

ASSIMILAÇÃO DE ROCHAS ENCAIXANTES PELO MAGMA NEFELINA SIENÍTICO DO MACIÇO ALCALINO DA ILHA DE VITÓRIA, SP

A. Motoki - UERJ
C. B. Gomes - USP
C. V. Dutra - Geologia e Sondagens Ltda., BH

ABSTRACT

The Island of Vitória, about 2.5 km², is located 35 km from the coast of the State of São Paulo, southern Brazil. It is entirely constituted by the outcropping northeastern quadrant of a subcircular zoned alkaline massif (which, in its reconstituted form, may have covered about 8 km²): nepheline-bearing syenites (or pulaskites I which make up its core) pass gradually into an intermediate concentric band of pulaskites II (with less nepheline), followed outwards by a similarly concentric rim area of (partly quartz-bearing) alkali feldspar syenites. Chemically, all rock types show predominance of silica and alumina over alkalis ("miaritic" types) and are in part oversaturated and peraluminous. In the Q-Ne-Kf diagram, the rocks plot within a band which joins the undersaturated thermal valley with the Ab-Or tie line, in part entering the oversaturated region. The Ab-Or thermal divide is thus breached, a fact that cannot be explained solely by normal magmatic differentiation; several variation diagrams point in the same direction. In additional diagrams (e.g., Na+K/Al vs. ne), rock compositions design a linear plot which joins the composition of undersaturated (nepheline syenite) magmas with that of quartz-feldspathic rocks, thus suggesting an explanation in terms of mixing. The favoured mode of origin implies a central diapiric intrusion of undersaturated magma which mixes with a new magma, formed at the periphery by partial melting of the quartz-feldspathic country rocks, coupled with normal magmatic differentiation.

RESUMO

A Ilha de Vitória, com área aproximada de 2,5 km², dista 35 km da costa do Estado de São Paulo. Ela acha-se inteiramente representada por um corpo alcalino zonado (cobrindo área de 8 km² na sua forma reconstituída): sienitos com nefelina (pulaskitos I, ocupando a parte central) passam gradualmente a uma faixa concêntrica de pulaskitos II (com menos nefelina) e, mais externamente, a outra zona concêntrica consistindo em álcali sienitos (parcialmente portadores de quartzo). Do ponto de vista químico, todas as três variedades petrográficas mostram predominância de sílica e alumina em relação a álcalis (tipos "miaríticos") e são em parte supersaturadas e peraluminosas. No diagrama Q-Ne-Kf elas estão projetadas dentro de faixa ligando o vale termal para rochas insaturadas com a linha Ab-Or, e adentram parcialmente a região supersaturada. O divisor do vale termal Ab-Or é assim rompido, fato que não pode ser explicado unicamente por diferenciação magmática simples; diagramas de variação química apontam na mesma direção. Em diagramas adicionais (p.e., Na+K/Al vs. ne), a projeção das rochas se

dá ao longo de linha unindo a composição de magmas insaturados (nefelina sienito) com aquela de rochas quartzo-feldspáticas, sugerindo, assim, possível explanação em termos de mistura de magmas. O modelo genético proposto implica na presença de intrusão diapírica central de magma de ficiente em sílica misturado com um novo magma, este formado na periferia do corpo por fusão parcial das rochas quartzo-feldspáticas encaixantes, combinado com processo de diferenciação magmática normal.

INTRODUÇÃO

A geologia e petrologia do maciço alcalino da Ilha de Vitória, que se situa 35 km ao sul da cidade de Ubatuba, litoral do Estado de São Paulo, foram pesquisadas preliminarmente por Gomes et al. (1967) e, posteriormente, desenvolvidas por Motoki e Gomes (1984) e Motoki (1986). Esses trabalhos evidenciariam que o maciço alcalino é constituído por um corpo sienítico principal e diques fonolíticos e traquíticos posteriores. O corpo sienítico possui estrutura zonada, sendo composto do núcleo para a borda por nefelina sienitos, pulaskitos e álcali sienitos. Contudo, se adotada a classificação mais atualizada da IUGS, tem-se que estes nefelina sienitos não se enquadram no campo 11 do diagrama FA-P-F. Assim, no presente trabalho, os autores utilizam o termo pulaskito I para as rochas com 5 a 10% de nefelina, e pulaskito II para as com 0 a 5% do mineral. Entre esses domínios litológicos não se observam contatos intrusivos bruscos, mas sim gradacionais. Na zona de contato com as rochas encaixantes nota-se que a granulometria dos álcali sienitos é mais fina, assim como verificou-se a presença de quartzo modal e a ocorrência de xenólitos angulosos, arredondados e deformados, do material encaixante. O estado dos xenólitos foi interpretado como sendo devido a processo de captura e fusão parcial das encaixantes pelo magma sienítico; por outro lado, a estrutura zonada do corpo sienítico seria resultante da assimilação dessas rochas pelo magma.

Os autores divulgam ainda os resultados das análises químicas, bem como apresentam discussões gerais sobre o problema da possível assimilação de material da crosta continental pelo magma nefelina sienítico.

GEOQUÍMICA

Análises químicas em rochas totais foram realizadas para elementos principais, menores e traços em vinte e seis amostras representativas do maciço (Tabelas 1 a 6). De um modo geral, como características comuns às rochas alcalinas, as variedades do maciço da Ilha de Vitória são ricas em Na_2O e K_2O , com os seus conteúdos situando-se individualmente em torno de 6%; o teor de SiO_2 mantém-se ao redor de 60%. Nem todas as amostras analisadas são subsaturadas em sílica, existindo algumas supersaturadas como visível na Fig. 3. A relação $\text{Na}+\text{K}/\text{Al}$ é comumente baixa, significando que, à exceção de três amostras peralcalinas, as demais são miasquíticas. No diagrama AMF (Fig. 2) os pontos projetados se concentram numa pequena área, o que parece indicar que as amostras possuem pequena variação entre si em termos de grau de cristalização e, mais, que se acham num estágio avançado de processo de fracionamento magmático. De destaque na Fig. 2B, que reúne os dados relativos às rochas de dique, a ocorrência de uma amostra pouco evoluída, representada pelo micro-essexito 58.

Diagramas de variação

As Figs. 4 a 7 mostram os diagramas de variação referentes aos vários elementos analisados. Normalmente, esses gráficos costumam utilizar o teor de SiO_2 como eixo horizontal, o assim considerado do índice de fracionamento magmático (diagrama de Harker). Contudo, no

caso particular de rochas alcalinas, sobretudo as leucocráticas, o aumento de SiO_2 nem sempre corresponde a um concomitante avanço no processo de fracionamento, sendo, por esta razão, empregados outros parâmetros como, por exemplo, $\text{Fe}/\text{Fe}+\text{Mg}$, $\text{Na}+\text{K}/\text{Na}+\text{K}+\text{Ca}$, etc. No presente caso, recorreu-se ao índice de diferenciação de Thornton e Tuttle (1960), que expressa o total das porcentagens de minerais félsicos, à exceção de anortita, na norma CIPW. Este valor é quase idêntico ao somatório de quartzo, ortoclásio, albita e nefelina normativos.

O índice de fracionamento das rochas sieníticas varia de 77,11 a 89,30 (Tabelas 1 e 2), cobrindo faixa relativamente estreita, aliás como já assinalado para o diagrama AMF (Fig. 2).

Conquanto os dados projetados nos diagramas não exibam tendências muito conspícuas é ainda perfeitamente visível a redução dos teores de TiO_2 , Fe_2O_3 , FeO , MnO e CaO e o aumento de Al_2O_3 , Na_2O , K_2O , Cl e Rb com a elevação daquele parâmetro (Figs. 4 e 5). Essas tendências podem ser atribuídas qualitativamente tanto a processos de fracionamento magmático quanto de assimilação da crosta continental.

Já as rochas de dique contêm índice variando de 40,99 a 89,11 (Tabela 3). O valor mínimo obtido, que é muito baixo em relação ao das demais rochas, é devido a uma amostra excepcional, um microessexito com textura cumulática e quimismo acentuadamente diferente: baixos teores de SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O e K_2O ; altos de TiO_2 , Fe_2O_3 , FeO , MgO e CaO . Acredita-se que este dique possa representar material proveniente de líquido do fundo da câmara magmática, onde teve lugar afundamento e acumulação dos minerais de cristalização inicial. As demais amostras de dique têm composição semelhante à das variedades sieníticas, sendo também que seus índices de fracionamento se distribuem aproximadamente na mesma faixa, 77,51 a 89,11. Entretanto, no caso dos diques, os pontos projetados nos gráficos (Figs. 6 e 7) exibem maior grau de dispersão, contrariamente ao notado para as variedades sieníticas.

Nas seqüências de variação das rochas sieníticas vê-se claramente uma inflexão em torno do índice igual a 85 para as curvas de TiO_2 , MgO , CaO , H_2O , P_2O_5 e Rb . Acima desse valor, as tendências gerais de fracionamento são mais evidentes; na parte inferior, mais difusas. Com referência aos tipos petrográficos, nota-se tendência no sentido de os pulaskitos I se concentrarem na parte superior, os pulaskitos II nas proximidades do valor 84, e os álcali sienitos na porção inferior.

Aparentemente, os três tipos litológicos se derivaram a partir do mesmo magma, que se diferenciou por fracionamento magmático normal: os álcali sienitos representando estágio menos desenvolvido e os pulaskitos mais avançado. Contudo, as inflexões nas seqüências acima citadas dificultam tal interpretação.

Diagramas de saturação

Os dados acima permitem concluir que os álcali sienitos têm como características principais a abundância de SiO_2 e Al_2O_3 relativamente a CaO , Na_2O e K_2O . Como os teores absolutos desses elementos não são muito diferentes para as três variedades litológicas, tem-se que esses aspectos distintivos decorreriam da conjugação de uma concentração ligeiramente mais alta em SiO_2 e mais baixa em Na_2O .

O valor médio de nefelina normativa dos álcali sienitos é de apenas 0,29%, quando comparado a números bem mais elevados, respectivamente, 5,44 e 5,93%, exibidos pelos pulaskitos II e pulaskitos I. Adicionalmente, três das onze amostras analisadas possuem quartzo normativo. Por outro lado, a abundância de Al_2O_3 relativa a Na_2O e K_2O acha-se bem evidenciada pela presença de coríndon normativo em duas amostras. Quartzo e coríndon normativos, indicadores de rochas supersaturadas e peraluminosas, não podem coexistir, respectivamente, com nefelina e acmita normativas, fases características de rochas alcalinas típicas. Aqueles dois minerais ocorrem normalmente em rochas sedimenta

res pelíticas, metamórficas de origem pelítica ou granitos peraluminosos, estando no entanto ausentes de alcalinas típicas. Disso resulta que os álcali sienitos aparentemente não possuem composições características junto às rochas alcalinas, assemelhando-se mesmo às rochas paragnáissicas ou mesmo graníticas peraluminosas.

Para melhor observação das diferenças químicas existentes entre os tipos litológicos, são apresentados os diagramas álcalis-alumina vs. álcalis-sílica (Figs. 8 e 9). Na Fig 8A, o eixo vertical expressa o valor da subtração normativa (quartzo-nefelina), representando o índice de saturação álcalis-sílica. Por sua vez, o horizontal relaciona o valor $(Na_2O+K_2O/Al_2O_3)_{mol}$, correspondendo ao índice de peralcalinidade. Este eixo onde quartzo e nefelina normativos são iguais a 0, corresponde também à barreira termal. Neste diagrama, os nefelina sienitos típicos, peralcalinos e subsaturados em sílica, caem no segundo quadrante; granitos típicos situam-se no quarto, enquanto que rochas paragnáissicas ocupam a parte esquerda do mesmo quadrante. São poucos os casos conhecidos de rochas pertencentes ao primeiro quadrante: por exemplo, lavas quartzo-traquíticas com egirina e riebeckita ocorrendo nos vulcões da fronteira entre a Coreia do Norte e a China (Miyashiro e Kushiro, 1977). Relativamente ao eixo vertical do diagrama tem-se que, através de fracionamento magmático, as composições projetadas no segundo e terceiro quadrantes se moveriam para baixo, e as do primeiro e quarto se deslocariam para cima, em ambos os casos se afastando da barreira termal. Para o caso típico dos pulaskitos I conhece-se também uma outra tendência, a de rochas de composição miasquítica se fracionarem em agpaítica (Ulbrich, 1984). No gráfico em questão essa tendência se faria indicar por um deslocamento para a direita. Consequentemente, considera-se que o processo de fracionamento magmático forma uma sequência oblíqua da esquerda (superior) para a direita (inferior). As composições de magmas submetidos a um fracionamento normal evoluíram ao longo dessa sequência sempre no sentido de afastamento da barreira termal.

