

## LITOQUÍMICA E PETROGÊNESE DOS METABASITOS DO GRUPO SERRA DO ITABERABA, SP

Caetano Juliani; Hans Daniel Schorscher

Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Rua do Lago, 562, CEP 05508-080, São Paulo, SP, Brazil  
cjuliani@usp.br; hasho@usp.br

### Abstract

Metabasites represent the most important lithotypes of the Mesoproterozoic metamorphosed volcanosedimentary Serra do Itaberaba Group, within the central segment of the Ribeira fold belt. These metabasic rocks include pillow lavas indicating subaqueous eruptions. All the basic magmatic rocks suffered olivine, pyroxene, plagioclase and chromite fractionation in the magmatic stage and ocean-floor hydrothermal and metasomatic alteration of varied intensity producing spilites and very strongly transformed rocks in hydrothermal discharge zones. The geochemical characteristics allowed the classification of the metabasic rocks as N-type ocean-floor tholeiites generated in normal segments of a mid-oceanic ridge with possible gradations to types formed under the influence of mantle plumes (E-type MORBs). Similarities exist with the geotectonic environment of the Gulf of Aden spreading center.

**Keywords:** Grupo Serra do Itaberaba, metabasitos, metavulcano-sedimentar

### Introdução

O Grupo Serra do Itaberaba (Juliani *et al.*, 1986; Juliani, 1993), de idade mesoproterozóica (Juliani *et al.*, 2000), representa uma unidade metavulcano-sedimentar metamorfizada na fácie anfibolito médio, aflorante no segmento central da Faixa de Dobramentos Ribeira. A análise da distribuição dos litotipos, grau metamórfico e do estilo e intensidade da deformação indica que o Grupo Serra do Itaberaba mostra-se melhor preservado no núcleo de megasigmóides desenvolvidos nas e entre as diversas zonas de cisalhamento. Nota-se também que as zonas de cisalhamento expõem porções mais profundas (nas quais unidades metavulcânicas, representadas principalmente por metabasitos são mais abundantes), mais deformadas e mais intensamente metamorfizadas de sudoeste para nordeste. Inversamente, o Grupo São Roque, que recobre o Grupo Serra do Itaberaba, é melhor exposto no sentido sudoeste.

Esse grupo foi subdividido por Juliani (1993), da base para o topo, em três formações: a) Morro da Pedra Preta, basal, composta predominantemente por metabasitos, metavulcanoclásticas, metapelitos grafíticos, sulfetados e ferro-manganésiferos, BIFs, e rochas calciosilicáticas, além de andesito, dacito e riodesito intrusivos associados; b) Nhanguçu, formada por xistos ferro-manganésiferos, metamarcasitas e, subordinadamente, por metabasaltos, metatufos e mármore, recobertos por andaluzita-clorita xistos, depositados em ambiente de retro-arco; c) Pirucaia, constituída por quartzitos, quartzo micaxistos, metarrítmitos e pequenos leitos de metaconglomerados, de ambiente litorâneo e de base de talude continental. Posteriormente, Juliani *et al.* (2007) propuseram uma quarta formação, a Formação Jardim Fortaleza, predominantemente metassedimentar, representada por unidades de xistos pelágicos com contribuição de turbiditos mais abundantes no topo, e rochas calciosilicáticas superpostas à Formação Morro da Pedra Preta.

### Metabasitos do Grupo Serra do Itaberaba

Os metabasitos constituem um dos litotipos mais importantes e característicos Grupo Serra do Itaberaba em sua área tipo, sendo predominantes na Formação Morro da Pedra Preta. São representados por rochas metavulcânicas e metavulcanoclásticas, com intercalações de meta-aglomerados vulcânicos, metabrechas e meta-lápili-tufos, metatufos, meta-hialoclastitos, metasedimentos tufíticos, caipados por metapelitos grafíticos, sulfetados e ferro-manganésiferos, BIFs tipo Algoma, turmalinitos e rochas calciosilicáticas, e associados a andesito, dacito e riodesito intrusivos. São também comuns corpos de metabasitos e metavulcanoclásticas hidrotermalizadas e metassomatizadas pré-metamorfismo, formados por rochas com actinolita, biotita, gedrita, cummingtonita, plagioclásio, granada e cordierita, semelhantes a rochas de zonas de alteração hidrotermal pré-metamórfica de sistemas do tipo *Kuroko*.

