

EDUARDO REIS VIANA ROCHA JÚNIOR

*Comportamento de terras raras e outros  
elementos-traço em soleiras e derrames da região  
norte-nordeste da Província Magmática do  
Paraná*

São Paulo  
2006

EDUARDO REIS VIANA ROCHA JÚNIOR

**Comportamento de terras raras e outros elementos-traço em  
soleiras e derrames da região norte-nordeste da Província  
Magmática do Paraná**

Dissertação apresentada ao Instituto de Astronomia,  
Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade  
de São Paulo para obtenção do título de mestre em  
ciências.

Área de Concentração: Geofísica  
Orientadora: Profa. Dra. Leila Soares Marques

São Paulo  
2006

A minha família, em especial  
a *painho* e a *mainha*.

# AGRADECIMENTOS

À minha orientadora profa. Dra. Leila S. Marques que nos anos de convivência me fez despertar um enorme interesse nas investigações dos processos geodinâmicos de grande escala, além de ter contribuído, e muito, para meu amadurecimento científico, intelectual e pessoal.

À profa. Dra. Ana M. G. Figueiredo, pela orientação na parte analítica, e aos colegas Regina B. Ticianelli e Leandro Gabioli pelas sugestões relativas à preparação das amostras e método de ativação neutrônica.

Aos professores Antônio J. Nardy e Marcos Aurélio, e aos amigos de pós-graduação Fábio Machado e Eloíza Squisato, do Departamento de Metalogenia e Petrologia da UNESP – Rio Claro, que muito contribuíram na “gênese” desta pesquisa, como também nos proveitosos campos e congressos compartilhados.

Ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – IAG da Universidade de São Paulo – USP, pela oportunidade de realização do curso de mestrado. Em especial, aos seus professores, que direta e indiretamente, contribuíram para realização desta dissertação de mestrado, como também para meu crescimento científico.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN – SP), por colocar à disposição o laboratório de análises por ativação com nêutrons.

Ao Departamento de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Estadual de Santa Cruz – UESC, pela realização do curso de bacharelado em Física.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP: processos 04/03892-0 e 04/10081-9) pela concessão da bolsa de mestrado e apoio financeiro para realização desta pesquisa.

Agradeço a Deus por ter me dado à oportunidade de estar no mundo e ter guiado os meus passos e me orientado durante todos esses anos, principalmente nos dois últimos anos, que fiquei longe de minha família “meu aconchego”; melhores amigos, e, “*oxente*”, não poderia esquecer de minha linda “*terrinha*”, a chamada São Jorge dos Ilhéus, Terra da Gabriela (Jorge Amado), localizada no sul da Bahia.

Aos meus pais (Eduardo R. V. Rocha e Ana M. A. Rocha) que sempre confiaram em meus sonhos, mesmo nos mais loucos, e me ensinaram a acreditar que é possível realizá-los, além de me mostrarem que trabalho duro, perseverança e honestidade são as ferramentas ideais para atingirmos nossas metas.

Meus sinceros agradecimentos às minhas irmãs (Marcelle A. Rocha e Luana C. A. Rocha) e ao meu sobrinho (Luan Rocha) que sempre vêm o lado belo de tudo que faço, apesar de vários dias, meses, ou melhor, anos, que fiquei longe do lar em busca de meu grande sonho, e assim mesmo continuaram a me incentivar em meu crescimento pessoal e profissional. Também quero expressar minha enorme gratidão aos meus avós (vó Nenga), tios e primos, que acreditaram e acreditam em meus sonhos e ideais.

Ao Movimento Escalada que me faz “Viver em Clima de Oração” e crer que: “Vale a pena acreditar no que os olhos não podem ver. Vale a pena ser feliz porque há uma luz maior, há uma luz maior ...” (Pe. Mane).

Sou também grato ao Pe. Aldemiro Sena (Miro) meu conselheiro espiritual e grande amigo. “É no alto que está nossa meta, não na terra”, por isso, “procurai o que está no alto, lá onde se encontra Cristo”.