Por outro lado, para representar a peraluminosidade, a Fig. 8B utiliza $(Na_2O+K_2O+CaO/Al_2O_3)_{mol}$ como eixo horizontal, e emprega o mesmo parâmetro da figura anterior para o componente vertical. Nesta figura, as rochas nefelina sieníticas típicas ocupam o segundo quadrante; granitos típicos situam-se no limite entre o primeiro e o quarto, enquanto que paragnáissicas caem no quarto quadrante. As rochas que se projetam no terceiro quadrante são em pequeno número: por exemplo, nefelina gnaisses (litchfielditos) encontrados no maciço alcalino de Canaã, RJ (Heimbold, 1965). O efeito do avanço no fracionamento magmático se manifesta da mesma forma que na figura anterior, isto é, afastamento progressivo da barreira termal. Contudo, a posição horizontal das composições projetadas deve também refletir o comportamento do Ca. Através de fracionamento magmático, sobretudo no estágio inicial, a concentração desse elemento no líquido residual diminui, deslocando os pontos para a esquerda. Isso significa que as composições que se situam no segundo e terceiro quadrantes podem se fracionar obliquamente da direita (superior) para a esquerda (inferior). Entretanto, nos magmas muito fracionados, contendo baixo teor de Ca, como, por exemplo, os nefelina sieníticos, esse efeito é tido como de menor importância. Por tanto, nestes casos a sequência de variação química através de fracionamento pode ser semelhante ao da Fig. 8A.

Nesta nota-se que as amostras projetadas formam uma sequência indo do quarto ao segundo quadrante, com passagem pelo terceiro. Todas as rochas sieníticas parecem se dispor ao longo de uma linha, que corresponde aproximadamente à equação $Y=90X-10$. Não obstante, existe uma pequena diferença entre os três tipos petrográficos, que se evidencia quando a projeção é feita em separado (Figs. 9A e 9B). Para os álcali sienitos e pulaskitos as equações são, respectivamente, $Y=80X-8$ e $Y=70X-10$. Estas equações determinam que os álcali sienitos, quando comparados às demais rochas, são mais saturados em SiO_2 na mes

ma condição de $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3)$, com esta diferença correspondendo no mínimo a 2% de nefelina normativa.

Na Figura 8B, os pontos estão distribuídos pelo primeiro e segundo quadrantes, mas a projeção separada de cada tipo litológico possibilita reconhecer a presença de três seqüências de variação química bem distintas, gradando da parte esquerda (superior) para a direita (inferior) (Figs. 9B e 9D): $Y=80X+10$, $Y=40X+2$ e $Y=70X+0$, respectivamente, para os álcali sienitos, pulaskitos II e pulaskitos I. Essas equações levam similarmente à conclusão anterior de que os álcali sienitos são mais ricos em SiO_2 em relação aos demais tipos petrográficos para a mesma condição de $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}+\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3)$ norma.

As Figs. 9B e 9D demonstram que as seqüências dos álcali sienitos e pulaskitos II colocam-se acima da dos pulaskitos I, sendo esta diferença devida aos teores de CaO (em média, respectivamente, 2,2, 2,4 e 1,7%). A comparação entre as Figs. 8A e 8B serve para realçar o comportamento do Ca no corpo principal sienítico da Ilha de Vitória, indicando que as seqüências dos três tipos petrográficos se deslocam para a direita em razão da presença desse elemento. Contudo, o grau de deslocamento não se mostra igual, sendo relativamente grande para os álcali sienitos, médio para os pulaskitos II e pequeno para os pulaskitos I. Isto é, na mesma ordem, as rochas são mais enriquecidas em Ca para o mesmo teor de álcalis e sílica. Pode-se expressar esse grau de enriquecimento de forma quantitativa: tomando o valor de $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3)$ mol no ponto de cruzamento com a linha de seqüência de variação química como NK (Figs. 9A e 9C) e o de $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}+\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3)$ mol da mesma condição como NKC (Figs. 9B e 9D), a subtração NKC-NK representaria o índice de enriquecimento em Ca . Os valores calculados são 0,24, 0,20 e 0,10, respectivamente, para os álcali sienitos, pulaskitos II e pulaskitos I.

DISCUSSÃO GERAL

Com base nos diagramas de variação, os comportamentos de Al_2O_3 , FeO , Na_2O e K_2O podem ser explicados qualitativamente por fracionamento magmático, ou então, por assimilação de material da crosta continental. Da mesma forma o diagrama $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3)$ mol vs. (quartzo-nefelina) norma (Fig. 8A) é concordante com o modelo simples de fracionamento, conquanto possa também ser visto como resultado de assimilação.

Entretanto, as inflexões que se observam nos diagramas de variação em torno do índice de fracionamento magmático igual a 85, para os elementos TiO_2 , MgO , CaO , H_2O , P_2O_5 e Rb , não podem ser explicadas apenas pela ação do primeiro processo. A existência dos dois minerais modais e normativos termodinamicamente incompatíveis dentro de um corpo intrusivo, quartzo na borda e nefelina no núcleo (Fig. 10), é também problemática. O fracionamento magmático não deriva líquido com quartzo normativo a partir de líquido com nefelina normativa. Além disso, acmita normativa, apesar de não ser encontrada nas rochas sieníticas, está presente em duas amostras de dique. Estendendo a discussão até as rochas de granulometria fina, registra-se mais uma ocorrência em desequilíbrio: coríndon e acmita normativos. Adicionalmente, o diagrama quartzo-nefelina-kalsilita (Fig. 3) contém mais um obstáculo apontando contra a hipótese de fracionamento simples: rochas ígneas derivadas a partir do mesmo magma primário através de fracionamento magmático tenderiam a se projetar nas áreas em torno do ponto de menor temperatura ou ao longo das linhas cotéticas devido à estabilidade termodinâmica; entretanto, as rochas plutônicas da Ilha de Vitória não mostram essa característica, ao contrário, distribuindo-se em zona de instabilidade para a condição de 1kb de H_2O , e, mais, ultrapassando a barreira termal (Fig. 3).

Até hoje, vários trabalhos têm freqüentemente recorrido ao modelo de fracionamento magmático para interpretar a diversidade de

rochas ígneas que ocorrem no mesmo corpo ou na mesma região. Entretanto, no caso particular do maciço alcalino da Ilha de Vitória, esse modelo se mostra insuficiente, com os trabalhos de campo e as observações de lâminas delgadas levando à admissão de uma segunda hipótese genética, a assimilação das rochas encaixantes (Motoki e Gomes, 1984; Motoki, 1986).

Em primeiro lugar, o corpo sienítico possui estrutura zonada de passagem gradacional (Fig. 10). Na borda situada nas proximidades do contato com o material encaixante, afloram rochas assemelhando-se em composição a gnaisses; no núcleo, relativamente distante da zona de contato, as rochas também diferem quanto ao quimismo, o que parece sugerir que a composição do material sienítico é função do local de ocorrência. O fato é indicativo de que os álcali sienitos da borda são o produto de assimilação das encaixantes, enquanto que os pulaskitos do núcleo são as rochas que mantêm composição química relativamente próxima à do magma da intrusão inicial, ou seja, antes da assimilação. Feições apontando para a deformação e fusão das rochas encaixantes capturadas, observadas durante os trabalhos de campo, parecem corroborar essa interpretação.

Em segundo lugar, as seqüências de variação química dos três tipos litológicos, que se mostram aparentemente superpostos na Fig. 8A, estão em realidade separadas como visível na Fig. 8B. Se a diferenciação dessas três rochas fosse causada por apenas um mecanismo, elas guardariam correspondência entre si. Isto leva a crer que no corpo sienítico da Ilha de Vitória houve pelo menos dois processos conduzindo à diferenciação do magma, sendo que o comportamento do Ca foi diferente em ambos. Assumindo-se esses processos como assimilação e fracionamento a discordância presente nos dois diagramas é racionalmente explicada. No diagrama $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} / \text{Al}_2\text{O}_3)_{\text{mol}}$ vs. (quartzo-nefelina) norma (Fig. 8A), uma vez que os pontos projetados se distribuem aproximadamente ao longo de uma linha, as seqüências reunindo assimilação e fracionamento seriam provavelmente subparalelas. Mas, se as rochas encaixantes tivessem teor elevado em Ca relativamente ao magma alcalino, o efeito desse elemento na assimilação seria maior do que no fracionamento. O efeito do Ca se reflete no diagrama de $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO} / \text{Al}_2\text{O}_3$ mol vs. (quartzo-nefelina) norma (Fig. 8B), destacando um pouco a linha de assimilação da de fracionamento (compare-se as Figs. 11A e 11B). Portanto, as Figs. 8A e 8B sugerem que no primeiro estágio ocorreu assimilação das rochas encaixantes pelo magma, a partir da borda da intrusão inicial cuja composição é tipicamente nefelina sienítica, levando à formação de estrutura zonada; no segundo, teve lugar o fracionamento magmático em cada local de acordo com a sua condição (refere-se às linhas de assimilação e fracionamento na Fig. 11). Sem dúvida, o núcleo possui melhor condição de fracionamento que a borda devido ao seu resfriamento mais lento, daí resultando provavelmente o alto índice de fracionamento dos pulaskitos.

Em terceiro lugar, a diferenciação que ultrapassa a barreira termal não pode obviamente conduzir à formação do líquido residual resultante da cristalização fracionada. O mecanismo mais provável capaz de explicar essa situação consiste na mistura de dois materiais que possuem os minerais normativos incompatíveis, quartzo e nefelina. Assim, os pontos projetados na Fig. 3 poderiam ser explicados pela mistura de magma tipicamente nefelina sienítico (NS), provavelmente o da intrusão inicial, e rochas gnáissicas (GN).

Conseqüentemente, os dados acima permitem postular para o maciço alcalino da Ilha de Vitória a seguinte evolução: o magma da intrusão inicial foi tipicamente nefelina sienítico e correspondente à composição NS da Fig. 3. Após o evento de captura do material encaixante cuja composição acha-se expressa pelo ponto GN, essas rochas foram fundidas e assimiladas pelo magma sienítico, sobretudo na borda do corpo, e formou-se estrutura zonada de passagem gradacional: álcali sienitos na borda e pulaskitos no núcleo (Fig. 11). A seguir, ocorreu fra

TABELA 1

Análises químicas (elementos principais, % em peso) de álcali sienitos

	6	26	31	37	78	80	81A	85	87	88	108	Média
SiO ₂	60,6	62,0	61,8	60,6	59,4	60,7	60,4	61,6	60,4	60,3	61,1	60,8
TiO ₂	0,70	0,84	0,75	0,71	0,70	0,61	0,88	0,66	0,80	0,71	0,78	0,74
Al ₂ O ₃	17,6	17,4	17,1	17,5	18,1	18,9	17,0	17,9	16,6	16,8	17,9	17,5
Fe ₂ O ₃	2,0	1,9	1,8	2,2	2,5	2,6	2,6	1,4	2,4	2,1	1,2	2,1
FeO	3,14	3,85	3,85	3,21	3,21	2,42	3,56	2,71	3,28	4,06	3,71	3,36
MnO	0,17	1,15	0,14	0,15	0,16	0,13	0,28	0,15	0,24	0,20	0,18	0,18
MgO	0,66	0,83	0,66	0,65	0,72	0,63	0,64	0,65	0,70	0,85	0,67	0,70
CaO	2,0	2,4	2,1	2,2	2,3	2,0	2,4	2,0	1,8	2,1	2,3	2,2
Na ₂ O	5,9	4,4	4,9	6,4	6,3	5,3	6,2	6,0	5,6	5,4	5,5	5,6
K ₂ O	6,9	5,8	6,3	6,0	6,1	6,3	5,6	6,3	7,4	6,3	6,0	6,3
H ₂ O	0,22	0,12	0,27	0,13	0,33	0,22	0,20	0,35	0,53	0,99	0,39	0,34
P ₂ O ₅	0,22	0,21	0,23	0,20	0,23	0,15	0,26	0,13	0,20	0,15	0,25	0,20
CO ₂	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,04	0,16	0,12	0,39	0,74	0,20	0,19
Cl	0,04	0,01	0,02	0,02	0,06	0,04	0,04	0,05	0,01	<0,01	0,03	0,03
F	0,04	0,04	0,05	0,03	0,07	0,06	0,09	0,04	0,04	0,06	0,07	0,05
S	0,02	0,02	0,02	0,01	0,04	<0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
TOTAL	100,29	100,05	100,07	100,09	100,30	100,10	100,32	100,08	100,41	100,78	100,30	100,31
(Q+Or+Ab+Na) _{norma}	85,51	77,99	81,72	85,66	85,35	82,22	83,94	86,46	77,11	77,93	81,81	82,35
Na ₂ O+K ₂ O/Al ₂ O ₃ mol.	0,98	0,78	0,87	0,97	0,94	0,94	0,90	0,93	1,03	0,93	0,87	0,92
Na ₂ O+K ₂ O+CaO/Al ₂ O ₃ mol.	1,18	1,03	1,09	1,20	1,17	1,01	1,21	1,14	1,23	1,16	1,10	1,14

