivazione dei campi si è reso necessario infatti liberarli dai numerosi blocchi lavici facendoli saltare con piccole cariche esplosive.

Le rocce del condotto.

Descritto brevemente l'apparato vulcanico, passiamo a considerare dal punto di vista petrografico le rocce che lo costituiscono.

Come già si è accennato la roccia che costituisce il tipo fondamentale delle vulcaniti di Radicofani si rinviene nella parte basale e mediana del condotto vulcanico in due varietà massicce ed omogenee di colorazione diversa: la più abbondante è quella grigia scura, l'altra, molto più scarsa è grigio chiara.

La varietà scura presenta al microscopio una struttura porfirica ipocristallina, per la presenza di fenocristalli di olivina, pirosseno monoclino e plagioclasio, immersi in una abbondante massa di fondo a struttura intersertale. I rapporti quantitativi fra i fenocristalli, misurati al contatore per punti, sono risultati i seguenti:

olivina	41.0%	
pirosseno	28.7%	pasta di fondo 73.9%.
plagioclasio	30.3%	

L'olivina è il minerale più abbondante fra i fenocristalli; ha dimensioni medie che si aggirano intorno agli 0.5 mm, superando raramente il mm; ha abito tabulare o prismatico, è sempre più o meno intensamente fratturata e mostra sovente segni di corrosione magmatica; scarsi, ma quasi sempre presenti, minute inclusioni di magnetite e di un altro spinello marrone rossastro per trasparenza.

Per avere una valutazione della composizione di questa olivina, ho effettuato, sulla frazione pesante arricchita al separatore magnetico, la misura al diffrattometro della d_{130} secondo il metodo di Th. G. Sahama e H. S. Yoder (1957). Tale misura ($d_{130} = 2.784 \text{ \AA}$) corrisponde ad un termine con circa il 73% di Fo. Per confermare la diagnosi, ho misurato al T.U. il valore del $2H$, con sfere ad indice 1.649, ed utilizzando il diagramma determinativo corrispondente di A. Poldervaart (1950). Il valore ottenuto ($2H_{\alpha} = 86-87^{\circ}$) indica un termine col 70-73% di Fo. Come si vede le determinazioni effettuate concordano nell'indicare un termine di miscela di tipo crisolito, abbastanza ricco in fayalite.

Caratteristica costante dei fenocristalli olivini è un'alterazione che si sviluppa ai margini dei cristalli, con un sottile orlo, insinuandosi talvolta lungo le fratture fin nelle parti centrali. Il prodotto di alterazione è rappresentato da una sostanza a media rifrazione, di un colore verde generalmente abbastanza intenso, con birifrazione piuttosto bassa e variabile da punto a punto, non di rado mostrante fenomeni di polarizzazione di aggregato. Le caratteristiche ottiche riscontrate permettono di identificare questo prodotto di alterazione come bowlingite, che, come quasi tutti i prodotti di alterazione dell'olivina, non è costituito da un solo minerale, ma rappresenta una sostanza polifase che è stata riconosciuta come costituita generalmente da smettite e clorite (H. G. Wilshire 1958) (Tav. I, fig. 1).

La bowlingite non si rinviene solo come alterazione dell'olivina, ma forma anche delle plaghette irregolari nella massa di fondo, oltre a trovarsi fra gli interstizi dei vari minerali. In questi casi è probabilmente da attribuirsi all'alterazione di una parte dell'originario vetro.

Il pirosseno è meno abbondante dell'olivina fra i fenocristalli ed ha anche dimensioni più piccole di questi ultimi (massimo allungamento per lo più intorno a 0.4 mm). Ha contorno frequentemente arrotondato, talvolta allungato; presenta spesso la geminazione (100) anche polisintetica.

Le caratteristiche ottiche principali sono: incolore o leggermente

giallo verde; birifrazione elevata, positiva con A.A.O. di 54-55°, $c \wedge \gamma = 38^\circ$.

Per avere un'indicazione più precisa sulla composizione di questo minerale, ho eseguito, su un concentrato di pirosseno, la misura al diffrattometro di b e $a \text{ sen } \beta$ secondo il metodo di G. W. Brown (1960). I valori ottenuti ($b = 8.92 \text{ \AA}$, $a \text{ sen } \beta = 9.35 \text{ \AA}$) indicano sul grafico corrispondente, lievemente modificato di recente da K. Viswanathan (1966), un termine augitico molto vicino al diopside. Le caratteristiche ottiche, sulla base del grafico determinativo di Winchel (1945), confermano questa diagnosi.

Il plagioclasio è senza dubbio il minerale più abbondante in senso assoluto di questo tipo litologico. Infatti oltre a rappresentare circa il 30% dei fenocristalli, costituisce il minerale più importante della massa di fondo. A proposito di questo minerale si deve comunque notare che esiste una variazione continua e graduale in dimensioni fra i più grossi fenocristalli ed i microliti.

Frequentemente geminato Albite ed Albite-Carlsbad, dà luogo spesso a tipici aggregati a croce (F. Rodolico 1935); presenta una leggerissima zonatura con zone sottilissime a composizione di poco differente. I fenocristalli plagioclasici e pirossenici sovente si riuniscono in agglomerati e concentrazioni molto caratteristiche, che determinano accenni ad una struttura glomeroporfirica (Tav. I, fig. 2). In tali noduli è scarsissima o assente l'olivina.

La determinazione del contenuto in An dei plagioclasii è stata effettuata otticamente, utilizzando il metodo determinativo recentemente proposto da M. Franzini (1966). Tale metodo, che permette anche una rapida determinazione dello stato termico, consiste nel determinare al T.U. su geminati Albite-Carlsbad gli angoli di estinzione in varie orientazioni della zona simmetrica, partendo dalla posizione di uguale illuminazione ($\lambda = 0^\circ$ o $\lambda = 90^\circ$).

I valori ottenuti hanno indicato un contenuto che si aggira fra l'80% e l'84% di An, con frequenze massime intorno all'82%, mentre il sottile orlo esterno ha una composizione leggermente più acida (74-76 per cento di An).

Valori del tutto analoghi si sono ottenuti misurando gli angoli di estinzione in sezioni normali a [100] secondo il metodo di Rittmann (A. Rittmann, E. E. El-Hinnawi 1961) e misurando l'angolo massimo di estinzione in zona simmetrica su geminati Albite, angolo che è risultato intorno ai 48-49° (M. Franzini 1962).

La determinazione dello stato termico, sebbene debba essere considerata per plagioclasidi di questa basicità come poco significativa, è stata effettuata utilizzando ancora il citato metodo di M. Franzini e sfruttando la curva corrispondente ad una orientazione del geminato Albite-Carlsbad di $\lambda = 10^\circ$. I valori ottenuti (0° e 44°) indicano un termine con l'82% di An, molto vicino alla curva di alta temperatura.

Per ciò che riguarda i più piccoli microliti di plagioclasio della pasta di fondo, ho trovato composizioni comprese fra il 76% ed il 72%. I cristalli di grandezza intermedia fra microliti e più grossi fenocristalli hanno ancora composizione intorno all'80% di An.

Sul plagioclasio, concentrato mediante separazione magnetica ed i liquidi pesanti, ho effettuato al diffrattometro la misura della differenza angolare fra le riflessioni (131) e ($\bar{1}\bar{3}\bar{1}$) secondo il metodo proposto da J. R. Smith e H. S. Yoder (1956) ed utilizzando il grafico determinativo di D. B. Slemmons (1962). Il valore ottenuto ($2\theta_{(131)} - 2\theta_{(\bar{1}\bar{3}\bar{1})} = 2.17^\circ$), si accorda abbastanza bene con le precedenti determinazioni, indicando sulla curva di A.T., una bytownite con circa l'81% di An.

Per concludere dalle determinazioni eseguite si può dedurre che la composizione media di questo minerale corrisponde ad un termine bytownitico, di media basicità, fortemente spostato verso l'A.T..

La pasta di fondo costituisce circa il 74% della roccia ed è formata in larga maggioranza da plagioclasio cui si associano granuli per lo più rotondeggianti di pirosseno. Presente anche il sanidino, in plaghe molto piccole, xenomorfe, ed in quantità che sembrano un po' diverse da campione a campione, sebbene la cosa sia difficilmente valutabile a causa della grana estremamente minuta della pasta di fondo.