Predominam anfibolitos e anfibólio xistos com hornblenda e plagioclásios intermediários e, mais raramente, diopsídio e granada. As estruturas primárias mais notáveis são *pillow* lavas, que confirmam a origem destas rochas a partir da cristalização de efusões basálticas em ambiente subaqueoso. As almofadas podem ter pequenas cavidades tabulares internas, originadas possivelmente por escoamento da lava durante o final da cristalização. Amígdalas ou vesículas são muito raras, indicando, ao contrário do observado nos metabasitos do Grupo São Roque, deposição em um ambiente de águas profundas.

### Litoquímica dos metabasitos do Grupo Serra do Itaberaba

#### Caracterização de possíveis alterações pós-magmáticas

Profundas alterações podem ocorrer no químismo de rochas básicas pela ação de processos hidrotermais e metassomáticos, genericamente denominados de pós-magmáticos, que se iniciam logo após o resfriamento do magma, especialmente se em ambiente submarino, e continuam através dos metamorfismos oceânico, regional, dinamotermal e dinâmico. No Grupo Serra do Itaberaba foram discriminadas amostras com alterações pós-magmáticas, que

caracteristicamente apresentaram evidências de introdução de  $\text{Na}_2\text{O}$ , geralmente acompanhada por perdas de  $\text{CaO}$  e ganhos ou perdas de  $\text{SiO}_2$  e forte mobilidade de  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Rb}$  e  $\text{Cs}$ . Tais alterações podem ser devidas a intercâmbios químicos de rochas magmáticas com a água marinha ainda quente, logo após o resfriamento do magma e, em seguida, durante o metamorfismo, já na fácie zeólita. Também foram identificadas amostras com composição próxima à linha de misturas epídoto-clorita, que indicariam composições de basaltos alterados por processos de espilitização e intemperismo submarino. As rochas consideradas como alteradas por processos hidrotermais e/ou metassomáticos foram denominados de RA. Foram também identificadas amostras com evidências de processos de diferenciação magmática (RM) e/ou alterações mais fortes (RAM), com mobilização intensa de alguns elementos considerados na bibliografia como relativamente imóveis.

### Caracterização do tipo do magma basáltico

A quase totalidade das rochas de composições basálticas e intermediárias do Grupo Serra do Itaberaba distribui-se no campo tholeítico dos diagramas de Kuno (1968) e Irvine & Baragar (1971). Apesar das mobilidades altas do sódio e do potássio, nota-se clara tendência subalcalina para as rochas metabásicas e para os tipos de composições intermediárias a ácidas associados. Isto pode ser devido aos teores baixos destes elementos na rocha original, em função do ambiente geotectônico onde foram gerados e/ou a lixiviações durante os processos metamórficos. As rochas afetadas por processos de alterações hidrotermais (RA), ou a composição basáltica alterada por processos magmáticos (RM) e as afetadas por ambos processos tendem a distribuir-se nas proximidades do campo alcalino.

Considerando-se a razão  $\text{Y}/\text{Nb}$  verificou-se que os tipos pouco alterados (RPA) têm composições essencialmente tholeíticas, com variações para basaltos transicionais. Valores de  $\log \text{Y}/\text{Nb}$  superiores a 2 observados para as amostras do Grupo Serra do Itaberaba seriam, segundo Pearce & Cann (1973), característicos de basaltos de fundo oceânico (OFB). No diagrama  $\text{FeO}^*/\text{MgO}$  versus  $\text{SiO}_2$  e  $\text{FeO}^*$  pode-se notar terem as rochas caráter essencialmente tholeítico, com tendências cálcio-alcalinas introduzidas por processos cumuláticos e/ou de alterações. Claramente não existem tendências komatiíticas para os metabasitos. Com o uso de elementos de transição relativamente imóveis, como Cr, Ni e V, a tendência tholeítica é reafirmada, bem como a cálcio-alcalina, vinculada às amostras consideradas como alteradas ou cumuláticas. Nestes diagramas observa-se, de modo geral, distribuição no campo dos tholeítos abissais, com derivações para arcos insulares imaturos.