TABELA 2

Análises químicas (elementos principais, % em peso) de pulaskitos

	Pulaskitos I					Pulaskitos II				Média
	25	45	60C	64	Média	4	43A	110	111	
SiO ₂	60,5	60,5	60,8	59,9	60,4	59,3	60,7	58,7	59,9	59,7
TiO ₂	0,33	0,63	0,43	0,44	0,46	0,74	0,71	0,70	0,63	0,70
Al ₂ O ₃	18,9	19,0	19,1	18,7	18,9	18,1	18,6	17,3	17,5	17,9
Fe ₂ O ₃	1,5	1,2	0,7	0,95	1,1	1,5	0,8	2,5	1,8	1,7
FeO	2,71	3,56	3,42	3,28	3,20	3,71	3,42	3,71	3,28	3,53
MnO	0,10	0,10	0,10	0,11	0,10	0,13	0,20	0,21	0,20	0,19
MgO	0,42	0,73	0,55	0,63	0,58	0,86	0,85	0,82	0,65	0,80
CaO	1,3	2,1	1,6	1,9	1,7	2,3	2,2	2,5	2,7	2,4
Na ₂ O	6,8	5,0	6,1	6,7	6,2	6,3	5,8	6,3	6,7	6,3
K ₂ O	6,7	6,5	6,6	6,7	6,6	6,0	6,3	6,3	5,8	6,1
H ₂ O	0,72	0,32	0,50	0,55	0,52	0,79	0,23	0,47	0,41	0,48
P ₂ O ₅	0,11	0,14	0,11	0,14	0,13	0,19	0,18	0,27	0,23	0,22
CO ₂	0,08	0,16	0,16	0,20	0,15	0,25	0,20	0,12	0,20	0,19
Cl	0,08	0,03	0,21	0,07	0,09	0,05	0,04	0,02	0,01	0,03
F	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,06	0,04	0,06	0,07	0,05
S	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,03	0,02	0,02	0,01	0,02
TOTAL	100,31	100,02	100,44	100,32	100,19	100,31	100,29	100,00	100,09	100,17
(Q+Or+Ab+Ne) _{norma}	89,30	88,51	86,01	87,31	85,81	80,35	83,78	83,59	84,22	83,77
Na ₂ O+K ₂ O/Al ₂ O ₃ mol.	0,97	0,80	0,90	0,98	0,92	0,93	0,88	0,99	0,99	0,95
Na ₂ O+K ₂ O+CaO/Al ₂ O ₃ mol.	1,10	1,00	1,05	1,16	1,08	1,16	1,09	1,26	1,27	1,19

TABELA 3

Análises químicas (elementos principais, % em peso) de rochas de dique

	Álcali-traquito		Nefelina fonolitos		Sodalita-nefelina fonolitos			Bostonito		Micro- essexito 58
	48D	4B	74A	Média	4A	44B	54A	Média	81B	
SiO ₂	60,5	59,5	60,1	59,8	58,2	58,1	59,7	58,7	65,5	44,3
TiO ₂	0,16	0,15	<0,10	<0,13	<0,10	0,21	0,33	0,18	<0,10	3,2
Al ₂ O ₃	19,1	18,1	18,8	18,7	19,7	19,5	18,1	19,1	19,1	15,5
Fe ₂ O ₃	2,3	2,6	3,3	3,0	3,2	2,2	1,5	2,3	0,14	4,0
FeO	3,4	2,85	1,85	2,35	2,00	3,56	4,28	3,28	0,42	6,78
MnO	0,16	0,19	0,21	0,20	0,14	0,15	0,23	0,17	<0,01	0,17
MgO	0,24	0,77	0,38	0,56	0,16	0,30	0,60	0,35	0,09	5,3
CaO	1,2	1,1	0,76	0,9	1,3	2,0	0,53	1,3	0,50	9,8
Na ₂ O	5,7	6,7	6,7	6,7	8,6	5,9	6,4	7,0	7,5	3,6
K ₂ O	6,0	6,2	5,2	5,6	5,5	6,9	6,9	6,4	6,5	3,4
H ₂ O	1,07	2,00	2,48	2,24	1,12	1,03	1,41	1,19	0,45	2,91
P ₂ O ₅	0,07	<0,05	0,06	<0,06	<0,05	0,05	0,07	0,05	<0,05	0,78
CO	0,20	0,20	0,20	0,20	0,03	0,20	0,41	0,21	0,16	0,49
Cl	0,39	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,09	0,02	0,01
F	0,08	0,03	0,09	0,06	0,07	0,04	0,04	0,05	0,01	0,07
S	0,02	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,03	0,01	0,15
TOTAL	100,50	100,43	100,17	100,35	100,07	100,19	99,54	100,33	100,40	100,46
(Q+Or+Ab+Ne) norma	77,51	87,34	87,28	87,31	88,62	82,93	89,11	86,66	88,44	40,99
Na ₂ O+K ₂ O/Al ₂ O ₃ mol.	0,83	0,98	0,89	0,91	1,02	0,98	0,99	0,96	1,01	0,62
Na ₂ O+K ₂ O+CaO/Al ₂ O ₃ mol.	0,95	1,09	0,96	0,98	1,14	1,07	1,04	1,08	1,06	1,15

TABELA 4

Análises químicas (elementos menores, em ppm) de álcali sienitos

	6	26	31	37	78	80	81A	85	87	88	108	Média
V	<5	17	40	<5	20	84	<5	7	27	50	32	25
Ni	12	12	12	11	<5	20	11	<5	8	9	17	9
Ga	24	26	30	41	25	28	33	33	30	31	26	30
Pb	77	72	77	79	90	115	114	98	86	113	101	96
Sr	100	296	188	370	300	400	300	370	106	77	280	235
Y	<10	15	25	36	28	42	50	20	19	46	20	27
Zr	104	110	280	350	444	204	264	104	200	380	120	332
Nb	<20	32	64	73	70	82	94	58	38	72	34	56
Ba	1150	2300	1520	1800	2100	3100	1800	2800	1100	4700	2560	1180
La	36	40	60	80	60	120	70	60	70	120	70	70

TABELA 5

Análises químicas (elementos menores, em ppm) de pulaskitos

	Pulaskitos I					Pulaskitos II				
	25	45	80C	64	Média	4	43A	110	111	Média
V	<5	22	66	70	40	36	15	70	<5	30
Ni	<5	<5	<5	9	<6	16	<5	14	<5	8
Ga	30	30	34	30	31	30	33	31	30	31
Rb	136	97	143	138	129	97	103	98	100	100
Sr	214	360	240	300	279	250	406	320	456	358
Y	19	31	29	25	26	30	24	50	52	34
Zr	250	290	560	344	360	365	246	290	350	313
Nb	<5	84	98	156	85	88	70	86	160	101
Ba	1280	2700	1160	1720	1720	1500	2400	2540	2700	2290
La	60	100	92	92	86	60	70	92	100	80

TABELA 6

Análises químicas (elementos menores, em ppm) de rochas de dique

	Álcali traquito	Nefelina fonolitos			Sodalita-nefelina fonolitos				Bostonito	Micro- essexito
	48D	4B	74A	Média	4A	44B	54A	Média	81B	58
V	<5	87	70	79	<5	54	70	62	<5	240
Cr	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	76	194
Co	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	39
Ni	13	8	12	7	<5	16	7	8	7	51
Ga	44	39	48	44	51	33	36	40	42	29
Rb	225	250	244	247	194	157	217	189	179	70
Sr	30	3	146	75	58	92	47	66	28	730
Y	<10	30	65	48	40	36	36	37	<10	38
Zr	350	805	1040	920	640	364	570	525	320	312
Nb	58	8	174	91	<5	<5	122	41	40	112
Ba	64	122	148	135	38	124	116	93	116	1200
La	70	90	160	125	92	136	120	116	36	150
Yb	3	3	6	5	4	2	3	3	<1	1

cionamento magmático de acordo com a condição de cada local em que os magmas se situaram: no núcleo de alto grau e na borda de baixo (Figs. 4, 5, 8 e 9).

A Fig. 3 permite verificar que até mesmo os pulaskitos I, que se localizam no núcleo do corpo principal sienítico, já sofrem razoável grau de assimilação das rochas encaixantes, aproximadamente da ordem de 30%. Motoki (1986) atribuiu o mecanismo de tal assimilação ao super-aquecimento do magma da intrusão inicial, tipicamente nefelina sienítico, provocado por injeções de magmas básicos ou ultrabásicos; como evidências do processo listou algumas feições: formas corroídas dos clinopiroxênios e opacos, composição dos clinopiroxênios em cada tipo litológico, etc.

No caso das rochas sieníticas, os graus de assimilação e de fracionamento magmático são controlados praticamente por um fator comum, a sua posição relativa dentro do corpo intrusivo. Isso significa que, definido o local de ocorrência da rocha, é possível estimar-se o seu grau de assimilação e de fracionamento. Graças a este controle quase monofatorial, as Figs 4, 5, 8 e 9 podem mostrar relativamente boas seqüências de variação química. Entretanto, a assimilação e o fracionamento que afetaram os magmas de diques foram provavelmente controlados por fatores mais complexos, com a dispersão dos pontos nas Figs. 6, 7 e 8 atribuída à ausência daquele controle.

CONCLUSÕES

A partir dos dados geoquímicos acima apresentados os autores sugerem o seguinte modelo para a evolução magmática do maciço alcalino da Ilha de Vitória:

1. Intrusão diapírica de magma tipicamente nefelina sienítico, subsaturado em sílica, cuja composição poderia corresponder ao ponto NS da Fig. 3.

2. Assimilação das rochas encaixantes, a partir da borda da intrusão, por meio de captura e fusão: na borda do corpo de alto grau e no núcleo de baixo.

3. Formação de estrutura zonada mostrando variação interna gradacional em composição do magma preenchendo o diápiro, sugerida pelos teores de quartzo e nefelina normativos: na borda com quartzo e no núcleo com nefelina.

4. Fracionamento dos magmas diferenciados pela assimilação até o momento da consolidação, de acordo com a condição de resfriamento em cada local: na borda de baixo grau e no núcleo de alto.

5. Como possível fator responsável pela assimilação aponta-se o super-aquecimento do magma nefelina sienítico da intrusão inicial, provocado por supostas injeções de magmas básico-ultrabásicos (Motoki, 1986).

AGRADECIMENTOS

Este trabalho representa parte da Tese de Doutorado de um dos autores (A.M.) submetida ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo em 1986. A sua realização tornou-se possível graças à colaboração prestada por várias pessoas desse Instituto e ao apoio financeiro dado pelo CNPq (Proc. 102506/81) a A.Motoki e pela FINEP (Proc. 53.85.0327.00) e FAPESP (Procs. 84/1395-4 e 86/0887-6) a C.B.Gomes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

GOMES, C.B.; DAMASCENO, E.C.; MELCHER, G.C.; BORN, H. (1967) Observações geológicas preliminares sobre a Ilha de Vitória, SP. Bol. Pan. Geoc., 26:334-346.

- HAMILTON, W. e MACKENZIE, W.S. (1965) Phase equilibrium studies in the system NaAlSiO_4 (nepheline)- KAlSiO_4 (kalsilite)- SiO_2 (silica)- H_2O . Mineral.Mag., 34:214-231.
- HEIMBOLD, R. (1965) Geologia e petrografia do Estado da Guanabara. Avulso 40, DGM/DNPM, Rio de Janeiro.
- MIYASHIRO, A. e KUSHIRO, I. (1977) Gansekigaku. Vol. III. Kyositsu Shuppan K.K.
- MOTOKI, A. (1986) Geologia e petrologia do maciço alcalino da Ilha de Vitória, SP. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências da USP, 245p. [inédito].
- MOTOKI, A. e GOMES, C.B. (1984) Caracterização geológica e petrográfica do maciço alcalino da Ilha de Vitória, SP. XXXIII Congr.Bras. Geol., Rio de Janeiro, RJ, Anais, IX:4392-4399.
- SCHAIRER, J.F. (1950) The alkali-feldspar join in the system NaAlSiO_4 - KAlSiO_4 - SiO_2 . J.Geol., 58:512-517.
- THORNTON, C.P. e TUTTLE, O.F. (1960) Chemistry of igneous rocks. I. Differentiation index. Amer.J.Sci., 258:664-684.
- ULBRICH, H.H.G.J. (1984) A petrografia, a estrutura e o quimismo de nefelina sienitos do maciço alcalino de Poços de Caldas, MG-SP. Tese de Livre-Docência, Instituto de Geociências da USP, [inédito].