Per avere una conferma di queste osservazioni ottiche, ho comunque effettuato un diffrattogramma sulla frazione leggera separata con i liquidi. Dallo spettro sono risultati evidenti le righe del sanidino e, per avere un'utile informazione sulla sua composizione, ho eseguito dopo omogeneizzazione a alta temperatura, la misura della differenza angolare fra le riflessioni ($20\bar{1}$) del feldispato e della (101) del KBrO_3 , aggiunto come standard interno, secondo il metodo di P. M. Orville (1963). La $\Delta 2\theta = 1.05^\circ$ indica un contenuto in feldispato potassico di 67 moli %. Discretamente diffusi nella pasta di fondo sono minerali opachi, magnetite, in minuta granulazione e con frequenti sezioni quadrate, ed ilmenite, in piccoli cristalli aciculari ed in forme scheletriche.

La caratteristica strutturale più importante dei minerali opachi è

il fatto che essi si rinvenivano quasi esclusivamente come granulazioni interstiziali di evidente cristallizzazione finale. Fra gli accessori vi è ancora da segnalare l'apatite, in sottili aghetti e bastoncelli, e rarissimi e minutissimi granuli di un minerale ad alto indice, isotropo, forte mente colorato in marrone scuro, probabilmente da attribuire ad uno spinello. Tale minerale, come già detto, si rinviene sovente incluso nei fenocristalli di crisolito. Presenti infine rare squamette di biotite di cristallizzazione finale.

In tab. 1 vien riportata l'analisi chimica di un campione rappresentativo di questa varietà (camp. R 1), con i valori della norma, i parametri di Niggli e di Rittmann.

TABELLA 1.

		Norma		Parametri di Niggli		Parametri di Rittmann	
SiO ₂	52.95			si	136	SiO ₂	52.95
Al ₂ O ₃	16.43	Q	1.5	al	24.3	Al	14.78
Fe ₂ O ₃	2.33	Or	19.1	fm	44.6	Alk	6.11
FeO	3.89	Ab	17.5	c	21.3	CaO	7.92
MnO	0.12	An	26.6	alk	9.8	FM	23.76
MgO	8.51	Wo	4.2	k	0.52	k	0.53
CaO	7.92	En	23.5	mg	0.71	an	0.41
Na ₂ O	1.90	Hy	3.2	ti	1.8	ca''	2.72
K ₂ O	3.26	Mt	2.4	p	0.3	σ	2.67
TiO ₂	0.93	Ilm	1.4				
P ₂ O ₅	0.27	Cp	0.6				
H ₂ O-	0.55						
H ₂ O+	1.20						
	100.26						

Il tipo magmatico di Niggli più vicino è quello « sommaidioritisch »; secondo la classificazione di Rittmann la roccia, a carattere seriale pacifico medio, cade proprio al limite fra i campi delle latite e dei trachibasalti-trachandesiti. Considerando le caratteristiche mineralogiche ed il valore decisamente elevato del parametro FM, ritengo che a questo tipo litologico convenga attribuire il nome di *trachibasalto*.

Dei numerosi inclusi di quarzo già si è accennato. Solo in un campione ho potuto riscontrare la presenza di un incluso, probabilmente argilloso, a forma lenticolare, ormai quasi completamente omogeneizzato, i cui margini erano segnati da granuli di uno spinello di colore marrone rossastro presenti anche all'interno dell'incluso e con caratteri di forte riassorbimento.

Il tipo litologico chiaro, che fa passaggio netto al trachibasalto nero, ha caratteristiche petrografiche estremamente vicine alla roccia precedentemente descritta.

Le sole differenze che si possono riscontrare sono una generale minore alterazione dell'olivina (crisolito $2H_a = 86-87^\circ$) che anzi in molti campioni risulta praticamente fresca, ed una minore quantità di vetro nella pasta di fondo. E' proprio in quest'ultima del resto che è possibile rilevare le maggiori differenze. Oltre al plagioclasio (bytownite) in microliti, si osserva piuttosto abbondante feldispato potassico, in minuti granuli xenomorfi, a cui si associano esili squamette di biotite pleo-croica sui toni del marrone rossiccio. La pasta di fondo sovente mostra una struttura a tendenza granofirica.

Il feldispato potassico mostra un $2V_a$ intorno a 28° e P.A.O. parallelo a (010); il contenuto in Or, misurato ai raggi X sulla frazione leggera secondo il metodo precedentemente descritto, è risultato di 70 moli % ($\Delta\theta = 1.02^\circ$). I dati ottici e roentgenografici confermano che si tratta di un termine della serie sanidino-albite di alta temperatura secondo la classificazione di O. F. Tuttle (1952).

L'analisi chimica di questo tipo litologico (camp. R 8, tab. 2) è sostanzialmente uguale a quella precedente. La lieve differenza nel rapporto Fe_2O_3/FeO è con ogni probabilità da ascrivere al minor stato di trasformazione di questa varietà rispetto al trachibasalto di base. Anche in questo caso la roccia deve essere considerata un *trachibasalto*.

TABELLA 2.

		Norma	Parametri di Niggli	Parametri di Rittmann	
SiO ₂	53.20			SiO ₂	53.20
Al ₂ O ₃	16.06			Al	14.45
Fe ₂ O ₃	2.06	Or	20.5	si	131
FeO	4.54	Ab	16.5	al	24.3
MnO	0.10	An	25.1	fm	44.6
MgO	8.77	Wo	5.3	e	21.3
CaO	8.13	En	24.2	alk	9.8
Na ₂ O	1.87	Hy	4.0	k	0.52
K ₂ O	3.53	Mt	2.2	mg	0.71
TiO ₂	1.20	Ilm	1.6	ti	2.2
P ₂ O ₅	0.30	Cp	0.6	p	0.29
H ₂ O-	0.20				
H ₂ O+	0.55				
	100.51				

Infine si deve considerare un'altra varietà estremamente vicina alle rocce trachibasaltiche ora descritte, varietà che si rinviene nella parte sommitale del rilievo, in posizione nettamente marginale e che, come già accennato, doveva rappresentare una parte esterna del primitivo apparato vulcanico. Questa varietà presenta un colore grigio più o meno scuro, con minute piccole bolle ed è quasi scoriacea. Al microscopio mostra una struttura porfirica per la presenza di fenocristalli di plagioclasio, olivina iddingsitizzata e pirosseno nella massa di fondo che è quasi esclusivamente vetrosa (Tav. II, fig. 2). L'analisi modale eseguita su questa roccia ha dato i seguenti risultati:

olivina	38.1%		
pirosseno	26.0%	pasta di fondo	76.9%
plagioclasio	35.9%		

Plagioclasii e pirosseni si presentano ancora frequentemente agglomerati in modo del tutto analogo a quanto avveniva nella parte basale.

L'olivina dà, come al solito, origine a fenocristalli di dimensione più grande degli altri. Presenta un orlo di alterazione iddingsitica di colore rossastro con alta birifrazione. In alcuni casi questa alterazione occupa una larga parte dei cristalli, che sono sempre arrotondati e corrosi. Il $2H_{\alpha}$ è risultato di 86-87°, corrispondente a un crisolito col 27-30% di Fa (A. Poldervaart 1950).

Il pirosseno ha caratteri ottici analoghi a quelli precedentemente osservati ($2V_{\gamma} = 52-54^{\circ}$, $c \wedge \gamma = 38^{\circ}$). I parametri di Brawn ($b = 8.91 \text{ \AA}$, $a \text{ sen } \beta = 9.35 \text{ \AA}$) corrispondono ad un termine che cade al limite fra i campi dell'endiopside e dell'augite.

Il plagioclasio presenta dimensioni piuttosto variabili; oltre che in grossi fenocristalli, che raggiungono 0.5 mm di lunghezza, si rinviene in più piccoli granuli che arrivano a formare dei veri e propri microliti immersi nella pasta vetrosa. Le differenze nelle dimensioni variano, come per i precedenti campioni, in modo graduale. E' presente una leggera zonatura. Le determinazioni ottiche effettuate al T.U. con i metodi prima descritti, hanno indicato un contenuto in An dell'80-84%, per le parti centrali più grosse, con sottilissimi orli che arrivano fino al 70% di An. Per i granuli di dimensione intermedia, come per i più piccoli microliti ho ottenuto composizioni che si aggirano tutte sull'80% di An. L'A.A.O. delle parti centrali dei fenocristalli è risultato

di 87° sulla bisettrice α ; tale valore è in buon accordo con le determinazioni precedenti, corrispondendo sulle curve di G. W. Smith (1958) ad un termine con circa l'86% di An di A.T. . Per avere una conferma della composizione chimica del plagioclasio, e nello stesso tempo una misura della sua composizione media particolarmente precisa, ho effettuato la determinazione dell'indice di rifrazione del vetro ottenuto dalla fusione di alcuni granuli opportunamente separati. La misura è stata effettuata col metodo della doppia variazione ed ho ottenuto, per $\lambda = 589 \text{ m}\mu$, $n = 1.558$. Tale valore sulla curva determinativa di J. F. Schairer ed altri (1956), corrisponde ad una bytownite con l'82% di An.