Aos meus grandes amigos “baianos”: Luíza Andrade, Anderson André, Dayse, Cicinho, Juliane Nunes, Aline Bastos, Ceceu, Duduzinho, Daniel, Agostinho, Luciana, Valdir, Vick, Paula, Dark’anne, Victor, entre outros, que apesar da distância e saudade, preserva a amizade e a comunicação (“*Messenger*”).

Aos amigos “Viciados em Vôlei do CEPE-USP” e da “Atlética da Física” que minimizaram meu *stress* e ansiedade durante a redação desta dissertação nos últimos meses, principalmente à Kátia, Carlos Eduardo (Carlitos), René (Rê), Rafaela (Rá), “Luizes” (Poli e Geografia), Sidney (Mauro), Eduardo, Humberto, Alexei, Fernanda, entre outros, meu muito obrigado.

Aos amigos e colegas do IAG, que conheci durante os dois últimos anos, e principalmente àqueles que sentiram o mesmo que eu, ficando longe da família e amigos em busca de um ideal comum. De modo especial à Manuelle, Alanna, Marcos Vasconcelos, Thiago, Franklin, Selma, Elizete, Lucieth, Alan, Deborah, Erika, Rosana, Alexandre Lago, Wellington, Cláudia, Lívia, Rodrigo, Kleidson e aos do departamento de educação, saúde e alimentos, Ana, Aline e Ilana, respectivamente.

É muito difícil agradecer a todos sem esquecer, inevitavelmente, de alguém ...

# RESUMO

ROCHA JR., E. R. V. ***Comportamento de terras raras e outros elementos-traço em soleiras e derrames da região norte-nordeste da Província Magmática do Paraná.*** 2006. 95 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

Foram determinadas as concentrações de terras raras (La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb e Lu) e outros elementos-traço (Cs, Rb, Ba, U, Th, Ta, Hf, Co e Sc) em 51 amostras representativas de derrames e soleiras das regiões norte e nordeste da Província Magmática do Paraná, que ocorrem no norte do estado de São Paulo e no sul de Minas Gerais. O método utilizado para estas determinações foi a técnica de ativação com nêutrons térmicos e epitérmicos, seguida de espectrometria gama de alta resolução, que forneceu resultados com elevados níveis de precisão e de exatidão (geralmente com valores inferiores a 10%), conforme atestado pelas concentrações determinadas no material geológico de referência JB-1. Os dados obtidos foram analisados conjuntamente com determinações de elementos maiores, menores e dos traços Sr, Y, Zr, Nb, Cr e Ni, realizadas por fluorescência de raios – X. As rochas investigadas são quimicamente representadas por basaltos toleíticos, andesi-basaltos toleíticos e lati-basaltos, enquanto as mais evoluídas ( $MgO < 3\%$ ), que ocorrem de modo muito subordinado, são representadas por latitos e lati-andesitos, além de um riodacito. As rochas básicas ( $SiO_2 < 55\%$  e/ou  $MgO > 3\%$ ) são caracterizadas por apresentarem conteúdos de  $TiO_2$  maiores que 3%, sendo que grande maioria possui fortes semelhanças com os magmas-tipo Pitanga, embora tenham sido encontrados alguns derrames, localizados no norte do estado de São Paulo, geoquimicamente semelhantes aos magmas-tipo Urubici (típicos do sul da província). Rochas básicas com concentrações de  $TiO_2$  entre 2% e 3% foram