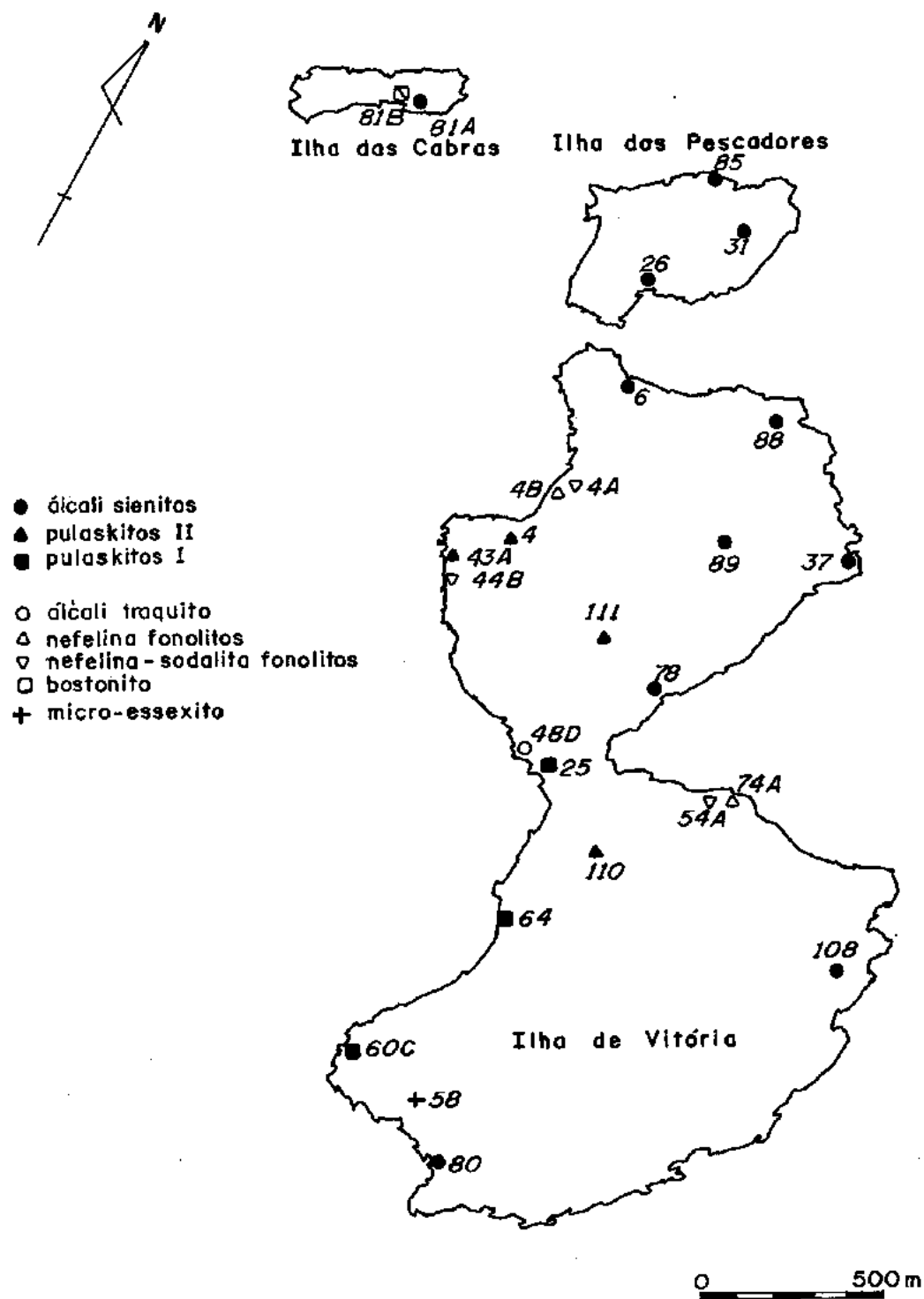


Figura 1. Mapa de localização das amostras. Símbolos válidos para as demais figuras.

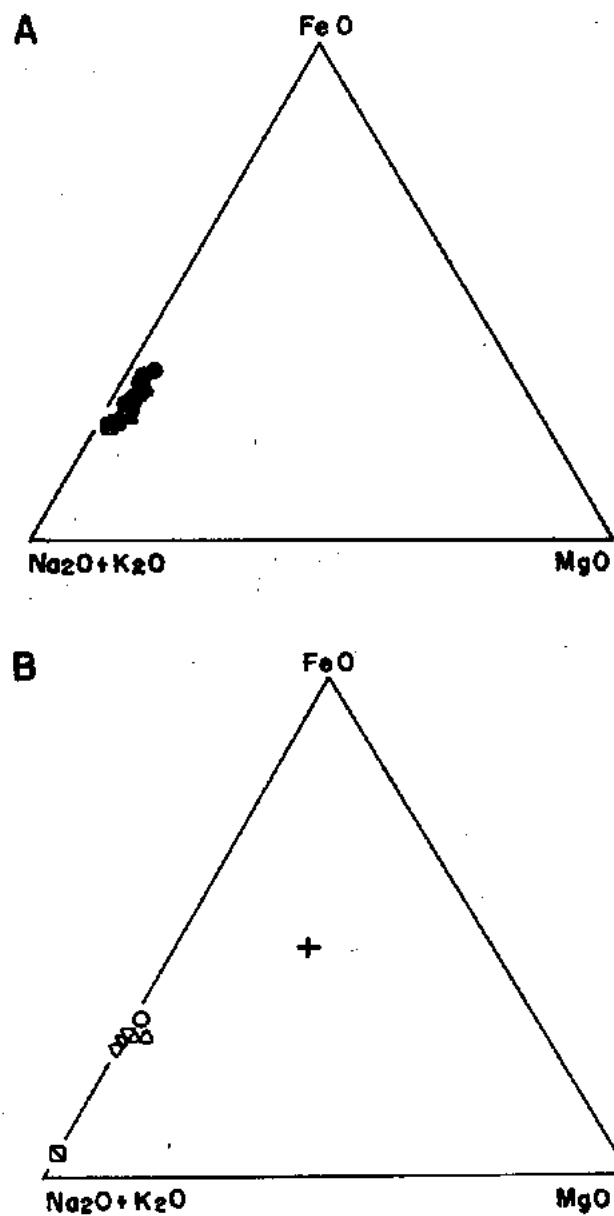


Figura 2. Projeção das rochas de granulação grossa (A) e fina (B) no diagrama AMF. FeO reflete a quantidade total de ferro recalculado co mo FeO.

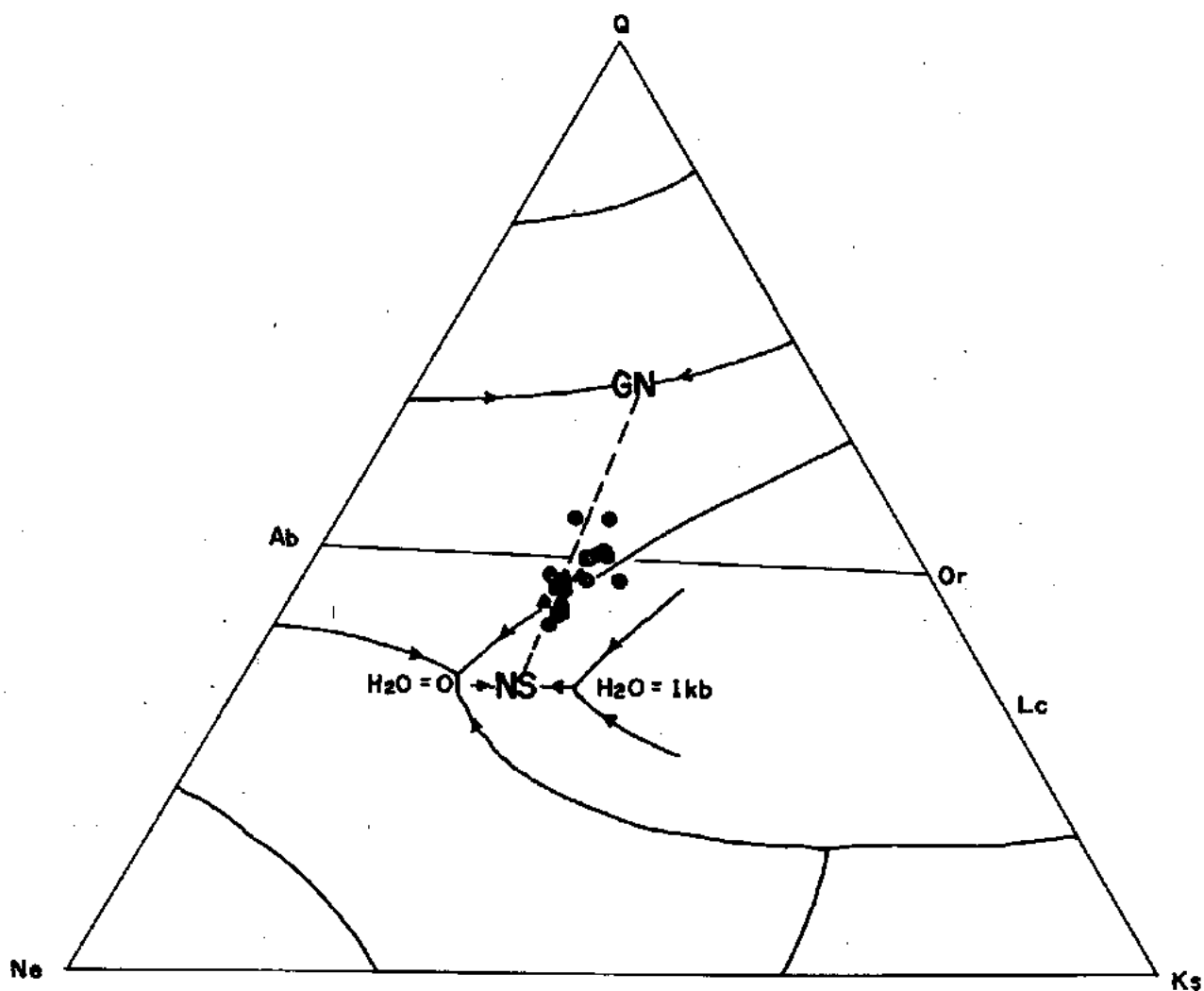


Figura 3. Diagrama triangular do sistema $\text{SiO}_2 + \text{NaAlSiO}_4 + \text{KAlSiO}_4$ no estado seco (Schairer, 1950) e úmido em 1 kb (Hamilton e Mackenzie, 1965) para a projeção das composições químicas das rochas sieníticas da Ilha de Vitória. NS e GN correspondem, respectivamente, à composição de rochas sieníticas e gnáissicas típicas; a linha tracejada simboliza suposta sequência de assimilação. Símbolos como na Fig. 1.

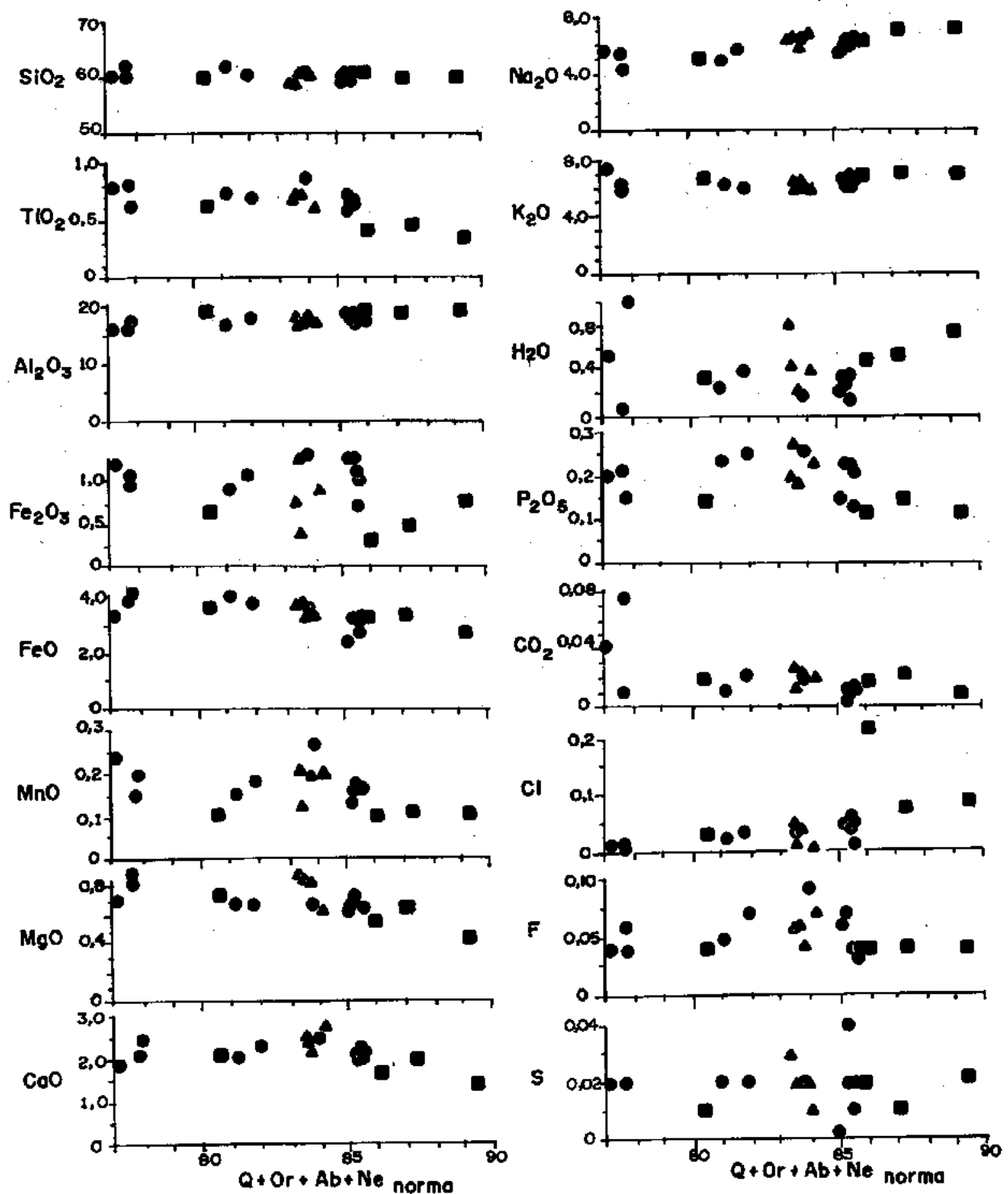


Figura 4: Diagramas de variação (elementos principais) para as rochas de granulação grossa. Símbolos como na Fig. 1.