La massa di fondo, a tessitura ialopilitica, è costituita in larghissima parte da vetro in cui sono immersi microliti plagioclasici e più rari granuli pirossenici. Il vetro ha indice superiore al balzamo ed è di colore marrone scuro. Molto diffusa è nella pasta di fondo una granulazione di ossidi di ferro, magnetite ed ematite, estremamente minuti. In questo tipo litologico ho potuto rinvenire ancora numerosi inclusi in larga maggioranza di quarzo, associati ad altri, probabilmente in origine argillosi, ormai completamente assimilati. Caratteristica di questi inclusi è una granulazione localizzata di uno spinello di un colore verde bruno profondo. L'analisi chimica di un campione rappresentativo di questo tipo litologico (camp. R 3) è riportata, insieme ai relativi calcoli petrochimici, in tab. 3.

TABELLA 3.

		Norma	Parametri di Niggli	Parametri di Rittmann	
SiO ₂	51.65			SiO ₂	51.65
Al ₂ O ₃	17.71			Al	15.94
Fe ₂ O ₃	1.87	Q	si 128	Alk	6.24
FeO	4.39	Or	al 25.9	CaO	8.34
MnO	0.08	Ab	fm 41.9	FM	22.6
MgO	7.91	An	e 22.2	k	0.6
CaO	8.34	Wo	alk 10.0	an	0.44
Na ₂ O	2.07	En	k 0.49	ca''	2.52
K ₂ O	3.14	Hy	mg 0.69	σ	3.14
TiO ₂	1.05	Mt	ti 1.9		
P ₂ O ₅	0.35	Ilm	p 0.29		
H ₂ O-	0.19	Cp			
H ₂ O+	1.24				
	99.99				

Il tipo magmatico di Niggli più vicino è ancora quello « sommatioritisch », mentre secondo la classificazione di Rittmann la roccia rientra nel campo delle olivin-latiti, molto vicina al campo delle trachiandesiti-trachibasalti.

In posizione geometricamente sovrastante la roccia trachibasaltica di base incontriamo, in una zona che forse è la più interna del condotto, una lava vacuolare, di colore violaceo, ora più chiaro ora più scuro, che fa immediatamente passaggio alla scoria che costituisce la parte terminale dell'apparato vulcanico (camp. R 4).

La composizione chimica di questa varietà è riportata in tab. 4, insieme alla norma, i parametri di Niggli e di Rittmann. Il tipo magmatico di Niggli che più si avvicina è quello « lampro-sommatisch »; secondo la classificazione di Rittmann la roccia cade nel campo delle latiti oliviniche. Il valore dell'indice seriale, $\sigma = 3,52$, la caratterizza come un termine alcalicalcico medio.

TABELLA 4.

		Norma		Parametri di Niggli		Parametri di Rittmann	
SiO ₂	52.95			si	132	SiO ₂	52.95
Al ₂ O ₃	15.45			al	22.7	Al	13.9
Fe ₂ O ₃	2.58	Q	0.2	fm	47.3	Alk	6.77
FeO	3.85	Or	24.8	e	19.2	CaO	7.15
MnO	0.10	Ab	15.3	alk	10.8	FM	25.18
MgO	9.13	An	22.1	k	0.62	k	0.62
CaO	7.15	Wo	4.2	mg	0.72	an	0.34
Na ₂ O	1.71	En	25.3	ti	2.4	ca''	2.87
K ₂ O	4.21	Hy	2.8	p	0.6	σ	3.52
TiO ₂	1.28	Mt	2.7				
P ₂ O ₅	0.47	Ilm	1.7				
H ₂ O-	0.18	Cp	0.9				
H ₂ O+	0.45						
	99.51						

Al microscopio la roccia risulta nettamente vacuolare e presenta una struttura porfirica (Tav. III, fig. 1). I fenocristalli però sono costituiti quasi esclusivamente da olivina e pirosseni, mostrandoci le stesse caratteristiche ottiche riscontrate in precedenza. Il plagioclasio infatti costituisce in larga maggioranza la pasta di fondo, ipocristallina ed intersertale, in minutissimi microliti. Solo in rarissimi casi dà origine a

crystalli che si staccano, per dimensioni, dalla pasta di fondo, senza peraltro raggiungere quelle dei fenocristalli. La composizione del plagioclasio è simile a quella precedente; forse è più sensibile una zonatura, che conduce da nuclei ben sviluppati bytownitici (80-82% di An), attraverso un orlo intermedio ben definito, anche se sottile, ad un esiguo margine più acido (labradorite acida). Nella pasta di fondo, accanto all'abbondante plagioclasio, si rinviene discretamente rappresentato, in squamette xenomorfe, un minerale incolore, a rifrazione inferiore al balsamo e a birifrazione bassa, che penso sia sanidino. Minutamente diffusi ossidi di ferro, magnetite ed ematite.

Un fatto interessante da notare è che l'olivina si presenta in questa varietà alterata in prodotti iddingsitici, colorati in rosso, ad alta rifrazione e birifrazione. L'iddingsite costituisce per lo più sottili orli attorno ai fenocristalli. Non mancano però individui che sono totalmente o quasi sostituiti da iddingsite, mentre altri sono trasformati in ossidi di ferro generalmente concentrati ai margini e sostanze isotrope a colorazione piuttosto intensa sui toni del marrone rossastro (clorofaite). Il numero di questi fenocristalli completamente alterati è comunque piuttosto scarso.

I rapporti quantitativi fra i fenocristalli sono risultati i seguenti:

olivina	65.6%		
pirosseno	31.9%	pasta di fondo	83.7%
plagioclasio	2.5%		

La parte sommitale del condotto è rappresentata da una scoria rossa, che diventa più bollosa nelle parti superficiali e che occupa la zona in cui ebbe vita il presunto lago di lava. L'aspetto è piuttosto variabile da punto a punto e vi sono caratteristiche sottili linee di flusso, in alcuni punti piuttosto numerose, di colore violaceo, costituite anch'esse da materiale scoriaceo. La differenza fra la zona arrossata e quella violacea o bruna risiede nel diverso grado di alterazione dei fenocristalli, rappresentati quasi esclusivamente da olivina e pirosseno. Mentre nelle porzioni violacee i cristalli di pirosseno ed in particolare quelli di olivina non sono affatto alterati o presentano solo un sottile orlo iddingsitico, nelle parti più rosse l'alterazione è molto intensa: dei vecchi fenocristalli olivinici non rimane spesso che scheletri, segnati da ossidi di ferro; in generale comunque l'olivina è completamente

sostituita da prodotti iddingsitici e clorofaeitici. Le differenze sensibili nel grado di alterazione avvalorano l'ipotesi che le parti violacee o brune rappresentino originari flussi di corrente di piromagma che andava alimentando l'attività del lago di lava.

La pasta di fondo, vestrosa, presenta in alcuni punti accenni a strutture di devetrificazione. Nei campioni prelevati nella parte più alta dell'affioramento, si possono osservare strutture caratteristiche derivanti dalla saldatura di piccole scorie che simulano una struttura eutaxitica. Questo significa che l'attività del lago di lava si è andata esaurendo attraverso dei deboli lanci di scorie, parte delle quali ricadeva nel lago rinsaldandosi.

In tab. 5 è riportata l'analisi chimica della varietà sommitale più rossa (camp. R A), insieme ai calcoli petrochimici. Secondo la classificazione di Rittmann la roccia cade al limite fra i campi delle latiti oliviniche e delle trachiti-oliviniche; dato il valore già sensibilmente alto degli alcali, ed in particolare del K_2O , penso che sia preferibile chiamare questa roccia *trachite olivinica*.

TABELLA 5.

SiO ₂	54.15						
Al ₂ O ₃	15.74						
Fe ₂ O ₃	6.68						
FeO	0.40	Q	3.3	si	144	SiO ₂	54.15
MnO	0.09	Or	28.6	al	24.6	Al	14.16
MgO	7.05	Ab	16.3	fm	42.6	Alk	7.54
CaO	7.01	An	20.6	e	20.0	CaO	7.01
Na ₂ O	1.82	Wo	4.7	alk	12.8	FM	21.32
K ₂ O	4.81	En	19.6	k	0.63	k	0.64
TiO ₂	1.40	Hm	4.7	mg	0.66	an	0.30
P ₂ O ₅	0.40	Ilm	0.8	ti	2.88	ca''	3.04
H ₂ O-	0.11	Cp	0.8	p	0.48	σ	3.94
H ₂ O+	0.47	Ru	0.6				
	100.13						

Le colate.