### Classificação Química

O quimismo dos metabasitos estudados é compatível com o de rochas basálticas subalcalinas, do tipo de baixo potássio ou de fundo oceânico de Middlemost (1980). No diagrama TAS (*Total Alkalies Silica*) a composição das RAM é essencialmente de tholeítos, com variações para olivina basaltos e basaltos andesíticos, com as RA concentrando-se no campo dos lati-basaltos, basaltos andesíticos e olivina basaltos, juntamente com algumas RM e RAM. Estas últimas evidenciam processos cumuláticos, ao tenderem também para pícritos. Nos diagramas propostos por Winchester & Floyd (1977) os litotipos pouco alterados (RPA) distribuem-se quase que exclusivamente no campo dos basaltos subalcalinos, com as demais variando para rochas mais diferenciadas ou alcalinas.

### Análise do Quimismo e Petrogênese

Diagramas de  $\text{SiO}_2$  versus elementos maiores e menores, e muitos dos traços, evidenciam ampla dispersão dos teores, indicativos de fortes alterações introduzidas na composição química original das rochas. As amostras pouco alteradas (RPA) apresentam teores de  $\text{TiO}_2$  variando de 1,2 a 1,8% em peso, que praticamente não variam com os teores de  $\text{SiO}_2$ . Para os demais litotipos há uma variação relativamente alta nos teores de  $\text{TiO}_2$ , que sugere mobilidade mais alta do elemento. Curiosamente, parece haver um empobrecimento relativo do  $\text{Al}_2\text{O}_3$  com o aumento de  $\text{SiO}_2$ , ao invés de um pequeno enriquecimento, como seria esperado se o  $\text{Al}_2\text{O}_3$  aumentasse em função da redução de minerais máficos com o aumento do teor de plagioclásio provocado pelas diferenciações magmáticas. Os diagramas de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{FeO}$  mostra redução no teor de ferro com o aumento de  $\text{SiO}_2$ , de acordo com a evolução magmática em direção às rochas mais ácidas. Os teores de  $\text{MgO}$  das RPA definem uma tendência geral com forte redução acompanhando o aumento de  $\text{SiO}_2$ , mas nas RA alta mobilidade para o elemento é verificada. Os teores de  $\text{CaO}$  mostram-se muito dispersos para praticamente todos os tipos. O diagrama de  $\text{SiO}_2$  versus  $\text{Na}_2\text{O}$  exibe uma tendência magmática normal nos MPA, e indica extrema mobilidade do sódio nas RA, que seria incorporado nas rochas em substituição ao cálcio. Pode-se observar um enriquecimento relativo de  $\text{K}_2\text{O}$  com o aumento do teor de  $\text{SiO}_2$ , mas nas amostras RA teores mais baixos de  $\text{K}_2\text{O}$  são verificados. Elementos considerados como relativamente imóveis, como o Y, Ti e Zr, tiveram seus teores e as razões entre eles modificadas nas RA.

O conjunto das variações do quimismo das RA é muito semelhante àquele que ocorre nas rochas genericamente denominadas de espilitos. Desta forma, o quimismo das rochas RA, enriquecidas em sódio, suas texturas e estruturas ígneas preservadas (incluindo as *pillow lavas*), e a mineralogia permitem considerar estas rochas como meta-espilitos, uma vez que foram posteriormente afetadas por metamorfismo de grau mais elevado. Apesar dos processos de alteração pós-magmáticas, os meta-espilitos e os demais metabasaltos da Serra do Itaberaba têm, em sua maioria, teores de  $\text{K}_2\text{O}$  compatíveis com tholeítos abissais.