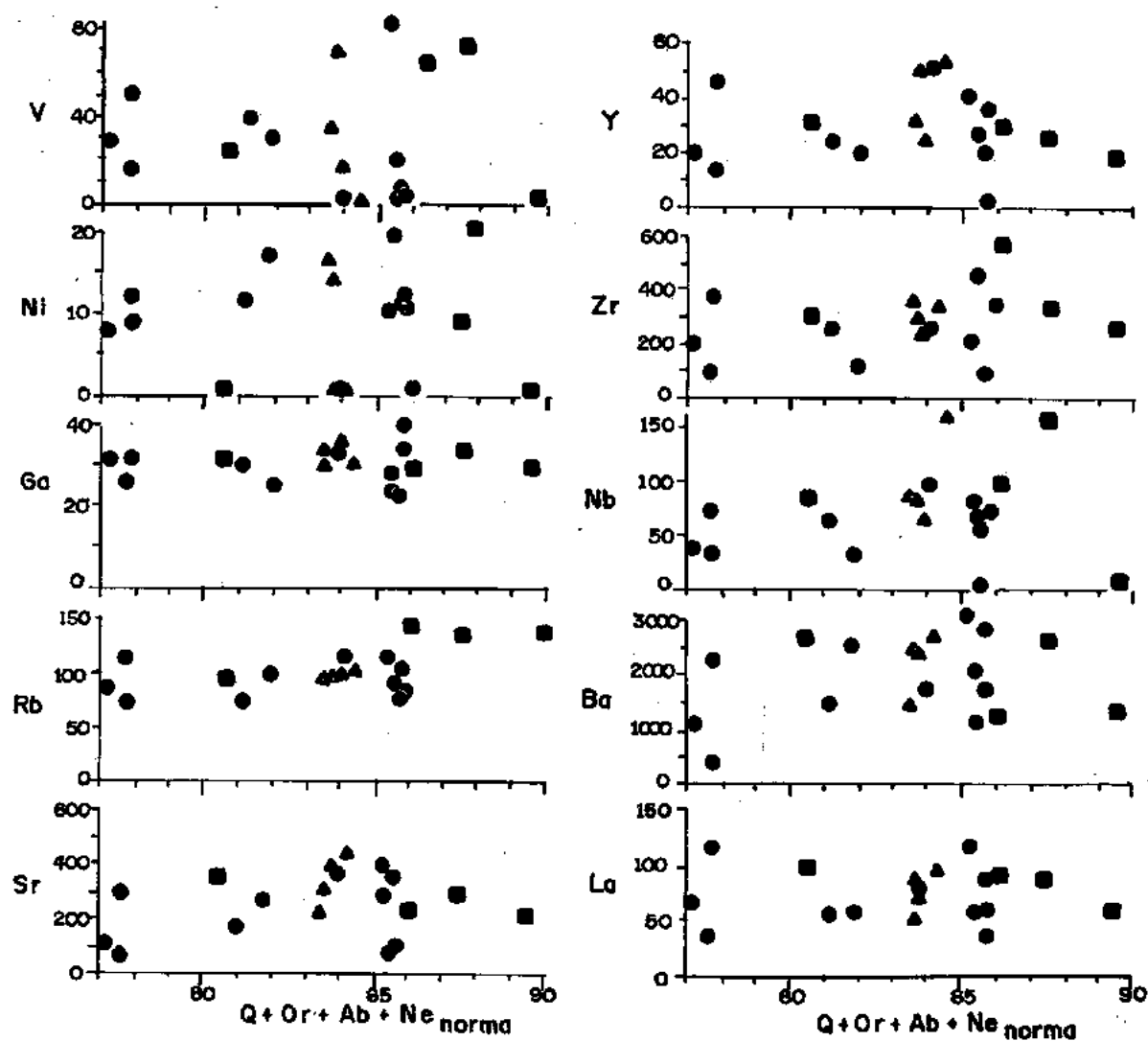


Figura 5. Diagramas de variação (elementos menores) para as rochas de granulação grossa. Símbolos como na Fig. 1.

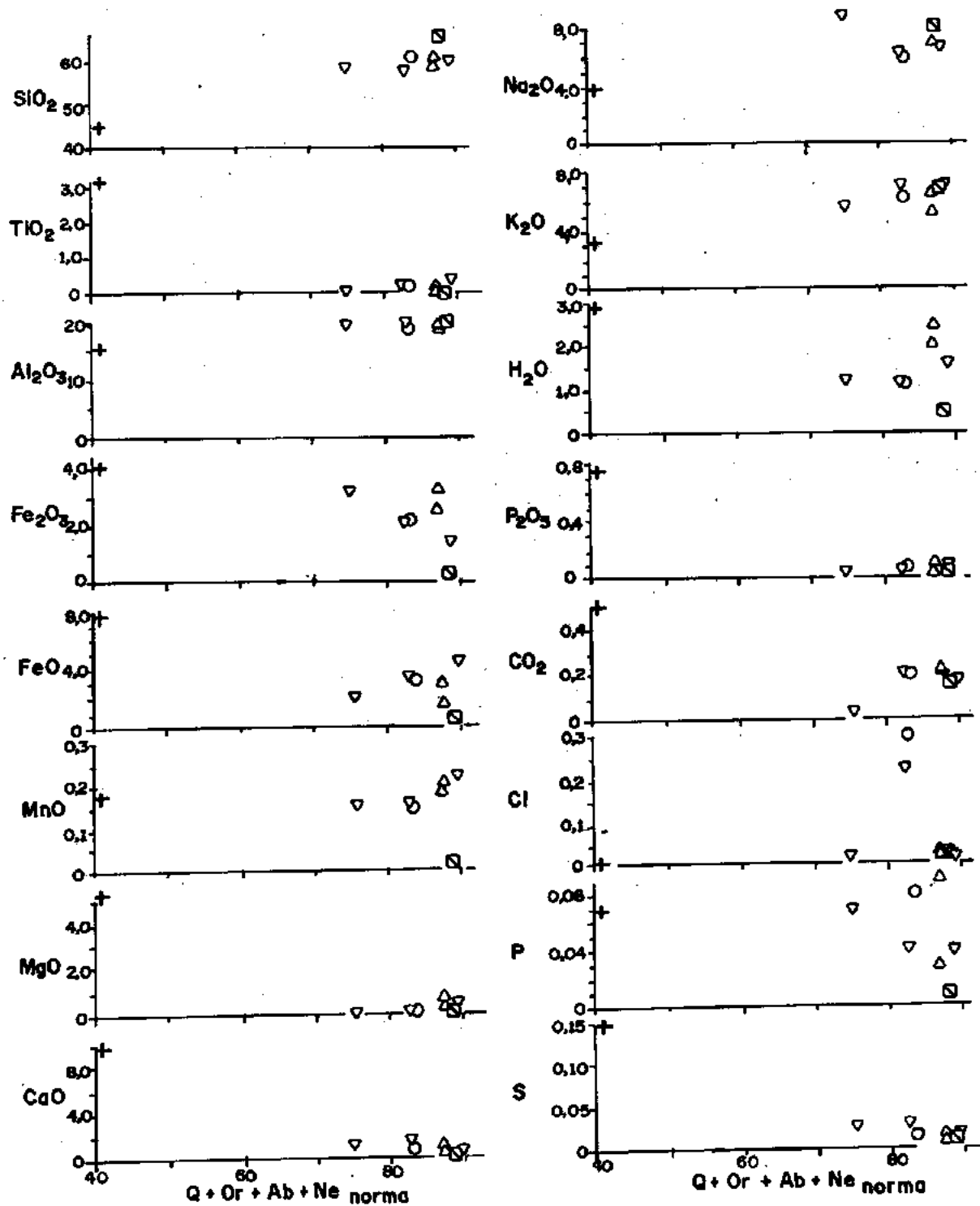


Figura 6. Diagramas de variação (elementos principais) para as rochas de granulação fina. Símbolos como na Fig. 1.

cionamento magmático de acordo com a condição de cada local em que os magmas se situaram: no núcleo de alto grau e na borda de baixo (Figs. 4, 5, 8 e 9).

A Fig. 3 permite verificar que até mesmo os pulaskitos I, que se localizam no núcleo do corpo principal sienítico, já sofrem razoável grau de assimilação das rochas encaixantes, aproximadamente da ordem de 30%. Motoki (1986) atribuiu o mecanismo de tal assimilação ao super-aquecimento do magma da intrusão inicial, tipicamente nefelina sienítico, provocado por injeções de magmas básicos ou ultrabásicos; como evidências do processo listou algumas feições: formas corroídas dos clinopiroxênios e opacos, composição dos clinopiroxênios em cada tipo litológico, etc.

No caso das rochas sieníticas, os graus de assimilação e de fracionamento magmático são controlados praticamente por um fator comum, a sua posição relativa dentro do corpo intrusivo. Isso significa que, definido o local de ocorrência da rocha, é possível estimar-se o seu grau de assimilação e de fracionamento. Graças a este controle quase monofatorial, as Figs 4, 5, 8 e 9 podem mostrar relativamente boas seqüências de variação química. Entretanto, a assimilação e o fracionamento que afetaram os magmas de diques foram provavelmente controlados por fatores mais complexos, com a dispersão dos pontos nas Figs. 6, 7 e 8 atribuída à ausência daquele controle.

CONCLUSÕES

A partir dos dados geoquímicos acima apresentados os autores sugerem o seguinte modelo para a evolução magmática do maciço alcalino da Ilha de Vitória:

1. Intrusão diapírica de magma tipicamente nefelina sienítico, subsaturado em sílica, cuja composição poderia corresponder ao ponto NS da Fig. 3.

2. Assimilação das rochas encaixantes, a partir da borda da intrusão, por meio de captura e fusão: na borda do corpo de alto grau e no núcleo de baixo.

3. Formação de estrutura zonada mostrando variação interna gradacional em composição do magma preenchendo o diápiro, sugerida pelos teores de quartzo e nefelina normativos: na borda com quartzo e no núcleo com nefelina.

4. Fracionamento dos magmas diferenciados pela assimilação até o momento da consolidação, de acordo com a condição de resfriamento em cada local: na borda de baixo grau e no núcleo de alto.

5. Como possível fator responsável pela assimilação aponta-se o super-aquecimento do magma nefelina sienítico da intrusão inicial, provocado por supostas injeções de magmas básico-ultrabásicos (Motoki, 1986).

AGRADECIMENTOS

Este trabalho representa parte da Tese de Doutorado de um dos autores (A.M.) submetida ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo em 1986. A sua realização tornou-se possível graças à colaboração prestada por várias pessoas desse Instituto e ao apoio financeiro dado pelo CNPq (Proc. 102506/81) a A.Motoki e pela FINEP (Proc. 53.85.0327.00) e FAPESP (Procs. 84/1395-4 e 86/0887-6) a C.B.Gomes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

GOMES, C.B.; DAMASCENO, E.C.; MELCHER, G.C.; BORN, H. (1967) Observações geológicas preliminares sobre a Ilha de Vitória, SP. Bol. Paran. Geoc., 26:334-346.

- HAMILTON, W. e MACKENZIE, W.S. (1965) Phase equilibrium studies in the system NaAlSiO_4 (nepheline)- KAlSiO_4 (kalsilite)- SiO_2 (silica)- H_2O . Mineral.Mag., 34:214-231.
- HEIMBOLD, R. (1965) Geologia e petrografia do Estado da Guanabara. Avulso 40, DGM/DNPM, Rio de Janeiro.
- MIYASHIRO, A. e KUSHIRO, I. (1977) Gansekigaku. Vol. III. Kyositsu Shuppan K.K.
- MOTOKI, A. (1986) Geologia e petrologia do maciço alcalino da Ilha de Vitória, SP. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências da USP, 245p. [inédito].
- MOTOKI, A. e GOMES, C.B. (1984) Caracterização geológica e petrográfica do maciço alcalino da Ilha de Vitória, SP. XXXIII Congr.Bras. Geol., Rio de Janeiro, RJ, Anais, IX:4392-4399.
- SCHAIRER, J.F. (1950) The alkali-feldspar join in the system NaAlSiO_4 - KAlSiO_4 - SiO_2 . J.Geol., 58:512-517.
- THORNTON, C.P. e TUTTLE, O.F. (1960) Chemistry of igneous rocks. I. Differentiation index. Amer.J.Sci., 258:664-684.
- ULBRICH, H.H.G.J. (1984) A petrografia, a estrutura e o quimismo de nefelina sienitos do maciço alcalino de Poços de Caldas, MG-SP. Tese de Livre-Docência, Instituto de Geociências da USP, [inédito].