Come già accennato nella descrizione dell'apparato vulcanico, oggi possiamo rinvenire solo esigui lembi residui di vecchie colate, il cui numero e la cui successione non sono affatto ricostruibili. Inoltre gli affioramenti tendono progressivamente a ridursi per effetti naturali ed artificiali, sia in estensione che in numero.

In ogni modo dall'esame delle parti residue, probabilmente tutte più o meno rimaneggiate, è possibile stabilire che oltre a colate di natura trachibasaltica (Poggio Sassetta, Scaramella), caratterizzate da una composizione mineralogica praticamente identica a quella delle varietà basali dell'apparato centrale, vi è stata un'emissione di lave differenti dal punto di vista chimico e mineralogico rispetto a quelle finora incontrate, e che presumibilmente rappresentano i più estremi differenziati rinvenibili a Radicofani.

I residui di questo tipo di attività sono localizzati in modo particolare ad oriente del paese, in località Poggio Casano; ma si trovano anche in piccoli lembi nella parte settentrionale, sia in località Selva maggiore sia in prossimità del Km 160 della via Cassia.

Di questi tipi litologici descriverò solo il campione raccolto a Poggio Casano, essendo gli altri praticamente identici; unico fatto da rilevare è il suo maggior grado di cristallinità e la grana maggiore della pasta di fondo, che lo fanno attribuire alla parte più interna di una colata.

Al microscopio la roccia (camp. RC, Tav. III, fig. 2) appare distintamente porfirica per la presenza di fenocristalli olivini ($2H_{\alpha} \approx 88^{\circ}$) fortemente corrosi e con orlo iddingsitico ben pronunciato e pirosseni colorati pallidamente in verde ($2V_{\gamma} = 52-54^{\circ}$, $e \wedge \gamma = 38-40^{\circ}$), anch'essi un po' arrotondati. La pasta di fondo, costituita da pochissimo vetro leggermente colorato in giallo verde, si presenta formata da abbondante feldispato potassico (le dimensioni massime raggiungono 0.2 mm). Tale minerale costituisce circa il 28% in volume della roccia; spesso include piccolamente biotite, che è abbastanza ben rappresentata sia in squamette allungate che in piccole plaghe ($2V_{\alpha} = 20-24^{\circ}$, $\alpha =$ lievemente marroncino, quasi incolore, $\beta = \gamma =$ marrone bruno). Abbondante è anche una minutissima granulazione formata principalmente da pirosseno a cui si associano sottili squamette di biotite, rari microliti di plagioclasio e granuli di magnetite e ilmenite. Fra gli accessori discretamente rappresentata è l'apatite, in lunghissimi e sottili aciculi o in prismetti.

Il feldispato potassico, perfettamente limpido e incolore, presenta un $2V_{\alpha}$ di circa 26° , con P.A.O. parallelo a (010). La determinazione eseguita al diffrattometro di $\Delta 2\theta$ sulla frazione sialica omogeneizzata ad alta temperatura, indica un contenuto in Or di 73 moli %. I dati

ottici e roentgenografici indicano che si tratta di un termine della serie sanidino-albite di alta temperatura (O. F. Tuttle 1952). I rapporti quantitativi fra i fenocristalli sono risultati i seguenti:

olivina	66.8%	pasta di fondo	78.3%
pirosseno	33.2%		

In tab. 6 è riportata l'analisi chimica di questo campione. Il tipo magmatico di Niggli che più si avvicina è quello lampro-sommaitisch; dai parametri di Rittmann la roccia, a carattere seriale debolmente mediterraneo, è da considerarsi una *trachite olivinica*.

TABELLA 6.

		Norma		Parametri di Niggli		Parametri di Rittmann	
SiO ₂	54.10					SiO ₂	54.10 ^a
Al ₂ O ₃	14.34					Al	12.90 ^a
Fe ₂ O ₃	2.76	Or	32.0	si	139	Alk	7.89
FeO	3.46	Ab	14.6	al	21.6	CaO	6.52
MnO	0.09	An	15.6	fm	47.7	FM	24.8
MgO	9.07	Wo	5.4	e	17.9	k	0.69 ^a
CaO	6.52	En	24.9	alk	12.8	an	0.24
Na ₂ O	1.64	Hy	1.8	k	0.68	ca	3.52
K ₂ O	5.43	Mt	2.9	mg	0.72	σ	4.50 ^a
TiO ₂	1.35	Ilm	1.8	ti	2.6		
P ₂ O ₅	0.47	Cp	1.0	p	0.6		
H ₂ O-	0.20						
H ₂ O+	0.65						
	100.08						

Chimismo ed evoluzione magmatica.

I dati analitici relativi alle rocce studiate sono riassunti in tab. 7; nella tab. 8 sono riportati i valori di parametri di Niggli e quelli normativi.

Se da un lato la caratterizzazione del magma che ha dato origine alle vulcaniti di Radicofani può essere immediatamente derivata dall'esame dei parametri di Niggli, dall'altro è necessario notare che le variazioni chimiche riscontrate sono piuttosto piccole, tanto da poter essere più utilmente discusse sulla base delle percentuali analitiche.

TABELLA 7.

	R 1	R 8	R 3	R 4	R A	R C
SiO ₂	52.95	53.20	51.65	52.95	54.15	54.10
Al ₂ O ₃	16.43	16.06	17.71	15.45	15.74	14.34
Fe ₂ O ₃	2.33	2.06	1.87	2.58	6.68	2.76
FeO	3.89	4.54	4.39	3.85	0.40	3.46
MnO	0.12	0.10	0.08	0.10	0.09	0.09
MgO	8.51	8.77	7.91	9.13	7.05	9.07
CaO	7.92	8.13	8.34	7.15	7.01	6.52
Na ₂ O	1.90	1.87	2.07	1.71	1.82	1.64
K ₂ O	3.26	3.53	3.14	4.21	4.81	5.43
TiO ₂	0.93	1.20	1.05	1.28	1.40	1.35
P ₂ O ₅	0.27	0.30	0.35	0.47	0.40	0.47
H ₂ O ⁻	0.55	0.20	0.19	0.18	0.11	0.20
H ₂ O ⁺	1.20	0.55	1.24	0.45	0.47	0.65
	100.26	100.51	99.99	99.51	100.13	100.08

TABELLA 8.

	R 1	R 8	R 3	R 4	R A	R C
Q	1.5	—	-0.9	0.2	3.3	—
Or	19.1	20.5	18.6	24.8	28.6	32.0
Ab	17.5	16.5	19.0	15.3	16.3	14.6
An	26.6	25.1	29.6	22.1	20.6	15.6
Wo	4.2	5.3	4.0	4.2	4.7	5.4
En	23.5	24.2	21.8	25.3	19.6	24.9
Hy	3.2	4.0	3.8	2.8	—	1.8
Mt	2.4	2.2	2.0	2.7	—	2.9
Ilm	1.4	1.6	1.4	1.7	0.8	1.8
Cp	0.6	0.6	0.7	0.9	0.8	1.0
Hm	—	—	—	—	4.7	—
Ru	—	—	—	—	0.6	—
si	136	131	128	132.4	144.3	138.8
al	24.3	23.3	25.9	22.7	24.6	21.6
fm	44.6	45.4	41.9	47.3	42.6	47.7
e	21.3	21.4	22.2	19.2	20.0	17.9
alk	9.8	9.9	10.0	10.8	12.8	12.8
k	0.52	0.55	0.49	0.62	0.63	0.68
mg	0.71	0.71	0.69	0.72	0.66	0.72
ti	1.8	2.2	1.9	2.4	2.88	2.62
p	0.3	0.29	0.29	0.6	0.48	0.6

Il carattere alcalicalceico delle rocce studiate, già messo in evidenza dall'indice seriale di Rittmann, è sottolineato dai valori di c normali, compresi fra 18 e 22; i rapporti alk/al (fig. 1) mostrano come le rocce

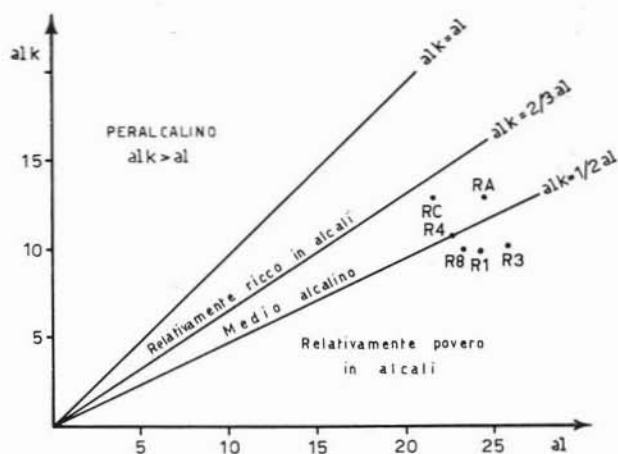


Fig. 1.

esaminate cadano nel campo dei magmi «relativamente poveri in alcali»; soltanto i campioni RA e RC, cioè gli estremi differenziati olivin-trachitici della parte alta dell'apparato e delle colate, superano la linea $alk = 1/2 al$, rientrando nei tipi «medio alcalini».