No diagrama relacionando o índice SME (*Silica Mafic Equivalent*),  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  (mol), de Pearce (1972), considerado como crítico para verificação de fracionamento de olivina e/ou piroxênio, a inclinação da reta encontrada para um conjunto das amostras RM é de aproximadamente 0,86, próximo do valor 1,0 definido para fracionamento somente de olivina e/ou clinopiroxênio com fórmulas químicas ideais, indicando que as amostras RM foram afetadas por processos cumuláticos envolvendo os dois minerais. Uma outra tendência, junto à qual se agrupam os meta-espilitos, tem razão (R) de 0,47, indicando participação no fracionamento de outra fase cárnea, provavelmente o plagioclásio, e/ou de processos de alteração.

#### Determinação do Ambiente Geotectônico

A maioria das RPA e as RA plotam no campo D de Pearce & Cann (1973), dos basaltos de fundo oceânico (OFB). As RM distribuem-se preferencialmente no campo dos tholeíticos de baixo potássio (LKT), e de basaltos de arcos de ilhas. As amostras RAM plotam, em geral, no campo dos basaltos cárneo-alcalinos, de arcos de ilhas. No diagrama de Floyd (1976) a maioria das amostras plotam no campo dos tholeíticos oceânicos. No diagrama de Pearce *et al.* (1975), a maioria das rochas da Serra do Itaberaba, devido ao próprio químismo original, com baixo  $\text{K}_2\text{O}$ , são distribuídas no campo dos basaltos oceânicos, além do que a lixiviação do potássio através das alterações de fundo oceânico e metamórficas reforçam ainda mais estes característicos. Nos diagramas de Floyd & Winchester (1975) nota-se clara tendência tholeítica e de rochas geradas em ambiente oceânico (OTB). A mesma tendência é observada no diagrama de  $\text{Y}/\text{Nb}$  versus  $\text{TiO}_2$ . Este conjunto de diagramas expressa novamente a tendência de tratar-se de tholeíticos de fundo oceânico e não continentais, e, principalmente de serem de ambiente de placas divergentes e não convergentes (arcos de ilhas). No diagrama proposto por Pearce & Norry (1979), a maioria das RPA distribuem-se no campo dos basaltos de cadeias meso-oceânicas, superposto ao dos basaltos de arcos de ilhas. Este diagrama, sobretudo, caracteriza, para os metabasitos do Grupo Serra do Itaberaba, uma origem diferente da de intraplacas, ou seja, no caso, de ilhas oceânicas, distinguindo-os de alguns do Grupo São Roque, definidos como originados em ilhas oceânicas, com base na forma e estrutura dos corpos de metabasitos, como os da região de Pirapora do Bom Jesus (Bergmann, 1988). O diagrama de Meschede (1986) exclui, novamente, a possibilidade de tratar-se de basaltos tholeíticos intra-placas ou alcalinos. Este diagrama sugere assim um ambiente essencialmente de basaltos do tipo N de cadeias meso-oceânicas, com graduações para tipos influenciados por plumas (devido ao aumento da alcalinidade), ou até mesmo, em parte, de MORB associados a arcos vulcânicos.

#### Análise dos Diagramas de Padrões Geoquímicos

Outra maneira de definir-se o ambiente geotectônico onde as rochas básicas se formaram é através de padrões geoquímicos, também conhecidos como *spider diagrams*. Considerando-se que a tendência de tratar-se essencialmente de basaltos do tipo MORB metamorfizados, foi adotada a média de tholeíticos do tipo normal de MORB, elaborada por Pearce (1982). Dentro de cada um dos conjuntos, as análises individuais exibem padrões variados, às vezes bastante distintos entre si. As RPA apresentam variabilidade expressiva nos teores de  $\text{K}_2\text{O}$ , Rb, Ba, Th, Nb, Y e Cr e menos intensa no Sr e Ce que, de modo geral, são relativamente móveis em processos diversos de alterações. Exetuando-se o tório e o ítrio muito elevados para algumas das amostras e o hafnio e o cromo baixos, o padrão normal seria típico de tholeíticos de zonas expansivas, do tipo Golfo de Aden (Pearce, 1982).