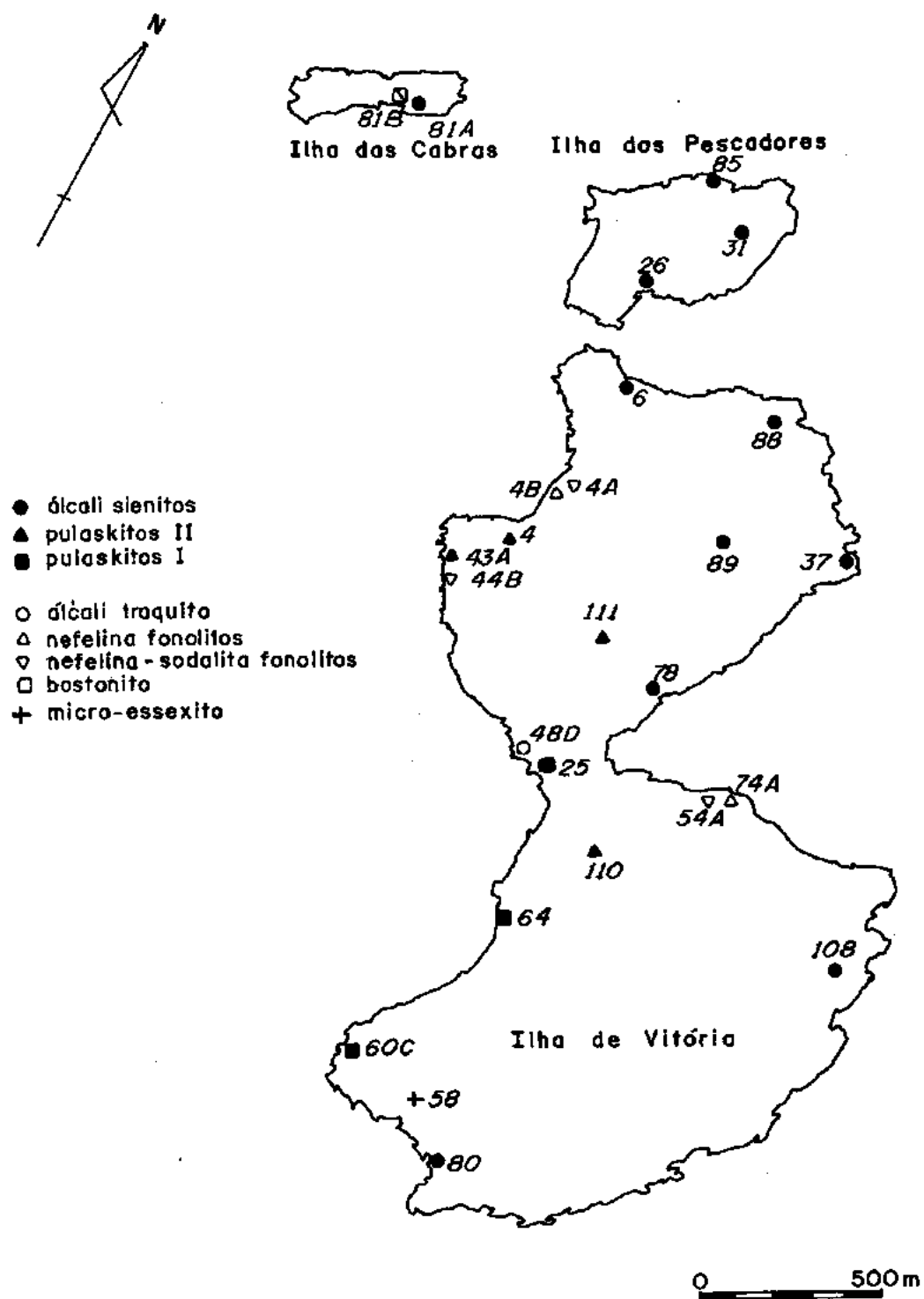


Figura 1. Mapa de localização das amostras. Símbolos válidos para as demais figuras.

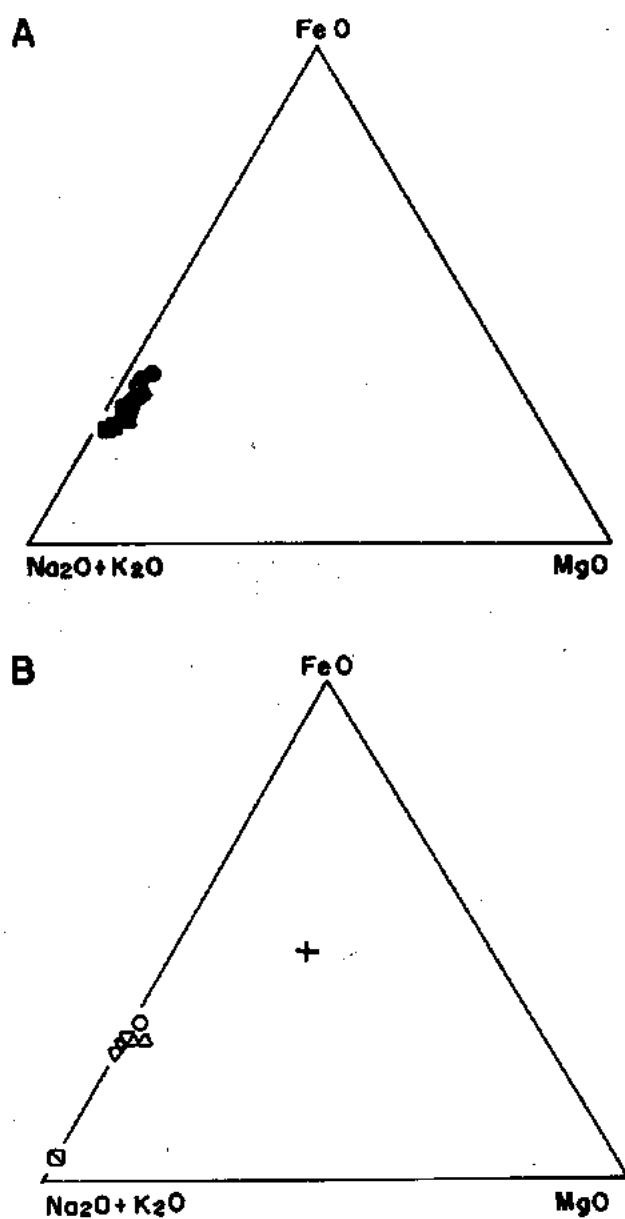


Figura 2. Projeção das rochas de granulação grossa (A) e fina (B) no diagrama AMF. FeO reflete a quantidade total de ferro recalculado como FeO .

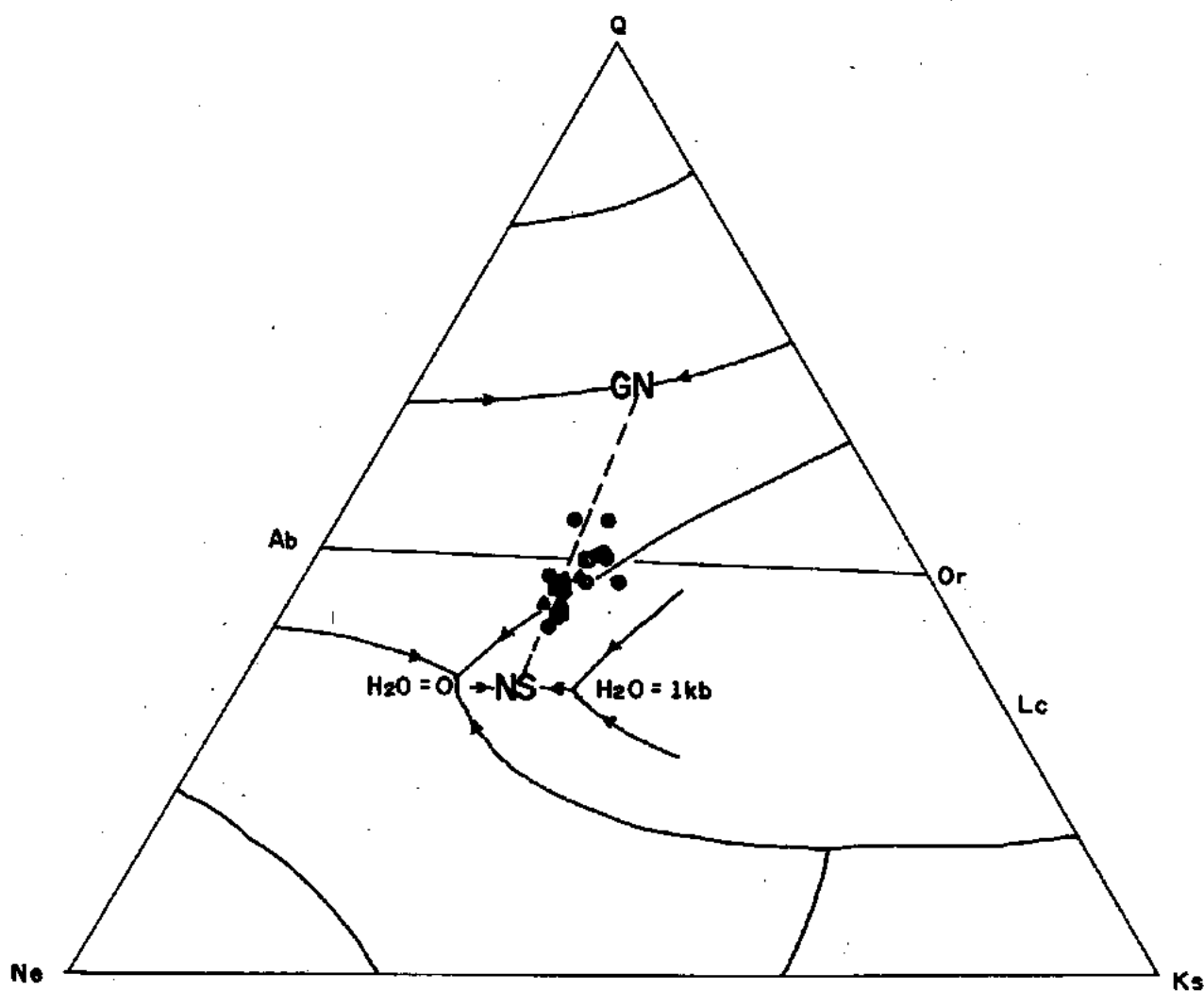


Figura 3. Diagrama triangular do sistema $\text{SiO}_2 + \text{NaAlSiO}_4 + \text{KAlSiO}_4$ no estado seco (Schairer, 1950) e úmido em 1 kb (Hamilton e Mackenzie, 1965) para a projeção das composições químicas das rochas sieníticas da Ilha de Vitória. NS e GN correspondem, respectivamente, à composição de rochas sieníticas e gnáissicas típicas; a linha tracejada simboliza suposta seqüência de assimilação. Símbolos como na Fig. 1.

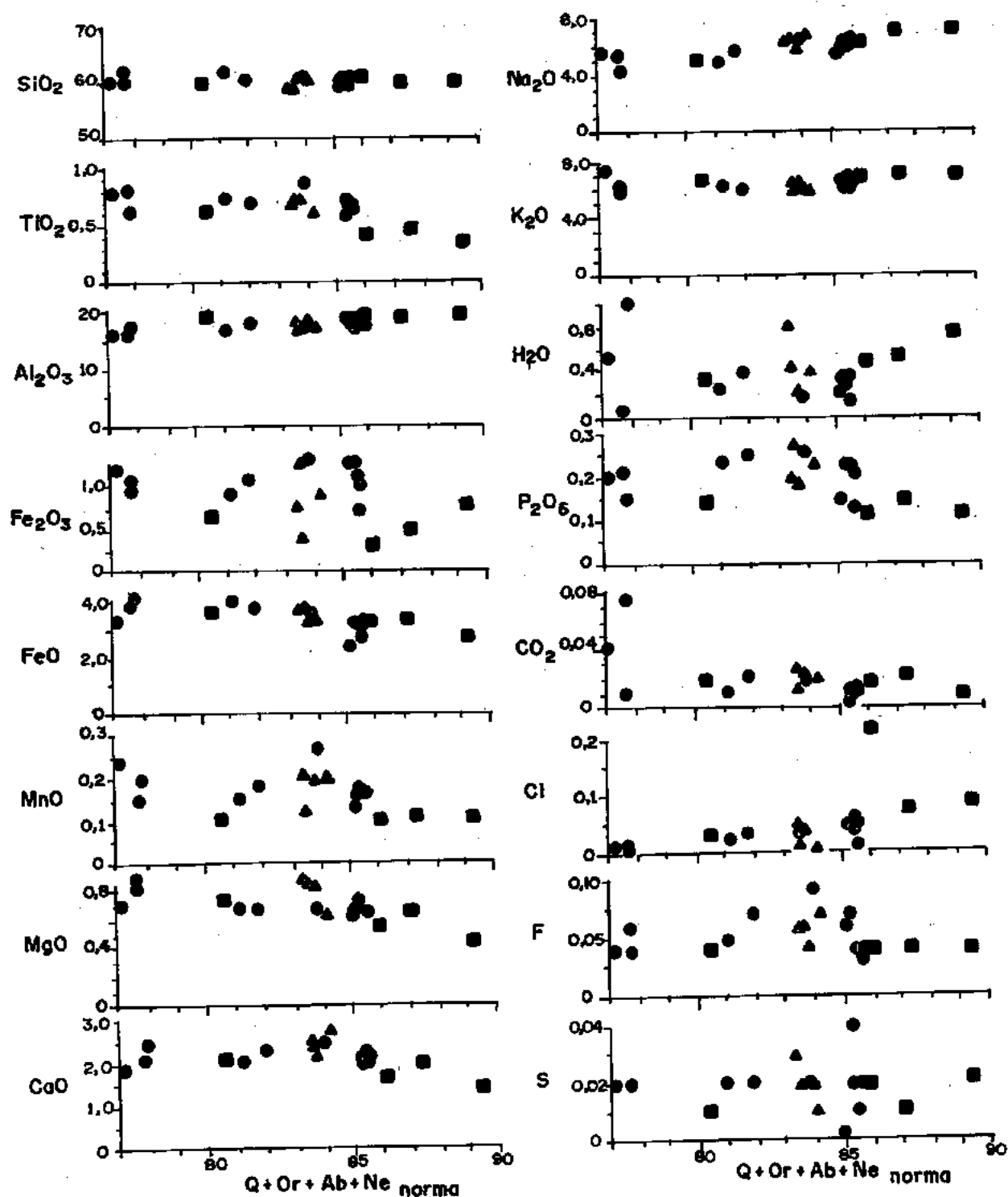


Figura 4. Diagramas de variação (elementos principais) para as rochas de granulação grossa. Símbolos como na Fig. 1.