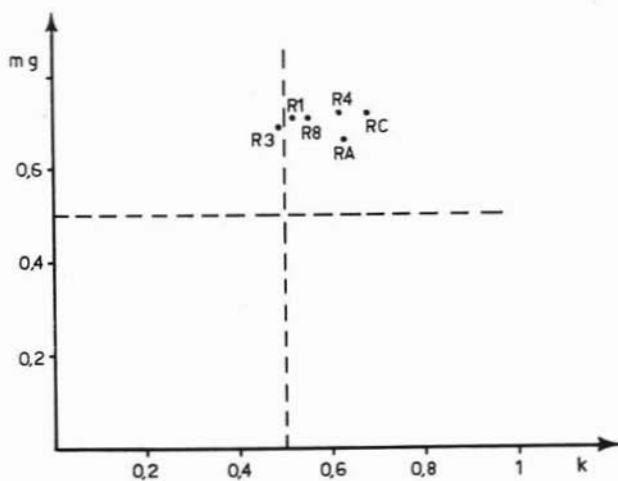


Fig. 2.

I valori di fm , piuttosto elevati, compresi fra 42 e 48 e quelli di al costantemente più bassi del normale, fra 21.5 e 26, indicano il carattere femico del tipo magmatico. Infine particolarmente interessante è osservare l'andamento dei parametri mg , piuttosto costanti su valori elevati, e k , che tende invece ad aumentare, dimostrando l'arricchimento in potassio dei differenziati estremi (fig. 2).

Complessivamente la caratterizzazione chimica è ben individuata anche dalla posizione delle rocce esaminate nel diagramma QLM. Dall'esame della fig. 3 si vede infatti come esse occupino un campo appena al disotto della linea di saturazione, campo in cui sono localizzate le rocce genericamente basaltiche della serie alcalicalcaica.

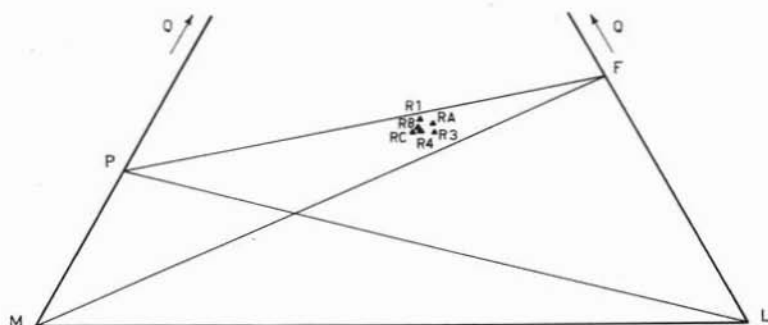


Fig. 3.

Vediamo ora di definire particolareggiatamente le differenze chimiche fra i vari tipi litologici e quindi di individuare con maggior precisione l'evoluzione subita dagli stessi.

I caratteri che vengono immediatamente messi in evidenza dallo esame dei dati analitici possono essere riassunti nei seguenti punti:

a) le rocce trachibasaltiche che costituiscono la parte principale dell'apparato vulcanico (camp. R 1, R 8, R 3) mostrano una notevole omogeneità. Solo il camp. R 3 presenta l'allumina in quantità lievemente superiore agli altri. Esse presentano come caratteristica fondamentale un basso valore del rapporto Fe/Mg ed il potassio predominante sul sodio;

b) nei differenziati del condotto e nelle lave olivin-trachitiche si osserva che mentre la silice tende lievemente ad aumentare, l'allumina varia, ugualmente in modo poco marcato, ma in senso opposto;

c) ferro e magnesio si mantengono su valori costanti con leggero aumento di MgO, che passa da valori intorno all'8.5% a circa il 9% nei differenziati. A questo proposito vi è da osservare la forte diminuzione di MgO nella scoria olivin-trachitica della vetta (7.05%). Questo fatto è però facilmente spiegabile se si considera il forte stato di alterazione dei fenocristalli olivini, i quali, come già si è detto nella descrizione petrografica, sono quasi completamente sostituiti da prodotti iddingsitici e clorofaeitici. E' noto infatti (H. G. Wilshire 1958) che tale tipo di alterazione dell'olivina si compie con notevoli variazioni chimiche. I fatti che sembrano verificarsi in questo processo sono l'ossidazione del ferro e l'allontanamento selettivo del magnesio, con aumenti del rapporto Fe/Mg talora molto forti, mentre la silice sembra rimanere pressoché invariata;

d) il calcio diminuisce in modo continuo dal trachibasalto ai differenziati e scende dall'8% circa fino al 6,5%;

e) gli alcali aumentano sensibilmente passando da poco più del 5% del trachibasalto al 7% delle olivin-trachiti delle colate. La variazione riguarda però solamente il potassio, in quanto i valori del sodio si mantengono praticamente costanti;

f) esiguo ma continuo aumento di TiO_2 e P_2O_5 .

Dall'esame petrografico precedentemente riportato e dalle variazioni chimiche ora sottolineate, risulta che i fatti principali che caratterizzano la differenziazione delle vulcaniti di Radicofani sono come già sottolineato da G. Marinelli (1961), da un lato la coesistenza di minerali pesanti quali olivina e pirosseno diopsidaugitico, con sanidino nei differenziati più spinti, e dall'altro un arricchimento sensibile in alcali. Il primo fatto dice chiaramente che le condizioni vulcaniche erano tali da impedire qualunque separazione gravitativa di cristalli che potesse avere un qualche effetto sensibile sul chimismo del magma. Probabilmente il tempo di vita del piccolo lago di lava deve essere stato piuttosto breve, in modo tale che i moti convettivi che lo alimentavano erano sufficienti ad operare un rimescolamento meccanico dei fenocristalli femici presenti.

Considerando ora sia le condizioni vulcaniche descritte (forma-

zione di un lago di lava alimentato da un piromagma che diveniva gradatamente e con continuità relativamente tranquilla sempre più schiumeggiante per la coalescenza delle piccole bolle gassose) sia le variazioni chimiche prodotte dalla differenziazione, è naturale supporre che questa ultima sia avvenuta mediante un trasporto selettivo di alcali in fase gassosa, mediante cioè un tipico processo di « gaseous transfer ». Vediamo infatti che il primo stadio di arricchimento in alcali, con passaggio dal trachibasalto alla latite olivinica, si verifica proprio nella posizione in cui il piromagma diveniva più bolloso e schiumoso. Il trasporto degli alcali in fase gassosa ha in ogni modo condotto ad un tipo di differenziazione certamente sensibile, ma non certo di grande entità, anche questo indizio di un fenomeno di breve durata temporale.

Il tipo di differenziazione pneumatolitica, è anche messo particolarmente in evidenza dalle variazioni dell'indice seriale in funzione della percentuale di SiO_2 . Si osserva infatti che, mentre la SiO_2 rimane grosso modo costante, il σ aumenta con continuità, fino a raggiungere il valore massimo delle lave olivin-trachitiche, con $\sigma = 4.50$. Questa caratteristica modalità di variazione dell'indice seriale è stata da Rittmann riconosciuta come tipica della differenziazione pneumatolitica con trasporto gassoso (A. Rittmann 1958).