#### Análise dos Diagramas dos Padrões Geoquímicos de Elementos Terras Raras

O padrão da RPA é, de modo geral, suave, com leves tendências de redução das HREE e das LREE, exceto para o lantântio, semelhantes aos comumente definidos por tholeíticos transicionais, que apresentam padrões que variam de típicos MORB do tipo N, até padrões com fortes empobrecimentos ou fortes enriquecimentos em LREE. A anomalia negativa de cério foi observada em três amostras de RPA pode refletir empobrecimento devido à lixiviação em fundo oceânico, pela circulação de água marinha através do pacote rochoso.

#### Estimativa da Taxa de Expansão do Oceano Serra do Itaberaba

Considerando-se serem as rochas da Serra do Itaberaba essencialmente MORBs, e considerando-se somente as RPA, obteve-se uma taxa média de expansão de aproximadamente 1,4 cm/ano (com variação entre 1 a 3 cm/ano) utilizando-se o diagrama de Nisbet & Pearce (1973). Utilizando-se o diagrama de Pearce (1982), com  $\log \text{Zr}$  versus  $\log(\text{Zr}/\text{Y})$  é obtido resultado semelhante, com a maioria das amostras RPA fornecendo taxa média de expansão menor que 2 cm/ano e umas poucas com valores superiores. Os padrões geoquímicos das RPA posicionam-se próximo da razão 1,0, indicando taxas médias de expansão do assoalho oceânico (Pearce, 1982), compatível com os dados acima.

#### Estimativa da Profundidade de Geração dos Magmas Basálticos

As condições físicas de formação dos tholeíticos podem ser estimadas a partir dos minerais normativos presentes na rocha, com base em trabalhos experimentais de fusão de manto de diferentes composições. Para inferência da profundidade de geração dos basaltos da Serra do Itaberaba foram consideradas apenas as RPA. A presença tanto de orto- como clinopiroxênio normativos indica que as rochas básicas podem ter sido geradas pela fusão de um manto