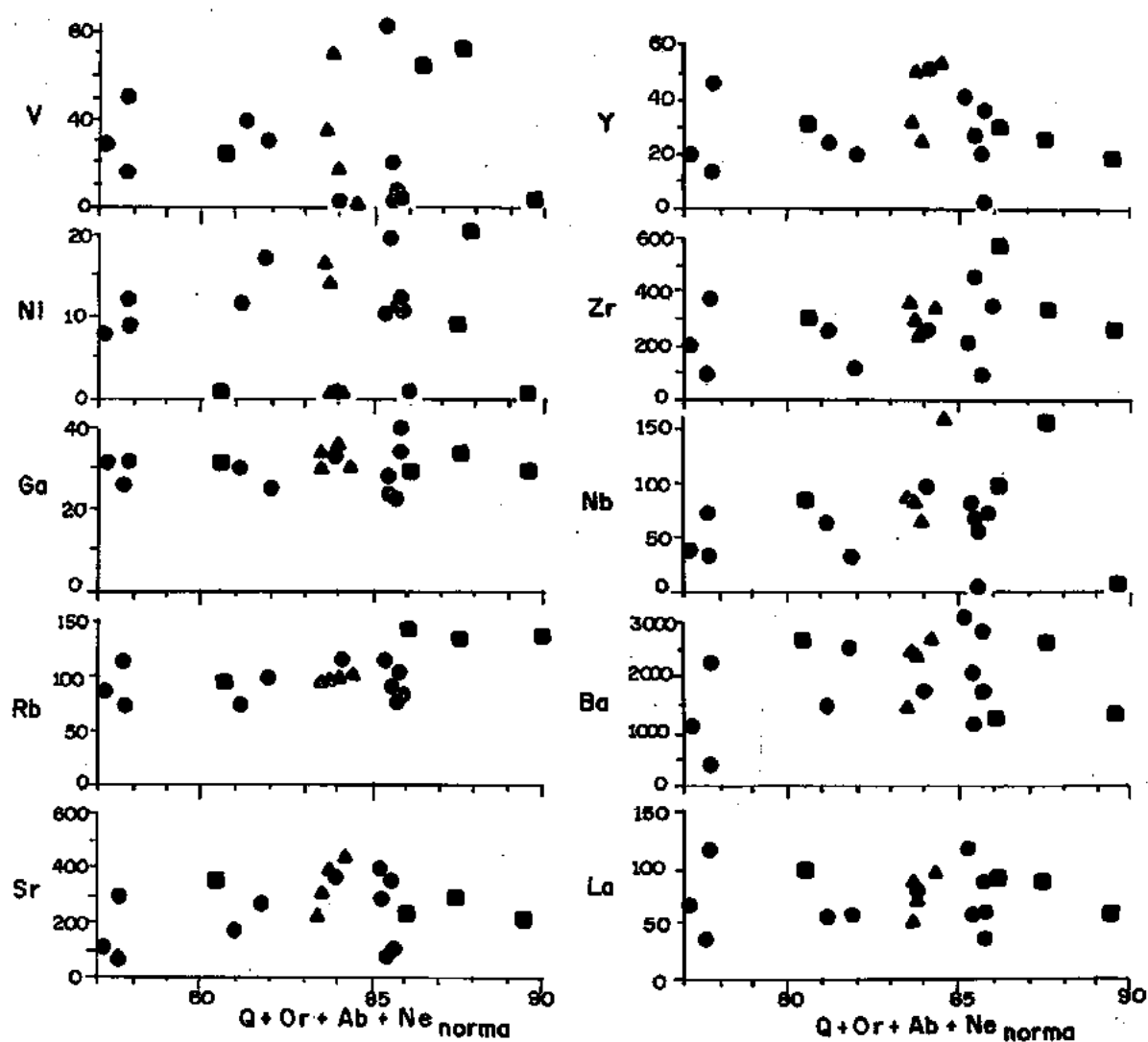


Figura 5: Diagramas de variação (elementos menores) para as rochas de granulação grossa. Símbolos como na Fig. 1.

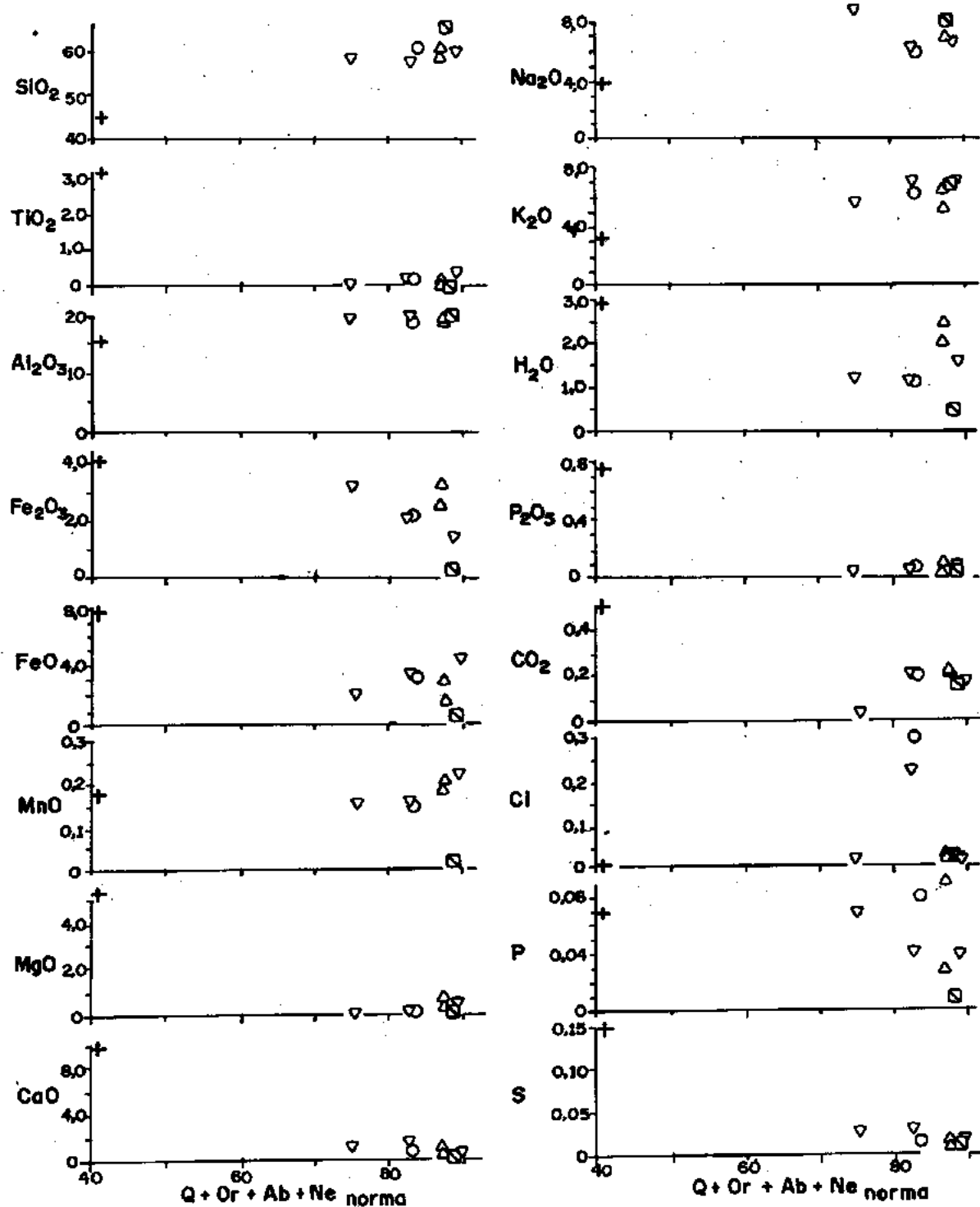


Figura 6. - Diagramas de variação (elementos principais) para as rochas de granulação fina. Símbolos como na Fig. 1.

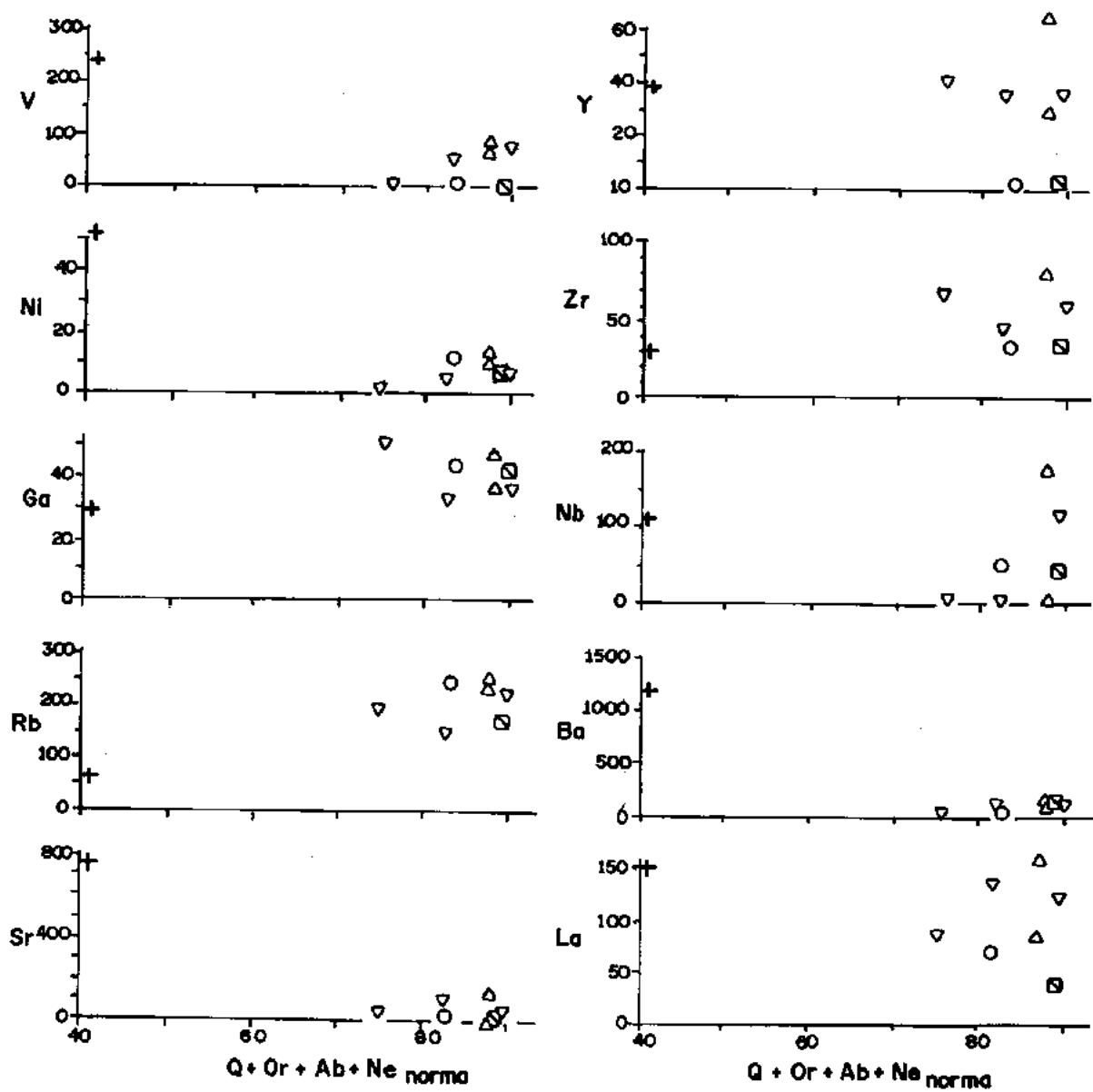


Figura 7. Diagrama de variação (elementos menores) para as rochas de granulação fina. Símbolos como na Fig. 1.