Complessivamente dunque possiamo concludere che dallo studio chimico-petrografico delle vulcaniti di Radicofani risulta evidente che il fatto determinante della loro evoluzione magmatica è stato un tipo di differenziazione essenzialmente pneumatolitico, con trasporto di alcali in fase gassosa. A questo fenomeno, che senz'altro è il più vistoso e significativo, si sono aggiunti lievi variazioni di altri elementi quali il titanio, il fosforo e forse anche il magnesio. Questa differenziazione per gaseous transfer non è stata eccessivamente spinta ed ha determinato una linea evolutiva che si è svolta ai limiti della saturazione secondo la linea trachibasalti \rightarrow latiti oliviniche \rightarrow trachiti oliviniche. Naturalmente non è da escludere che anche altri processi, quali per esempio l'inizio della cristallizzazione nel trachibasalto del plagioclasio, abbiano influito sulla differenziazione delle vulcaniti. Tale influenza, che forse è responsabile del leggerissimo aumento del rapporto $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ e della diminuzione del calcio, è stata comunque notevolmente inferiore come effetti al processo principale di arricchimento in alcali per trasporto gassoso.

Considerazioni petrogenetiche.

Infine resta da accennare ai problemi che sorgono dalla presenza di vulcaniti come quelle di Radicofani nella provincia petrografica toscana, caratterizzata da magmi i quali, sia che abbiano dato origine a vulcaniti o a plutoniti, sono compresi prevalentemente nel campo che va dalle quarzo-latiti alle rioliti. Oltre alle rocce di Radicofani sono tuttavia presenti altre limitate manifestazioni più basiche quali per esempio le cosiddette selagiti, rocce subvulcaniche o filoniane ricchissime in K_2O , alcuni filoni del campigliese, le ultime manifestazioni trachitiche del Monte Amiata ecc.

Come è noto d'altra parte nelle manifestazioni magmatiche delle zone orogeniche sono sempre presenti rocce di tipo basico, in quantità variabili da caso a caso, che caratterizzano linee evolutive che si differenziano notevolmente da quelle riscontrate in zone oceaniche, e che sono sempre difficilmente spiegabili alla luce delle cognizioni acquisite sui fenomeni di differenziazione ed in particolare sulla cristallizzazione frazionata, che fino ad oggi è considerata come il meccanismo principale che agisce sulle variazioni dei magmi (C. E. Tilley 1950, H. H. Hess 1960). L'interpretazione delle rocce basiche degli orogeni rimane ancora un problema discusso nella petrografia, e questo tanto più in quanto tutti gli studiosi che hanno lavorato in questo campo sono concordi nel dare all'anatessi un ruolo sempre importante nella formazione dei magmi delle zone orogeniche.

Recentemente G. Marinelli (1961), nel fare una sintesi petrologica del magmatismo toscano, ha dato una interpretazione genetica unitaria delle manifestazioni plutoniche e vulcaniche esistenti in Toscana. In questo tentativo tale Autore, respingendo l'ipotesi di un magma primordiale di natura basica (C. Burri 1960) considera le rocce basiche come derivate da un magma anatectico che ha dato origine alle grandi manifestazioni vulcaniche di S. Vincenzo e di Roccastrada, ed alla maggior parte delle vulcaniti del Monte Amiata.

Il meccanismo di differenziazione proposto è del tipo di quello pneumatolitico; ha però la possibilità di realizzarsi indipendentemente dalla formazione di una fase gassosa. Ciò avviene in quanto si suppone che una fase mobile, costituita prevalentemente da ioni negativi (volatili), sotto l'azione di un gradiente di pressione fluisca, determinando un frazionamento dei costituenti elettropositivi meno legati e che hanno

maggior affinità con la fase gassosa. Tali ioni sono specificatamente gli alcali, ed in particolare il K, ed inoltre il Fe, Mn, Ti, P. Con questo meccanismo è possibile ottenere da magmi anattettici acidi, di tipo quarzo-latitico o riodacitico, rocce trachitiche femiche, fino ad alcali-trachiti femiche, purchè naturalmente vi siano le condizioni geologiche adatte, e cioè una lenta risalita dei fusi anattettici.

E' sulla base di questa ipotesi che G. Marinelli interpreta le selagiti toscane, considerandole come espressione di un frazionamento estremo di un processo di differenziazione pneumatolitica in senso lato. Lo stesso meccanismo viene poi da detto Autore utilizzato per spiegare tutte le altre manifestazioni basiche della Toscana, comprese le vulcaniti di Radicofani.

In un recentissimo lavoro di C. Burri (1966) il vulcanismo appenninico è di nuovo preso in esame e le vulcaniti di Radicofani interpretate come derivanti direttamente dal « magma capostipite trachibasaltico » a cui detto Autore riconduce tutto il vulcanismo finale dell'orogene appenninico.

Oltre alle vulcaniti di Radicofani, prodotti di questo magma in Toscana sarebbero anche le vulcaniti dell'isola di Capraia, le trachiti (trachiandesiti secondo Burri) del Monte Amiata e le selagiti di Montecatini e di Orciatice.

Questo vulcanismo finale sarebbe, sempre secondo lo stesso Autore, del tutto indipendente da quello susseguente di origine anattettica, anche se in taluni casi, come nella regione amiatina, i due vulcanismi risultano spazialmente e cronologicamente coincidenti.

Senza entrare nei dettagli della discussione fra i rapporti dei due vulcanismi, che peraltro risultano non sempre chiari nella loro evoluzione, è necessario sottolineare come il chimismo delle rocce trachibasaltiche di Radicofani sia nettamente differenziabile dal trachibasilto capostipite di Burri, di cui, limitandoci alla Toscana, un esempio sarebbe dato dalle manifestazioni basiche della Punta dello Zenobito (Capraia). Tali rocce (M. Franzini 1964) presentano infatti alcune significative differenze con quelle di Radicofani e cioè: un più alto rapporto Fe/Mg, il sodio predominante, anche se leggermente, sul potassio ed una sottosaturazione in silice che si riflette nella presenza di olivina normativa. Queste differenze escludono la possibilità che esistano rapporti di qualsiasi genere fra i due magmi. Marinelli (1961) e Franzini (1964) hanno del resto riconosciuto il vulcanismo della Capraia come legato a quello

del massiccio Sardo-corso. In ogni caso allo stato attuale appare estremamente difficile riconoscere in una qualunque delle manifestazioni magmatiche della provincia toscana (eccezion fatta naturalmente per l'isola di Capraia) la presenza di un magma capostipite basico, qualora si tengano nella dovuta considerazione non solo i rapporti geografici ma anche quelli temporali e quantitativi che verrebbero ad intercorrere fra i due vulcanismi rispettivamente di tipo susseguente e finale.

Nel complesso, sia dal punto di vista geologico che magmatologico, lo schema proposto da G. Marinelli sembra finora il più probabile ed in grado di inquadrare in modo unitario le varie manifestazioni magmatiche della Toscana. Tuttavia, mentre per alcuni tipi di rocce basiche, quali per esempio le selagiti, non si vede quale altro meccanismo di differenziazione, al di fuori di quello pneumatolitico in senso lato, possa essere invocato, per le vulcaniti di Radicofani vi sono invece alcune difficoltà nell'applicazione di questo tipo di differenziazione. Ciò dipende principalmente dal fatto che l'evidenza geologica non consente una caratterizzazione univoca del magma principale di Radicofani; infatti l'impossibilità di ricostruire in modo completo il vulcanismo e quindi di dare un significato reale ai vari prodotti differenziati pone l'alternativa se il magma trachibasaltico possa o meno essere considerato inalterato. G. Marinelli, nella sua ipotesi, lo considera come un residuo di una differenziazione pneumatolitica, cioè un epigmagma ormai depauperato dei costituenti volatili che sono andati ad arricchire altre frazioni, la maggior parte delle quali costituivano colate e parti esterne dell'apparato vulcanico e che quindi sono state asportate per fenomeni erosivi. Questa ipotesi è senz'altro possibile, ed è in certo modo confermata da considerazioni generali su tutta la provincia petrografica toscana. Non si può tuttavia non prospettare, alla luce di quanto visto in precedenza anche un'altra ipotesi: che cioè i rapporti quantitativi che noi vediamo oggi fra i vari prodotti siano grosso modo quelli originari e che quindi il trachibasalto sia effettivamente rappresentante di un magma locale inalterato o comunque non sostanzialmente modificato dai fenomeni di gaseous transfer prima descritti. A queste considerazioni ne va aggiunta un'altra di estrema importanza. Secondo la definizione del processo di differenziazione pneumatolitica in senso lato sappiamo che i due elementi che maggiormente si arricchiscono nei prodotti differenziati sono il potassio e il magnesio. Si vede infatti nei

tipici differenziati di questo genere, quali per esempio le selagiti di Montecatini, come questi due elementi siano eccezionalmente abbondanti (K_2O fra 7.5 e 7.8%; MgO fra 7.8 e 7.9%) (F. Rodolico 1934) ed in quantità percentuale come ossidi pressochè identica.