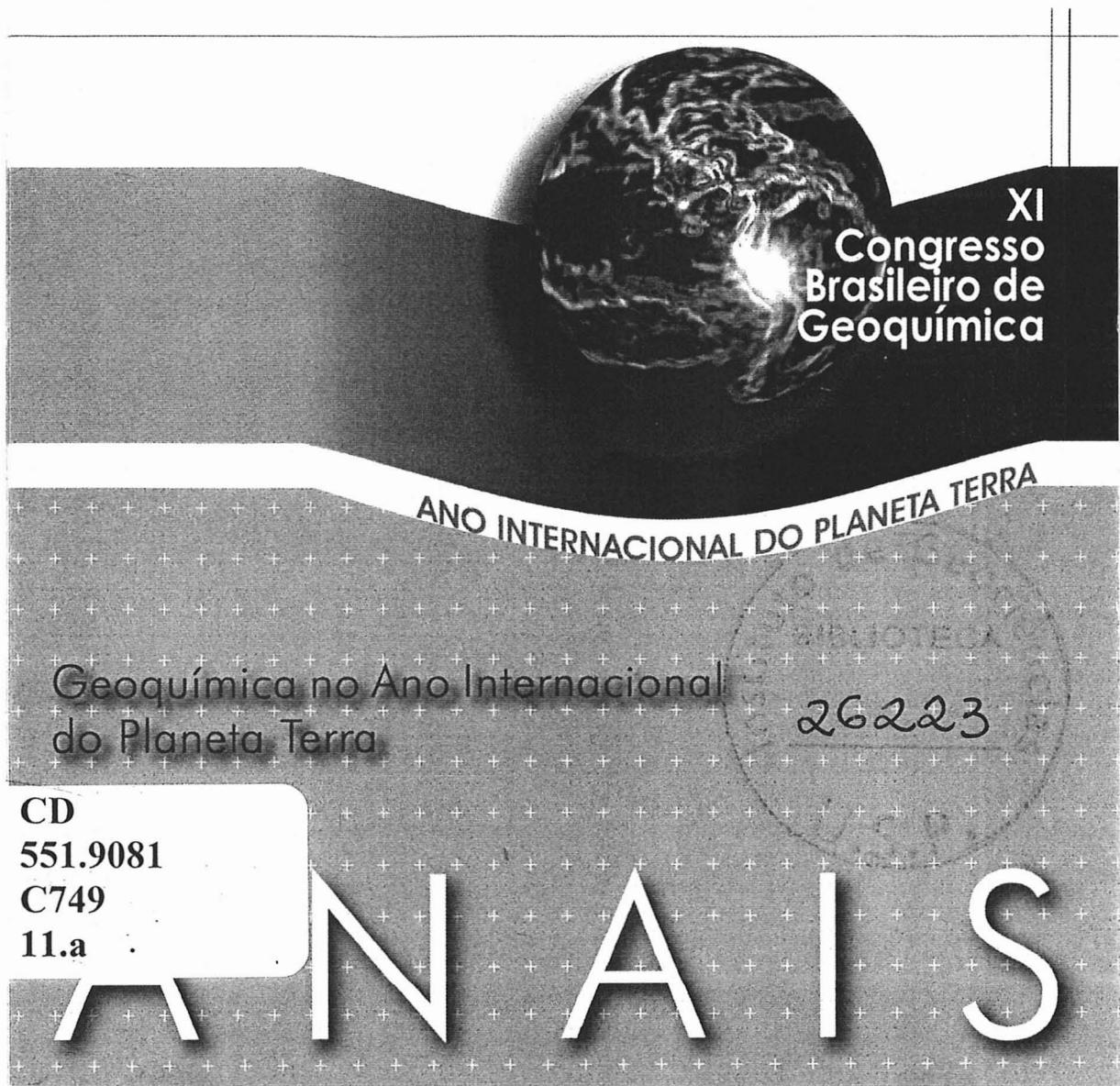
pirolítico em taxas pouco superiores a 20%. Considerando-se o teor máximo de olivina normativa, pouco mais de 15% em peso, a profundidade média em que estas rochas teriam sido geradas seria de ~ 35 km (a 10 kbar) e a cerca de 1300 °C, podendo ter alcançado mais de 50 km (15 kbar) a temperaturas superiores a 1400 °C. O quartzo normativo ocorre geralmente em pequena quantidade, sendo constituinte importante (> 5% em peso) em apenas três das amostras. Isto indicaria pressões mínimas de formação inferiores a 5 kbar (aproximadamente 17 km), com temperaturas máximas de 1250 °C. Entretanto, o quartzo normativo não é um constituinte importante em basaltos do tipo MORB, o que pode indicar que, pelo menos em parte, isto seja devido aos processos de alteração e/ou metamorfismo que afetaram os litotipos. O uso de diagramas pseudo-líquidos isomolares e iso-estruturais calculados para manto com composição pirolítica, forneceram condições físicas semelhantes para formação destes magmas, com indicação do fracionamento de olivina, piroxênios e plagioclásio.