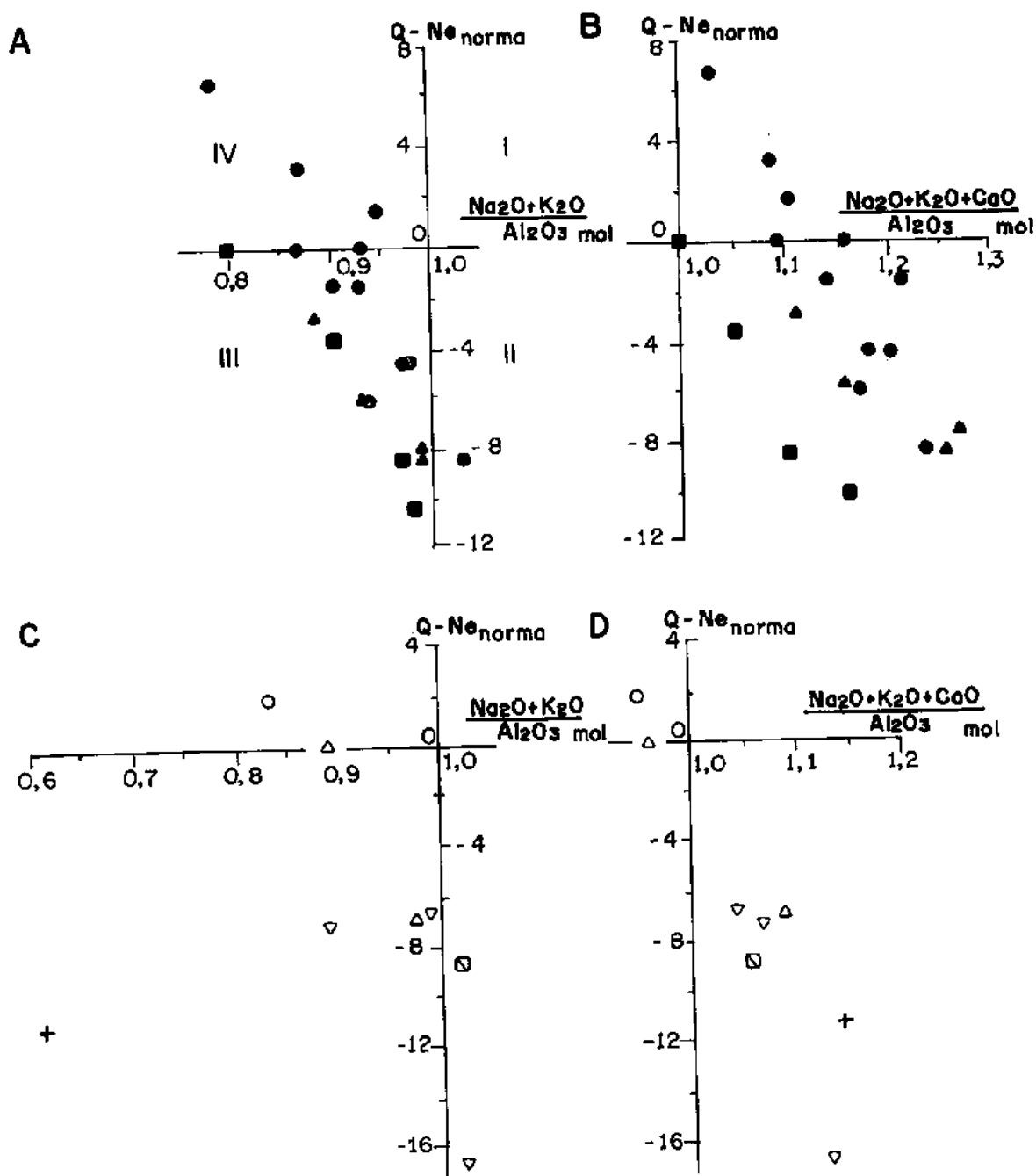


Figura 8. Projeção das rochas de granulação grossa (A e B) e fina (C e D) nos diagramas $(Na_2O + K_2O / Al_2O_3) \text{ mol}$ e $(Na_2O + K_2O + CaO / Al_2O_3) \text{ mol}$ em função dos valores normativos de quartzo-nefelina. Indicação dos quadrantes válida para os gráficos B, C e D, bem como para a Fig. 9. Símbolos como na Fig. 1.

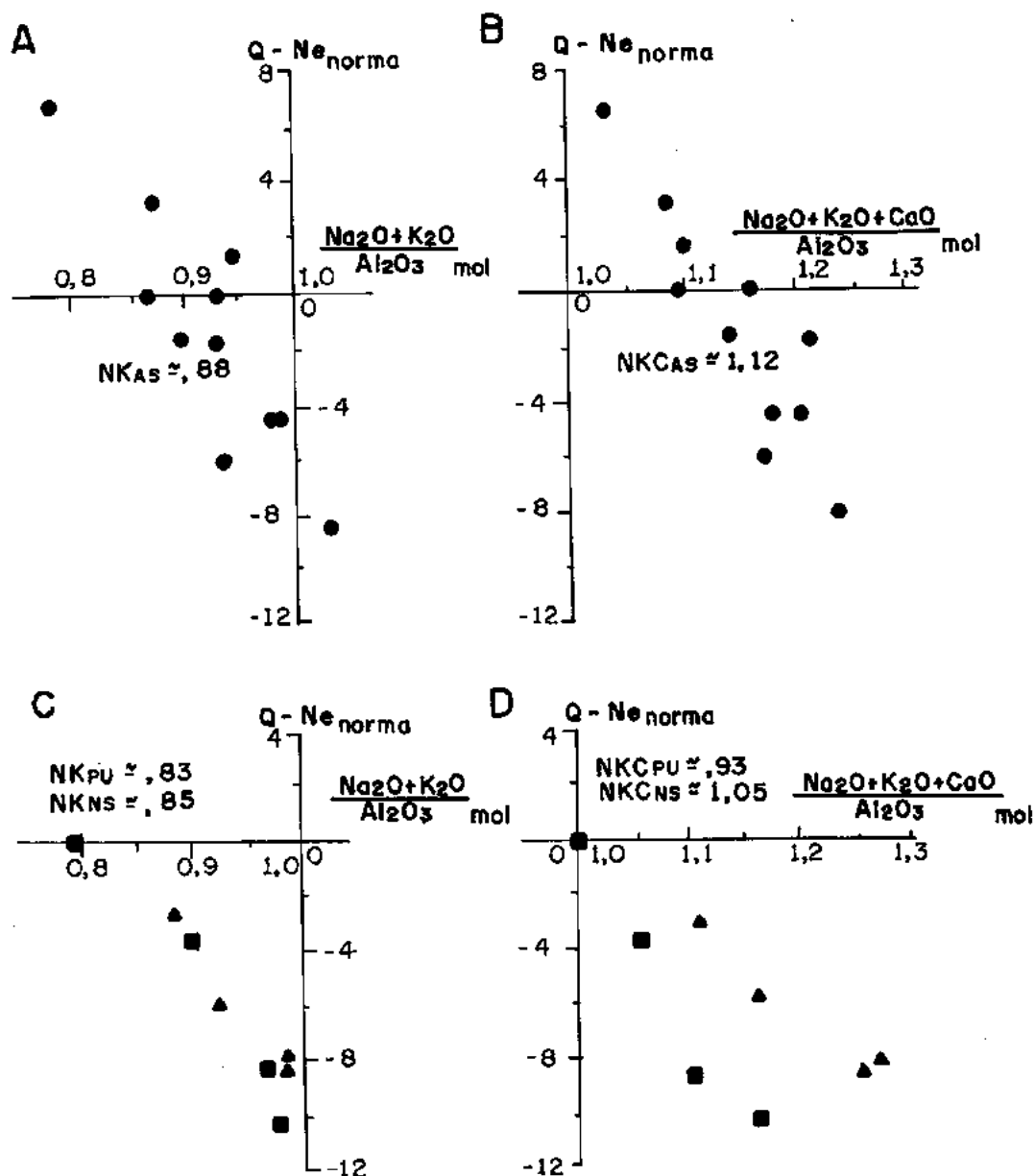


Figura 9. Variação de quartzo e nefelina normativos em função dos valores $(Na_2O+K_2O/Al_2O_3)_{mol}$ e $(Na_2+K_2O+CaO/Al_2O_3)_{norma}$ para álcali sienitos (A e B) e pulaskitos (C e D). Símbolos como na Fig. 1.

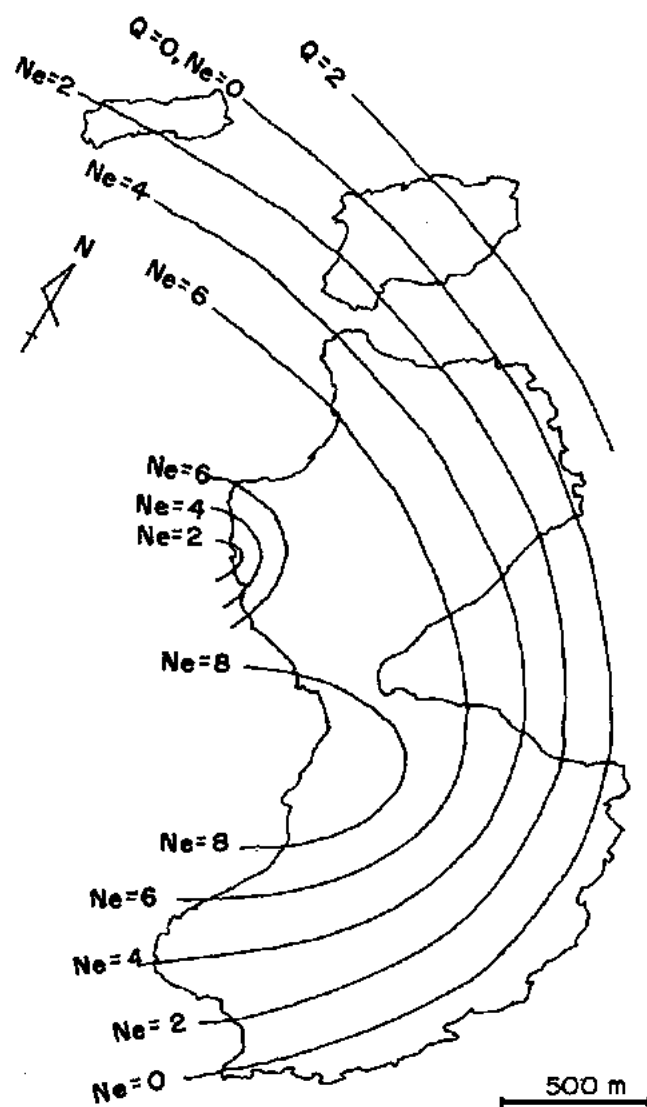


Figura 10. Distribuição de quartzo e nefelina normativos no corpo principal sienítico da Ilha de Vitória.

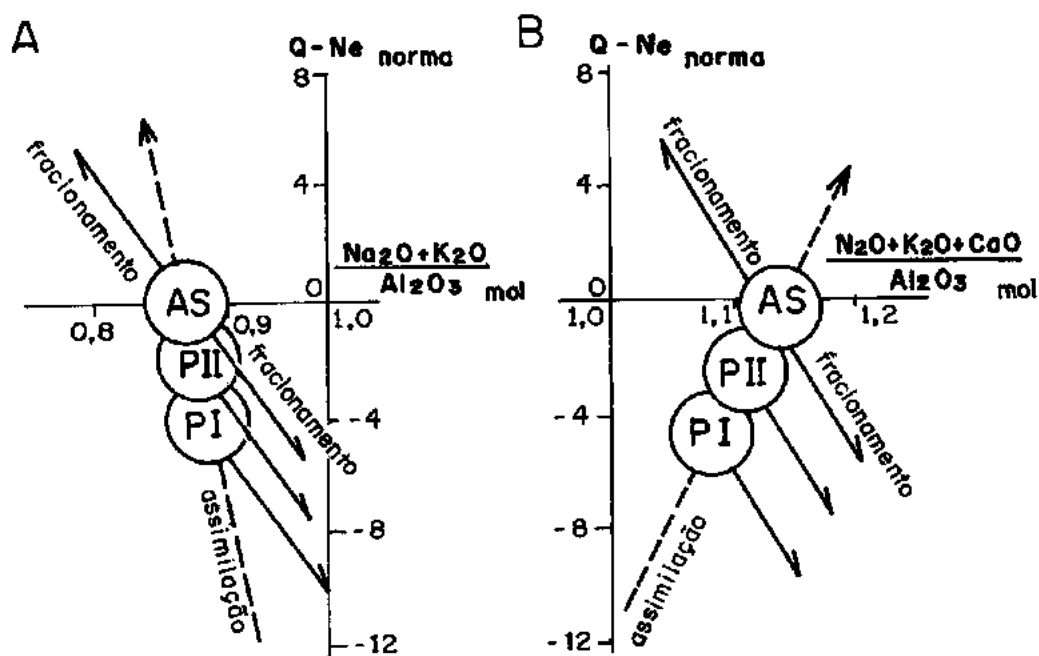


Figura 11. Esquema evolutivo dos magmas sieníticos nos diagramas álca li-sílica vs. álcali-alumina referentes ao maciço alcalino da Ilha de Vitória. As linhas cheias representam seqüências de fracionamento mag mático e as tracejadas indicam a direção de assimilação das rochas en caixantes. Os círculos marcados como AS, PII e PI correspondem, res pectivamente, a supostas composições de magma álcali sienítico e pulas kítico, logo após a assimilação.