In un residuo di differenziazione pneumatolitica sarebbe quindi logico trovare una relativa povertà in K_2O , o più generalmente in alcali, ed in MgO . Nelle vulcaniti di Radicofani vediamo invece che a basse quantità di alcali si contrappongono valori molto alti di MgO , con rapporti MgO/K_2O nelle rocce trachibasaltiche intorno a 2.5. Alla luce di queste considerazioni geologiche e chimiche appare quindi più naturale considerare il magma trachibasaltico come non alterato dal processo di gaseous transfer che caratterizza il vulcanismo di Radicofani, almeno non alterato a tal punto da essere considerato un residuo di differenziazione.

Vediamo allora quali ipotesi genetiche sostitutive possono essere fornite. Innanzitutto la sua derivazione per semplice differenziazione pneumatolitica da un magma anatettico indifferenziato del tipo di quello che ha dato origine ai vari complessi quarzo-latitici del Monte Amiata, risulta improbabile se si considera che, rispetto a quest'ultimo, si sarebbe verificato un impoverimento in silice, con allumina pressochè costante ed un impoverimento anche in alcali. Per avere una idea dei rapporti esistenti fra le rocce amiatine e quelle di Radicofani, si osservi il diagramma A F M (alcali- $Fe_2O_3 + FeO-MgO$) di fig. 4, dove accanto alle rocce studiate sono riportati i tipi rappresentativi delle vulcaniti del M. Amiata tratti dal lavoro di R. Mazzuoli e M. Pratesi (1963), e cioè i campioni B83 e L75, il primo del complesso quarzo-latitico A, il secondo del complesso quarzo-latitico B (tutti gli altri campioni analizzati occupano una posizione o intermedia o molto vicina a quelli riportati). Con una linea sono riuniti i punti che rappresentano i campioni e la loro massa di fondo vetrosa. Infine viene riportato il campione TR83, che rappresenta la colata trachitica della vetta.

Come si vede dal diagramma, mentre le rocce del M. Amiata occupano una posizione normale e tipica, anche come andamento della differenziazione (vetro), delle serie alcalicalciche, le rocce trachibasaltiche di Radicofani sono leggermente spostate da questa linea. Questo fatto del resto è tutt'altro che infrequente per i termini estremi basici delle serie alcalicalciche (S. R. Nockolds, R. Allen 1953). La loro posizione, come del resto le loro caratteristiche mineralogiche, fanno piuttosto

pensare a prodotti di differenziazione gravitativa di un magma più acido e più alcalino, con un locale accumulo dei primi prodotti cristallizzati, olivina, pirosseno diopsidaugitico e plagioclasio molto basico. Tale magma potrebbe essere molto vicino, dal punto di vista chimico e petrografico, a quello che ha dato origine alle ultime manifestazioni laviche del M. Amiata. Una differenziazione di tipo gravitativo può

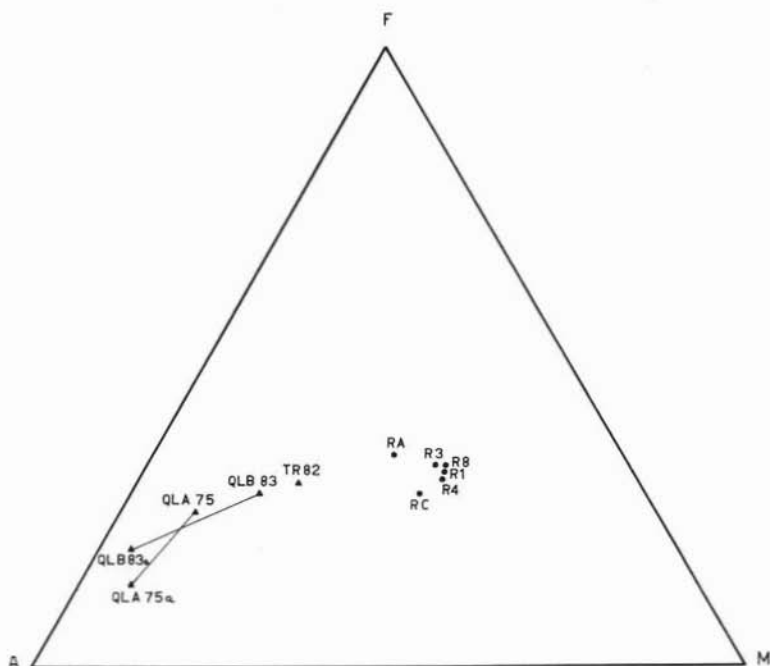


Fig. 4.

infatti facilmente rendere conto del peculiare chimismo del magma base e cioè del rapporto Fe/Mg particolarmente basso, accompagnato da bassi tenori di alcali e di silice e da valori relativamente alti di allumina; proprio di quei caratteri cioè che ne rendono difficile una loro derivazione per differenziazione pneumatolitica in senso lato.

Per concludere lo studio delle vulcaniti di Radicofani, oltre a mettere in luce, attraverso la precisazione dei caratteri chimici e petrografici dei vari prodotti, un fenomeno di differenziazione in fase gassosa avvenuto nel condotto vulcanico, porta un nuovo contributo di

dati per l'inquadramento genetico delle vulcaniti toscane. Una volta acquisita una più profonda conoscenza delle altre manifestazioni basiche della Toscana ed in particolare di quelle della zona del M. Amiata (colate, inclusi, filoni di tipo selagitico), sarà possibile precisare con sicurezza ed in maniera più rigorosa l'effettivo andamento evolutivo e le relazioni genetiche che legano il complesso, anche se esiguo, gruppo delle rocce basiche della provincia petrografica toscana.

Desidero ringraziare il Prof. GIORGIO MARINELLI che con numerosi consigli e proficue discussioni ha seguito lo svolgimento del presente lavoro.

*Pisa - Istituto di Mineralogia e Petrografia dell'Università.
Gruppo di Ricerca per lo Studio Geologico dell'Appennino Settentrionale
e della Toscana del C.N.R. Sezione VII.*

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- BROWN G. M. - *The effect of ion substitution on the unit cell dimensions of the common clinopyroxenes.* Am. Min., 45, 1960.
- BURRI C. - *Le province petrografiche postmesozoiche dell'Italia.* Rend. Soc. Min. It., 17, 1961.
- BURRI C. - *Problemi petrochimici del vulcanismo italiano.* Mem. Acc. Patav. SS.LL.AA., Cl. Sc. Mat. Nat., 78, 1965-66.
- EVERNDEN J. F., CURTIS G. H. - *Potassium-Argon dating of late cenozoic rocks in East Africa and Italy.* Curr. Anthropology, vol. 6, n. 4, 1965.
- FRANZINI M. - *Particolarità delle curve di estinzione massima in zona simmetrica per plagioclasti di alta e bassa temperatura.* Rend. Soc. Min. It., 18, 1962.
- FRANZINI M. - *Studio mineralogico e litologico dell'isola di Capraia.* Atti Soc. Tosc. Sc. Nat., serie A, 71, 1964.
- FRANZINI M. - *Sulla determinazione della composizione e dello stato termico dei plagioclasti geminati Albite Karlsbad.* Atti Soc. Tosc. Sc. Nat., serie A, 72, 1965.
- HESS H. H. - *Stillwater igneous complex, Montana.* Mem. Geol. Soc. Am., 80, 1960.
- LACROIX A. - *Les enclaves de roches volcaniques.* Macon, 1893.
- MARINELLI G. - *Genesi e classificazione delle vulcaniti recenti toscane.* Atti Soc. Tosc. Sc. Nat., serie A, 68, 1961.
- MAZZUOLI R., PRATESI M. - *Rilevamento e studio petrografico delle rocce vulcaniche del Monte Amiata.* Atti Soc. Tosc. Sc. Nat., serie A, 70, 1963.
- NOCKOLDS S. R., ALLEN R. - *The geochemistry of some igneous rock series.* Geoch. et Cosmoch. Acta, 4, 1953.
- ORVILLE P. M. - *Alkali ion exchange between vapor and feldspar phase.* Am. Jour. Sc., 261, 1963.