### Considerações Finais

As rochas básicas, apesar das transformações químicas pós-magmáticas e do metamorfismo que as afetaram, foram caracterizadas como do tipo tholeiítico, gerado em ambiente oceânico, em zonas divergentes de placas. A análise dos padrões geoquímicos sugerem ambiente geotectônico semelhante ao do Golfo de Aden, ou a segmentos normais a transicionais de MORB. Foram também caracterizadas, em parte das rochas, alterações no químismo semelhantes às que ocorrem com os espilítos, bem como fracionamento de olivina, piroxênios e plagioclásios. Parte das rochas sofreram alterações mais intensas, provavelmente nas proximidades de condutos de descarga de exalações vulcanogênicas, onde alguns elementos considerados como relativamente imóveis, como o Y, Ti e Zr, tiveram seus teores e as razões entre eles modificadas. Foi observada mobilidade relativamente alta de alguns elementos considerados tradicionalmente como menos móveis nos processos de alteração hidrotermal e metamórficos, implicando em cuidados adicionais no uso deles para interpretação de ambientes geotectônicos de formação, especialmente os de seqüências metavulcano-sedimentares e em crosta intensamente recortada por zonas de cisalhamento, como a região da Serra do Itaberaba.

### Referências Bibliográficas

- Bergmann M. 1988. *Caracterização estratigráfica e estrutural da sequência vulcana-sedimentar do Grupo São Roque na região de Pirapora do Bom Jesus, Estado de São Paulo*. Dissertação de Mestrado, IGUSP, 155p.
- Floyd P.A. 1976 Geochemical variation in the Greenstones of S.W. England. *Journal of Petrology*, 17(4):522-545.
- Floyd P.A. & Winchester J.A. 1975. Magma type and tectonic setting discrimination using immobile elements. *Earth and Planetary Science Letters*, 27:211-218.
- Irvine T.N. & Baragar W.R.A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *The Canadian Journal of Earth Sciences*, 8:525-548.
- Juliani C. 1993. *Geologia, petrogênese e aspectos metalogenéticos dos grupos Serra do Itaberaba e São Roque na região das serras do Itaberaba e da Pedra Branca, NE da cidade de São Paulo, SP*. Tese de Doutoramento, IGUSP, 2v., 5 mapas, 803 p.
- Juliani C., Beljavskis P., Schorscher H.D. 1986. Petrogênese do vulcanismo e aspectos metalogenéticos associados: Grupo Serra do Itaberaba na região do São Roque - SP. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 34, Anais, v.2, pp. 730-743.
- Juliani C., Fernandes C.M.D., Monteiro L.V.S., Pérez-Aguilar, A. 2007. *Carta Geológica da Folha Leste de Atibaia, SF.23-Y-D-I, Escala 1:100.000*, Nota Explicativa. Programa Geologia do Brasil, CPRM/IGUSP.
- Juliani C., Hackspacher P., Fetter A.H., Dantas E.L. 2000. The Mesoproterozoic volcano-sedimentary Serra do Itaberaba Group of the Central Ribeira belt, São Paulo state, Brazil: implications for the age of the overlying São Roque Group. *Revista Brasileira de Geociências*, 30(1): 082-086.
- Kuno H. 1959. Origin of Cenozoic petrographic provinces of Japan and surrounding areas. *Bull. Volc.*, 20:37-76.
- Meschede M. 1986. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagrams. *Chemical Geology*, 56(3/4):207-218.
- Middlemost E.A.K. 1980. A contribution to the nomenclature and classification of volcanic rocks. *Geological Magazine*, 117:51-57.
- Nisbet E. & Pearce J.A. 1973. TiO<sub>2</sub> and a possible guide to past oceanic spreading rates. *Nature*, 46(5434):468-470.
- Pearce J.A. 1982. A "user's guide" to basalt discrimination diagrams. Apostila, inédito.
- Pearce J.A. & Cann J.R. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth and Planetary Science Letters*, 19(2):290-300.
- Pearce J.A. & Norry M.J. 1979. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 69:33-47.
- Pearce T.H. 1972. Chemical data as a critical test of differentiation mechanisms: the SME function. *Geological Society of America, Abstract with Programs*, 4(3):216.
- Pearce T.H., Gorman B.E., Birkett T.C. 1975. The TiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> diagram: a method of discriminating between oceanic and non-oceanic basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, 24(3):419-426.
- Winchester J.A. & Floyd P.A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20:325-343.



2007