- POLDERVAART A. - *Correlation of physical properties and chemical composition in the plagioclase, olivine and orthopyroxenes series.* Am. Min., 35, 1950.
- RITTMANN A., EL-HINNAWI E. E. - *The application of the zonal method for distinction between low- and high-temperature plagioclase feldspars.* Schweiz. Min. Petr. Mit., 41, 1960.
- RITTMANN A. - *Sulla determinazione quantitativa delle serie magmatiche.* Stromboli, 1958.
- RITTMANN A. - *Les volcans et leur activité.* Masson, 1963.
- RODOLICO F. - *Ricerche sulle rocce eruttive recenti della Toscana. II: Le rocce di Orciatice e Montecatini in Val di Cecina.* Atti Soc. Tosc. Sc. Nat., 44, 1934.
- RODOLICO F. - *Ricerche sulle rocce eruttive recenti della Toscana. III: Le rocce del Monte Amiata. IV: Le rocce di Radicofani.* Atti Soc. Tosc. Sc. Nat., 45, 1935.
- SMITH J. R. - *The optical properties of heated plagioclases.* Am. Min., 43, 1958.
- SMITH J. R., YODER H. S. - *Variation in X-ray powder diffraction patterns of plagioclase feldspars.* Am. Min., 41, 1956.
- SCHAIERER J. F., SMITH J. R., CHAYES F. - *Refractive indices of plagioclase glasses.* Annual Rep. Direc. Geophys. Lab., 55, 1956.
- SLEMMONS D. B. - *Observation on order-disorder relations of natural plagioclase. I. A method of evaluating order-disorder.* Norsk. Geol. Tidsskr., 42, 2, 1962.
- TILLEY C. E. - *Some aspects of magmatic evolution.* Quart. J. Geol. Soc. London, 106, 1950.
- TUTTLE O. F. - *Optical studies on alkali feldspars.* Am. Jour. Sc., Bowen vol., 1952.
- VISWANATHAN K. - *Unit cell dimensions and ionic substitutions in common clinopyroxenes.* Am. Min., 51, 1966.
- WILSHIRE H. G. - *Alteration of olivine and orthopyroxene in basic lavas.* Am. Min., 43, 1958.
- WINCHELL A. N. - *Elements of optical mineralogy.* John Wiley and Sons, 1945.
- YODER H. S., SAHAMA TH. G. - *Olivine X-ray determinative curve.* Am. Min., 42, 1957.



Fig. 1. — Fenocristalli di olivina alterati in bowlingite nel trachibasalto di base. Nicols paral. (30 \times).



Fig. 2. — Struttura glomeroporfirica con nodulo di plagioclasti e di pirosseni nel trachibasalto di base. Nicols iner. (38 \times).

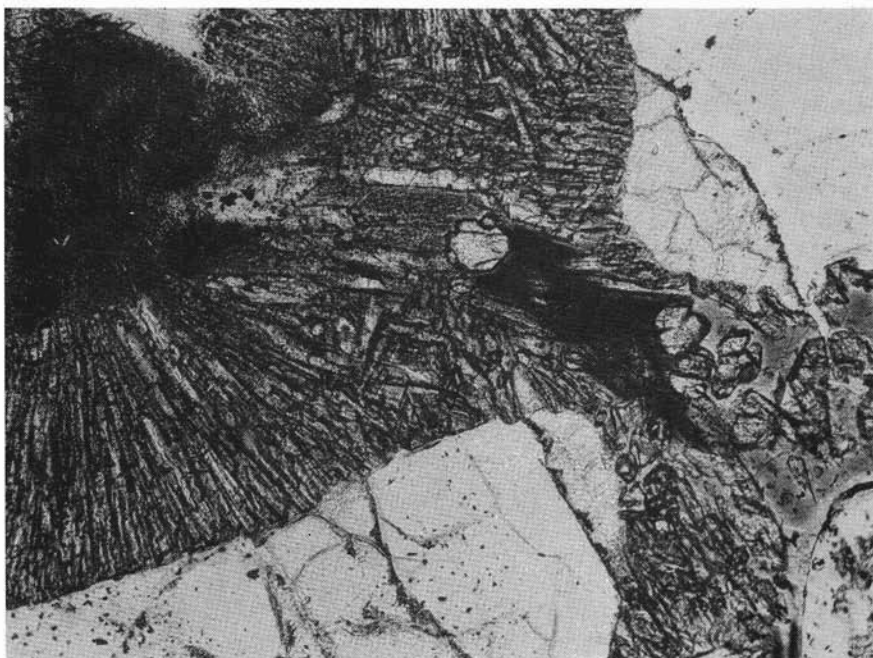


Fig. 1. — Incluso di quarzo con orlo di reazione pirossenico. Nicols paral. (70 \times).



Fig. 2. — Trachibasalto a pasta di fondo vetrosa. Nicols incr. (30 \times).

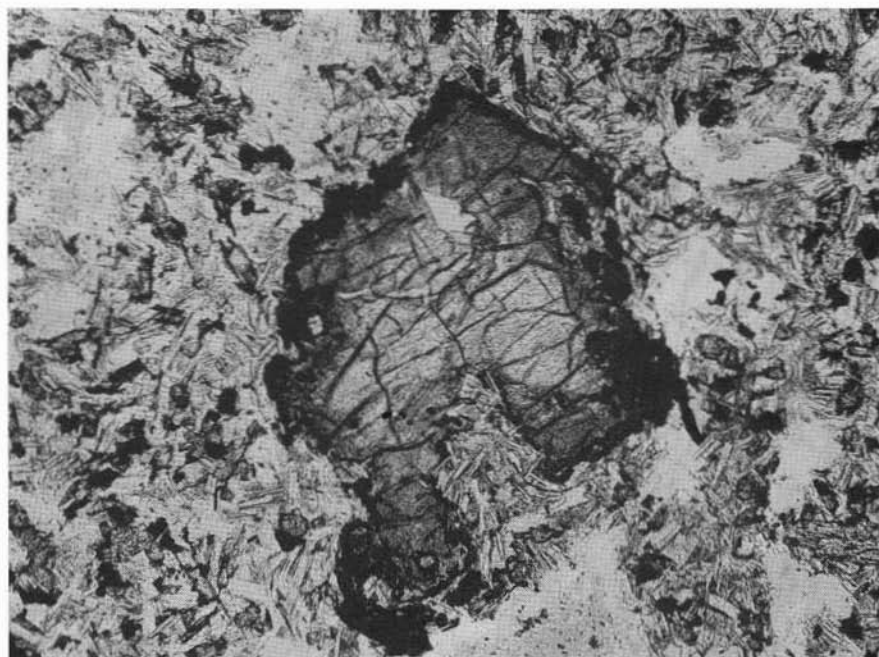


Fig. 1. — Fenocristallo olivinicco corroso e con orlo iddingsitico nella latite olivinica. Nicols paral. (70 \times).

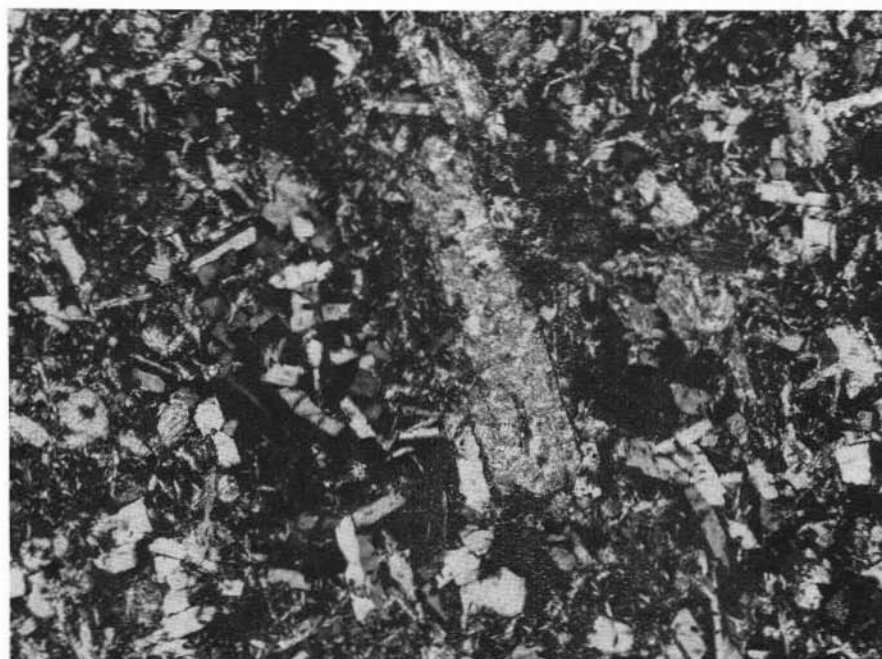


Fig. 2. — Trachite olivinica (Poggio Casano). Microfenocristalli di olivina in un fondo a sanidino, pirosseni e scarsa biotite. Nicols iner. (38 \times).