também raramente encontradas, as quais representam equivalentes intrusivos de derrames Paranapanema. As rochas mais evoluídas só foram encontradas em soleiras e possuem características geoquímicas que indicam diferenciação a partir de magmas do tipo Pitanga. O comportamento de elementos maiores, menores e traços nas rochas intrusivas e extrusivas do tipo Pitanga, incluindo as mais diferenciadas, é compatível com um processo de evolução por cristalização fracionada envolvendo plagioclásios, clinopiroxênios e titano-magnetitas. A comparação entre derrames e soleiras do tipo Pitanga indica a atuação significativa de processos de diferenciação *in situ* nas rochas intrusivas, que causaram uma maior variabilidade composicional (soleiras: MgO entre 2,3% e 6,4%; derrames: MgO entre 3,2% e 5,5%). As rochas mais diferenciadas são também caracterizadas por anomalias positivas de európio, que sugerem o acúmulo de plagioclásio devido a esse processo de fracionamento. Os dados obtidos também reforçam que não houve participação significativa de componentes astenosféricos do tipo N-MORB, E-MORB e OIB na gênese das rochas básicas investigadas, as quais possuem grande similaridade geoquímica com os basaltos da Cadeia Rio Grande (sítio 516F) e Cadeia Walvis (sítio 525A), especialmente com os desta última, indicando o envolvimento do componente mantélico EMI.

Palavras-chave: Província Magmática do Paraná; Soleiras e derrames da Bacia do Paraná; Províncias de basaltos continentais; Rochas basálticas; Elementos terras raras; Análise por ativação neutrônica.

# ABSTRACT

ROCHA JR., E. R. V. *Rare earth and other trace element behaviour in sills and flows from north-northeast region of Paraná Magmatic Province*. 2006. 95 f. Dissertation (Master degree) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

It is presented the determination of rare earth (La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb and Lu) and other trace (Cs, Rb, Ba, U, Th, Ta, Hf, Co and Sc) element concentrations in 51 representative samples of flows and sills from northern and northeastern Paraná Magmatic Province, particularly those located at north of São Paulo State and south of Minas Gerais. The employed analytical method to those determinations was thermal and epithermal neutron activation analysis, followed by high resolution gamma ray spectrometry, which provided high precision and accuracy results (in general better than 10%), as verified by determinations in the international geological reference material JB-1. The obtained results were integrated with major, minor and trace (Sr, Y, Zr, Nb, Cr and Ni) elements determined by X-ray fluorescence. The investigated rocks are mainly represented by tholeiitic basalts, tholeiitic andesite-basalts and latite-basalts, with subordinate relatively evolved ( $\text{MgO} < 3\text{wt}\%$ ) lithotypes, which are represented by latites and latite-andesites, besides one rhyodacite. The basic rocks ( $\text{SiO}_2 < 55\%$  and/or  $\text{MgO} > 3\%$ ) are characterized by presenting  $\text{TiO}_2$  contents higher than 3wt%, very similar to Pitanga magma-type, although some flows, located at northern São Paulo State, geochemically similar to Urubici magma-type (typical of southern Paraná) were also found. Basic rocks having  $\text{TiO}_2$  contents between 2 and 3 wt% were rarely encountered and represent intrusive equivalents of Paranapanema flows. The more evolved rocks were just found in sills and have geochemical characteristics that indicate differentiation from Pitanga

magma-types. Major, minor and trace element behaviour of intrusive and extrusive rocks of Pitanga type, including those differentiated ones, is compatible with evolution by fractional crystallization of plagioclases, clinopyroxenes and titanium magnetites. The comparison between flows and sills of Pitanga type indicates the significant role of *in situ* differentiation in the genesis intrusive rocks, causing its larger compositional variability (sills: MgO between 2.3 and 6.4wt%; flows: MgO between 3.2 and 5.5wt%). The most evolved rocks are also characterized by positive europium anomalies, which suggest plagioclase accumulation caused by such fractionation process. The obtained data also corroborate the lack of significant participation of N-MORB, E-MORB and OIB asthenospheric mantle components in the genesis of basic rocks, which present very close geochemical similarity with Rio Grande Rise (site 516F) and Walvis Ridge (site 525A) basalts, particularly with the last ones, indicating the involvement of EMI mantle component.

Keywords: Paraná Magmatic Province; Sills and flows from Paraná Basin; Continental flood basalts; Basaltic rocks; Rare earth elements; Neutron activation analysis.

# LISTA DE FIGURAS

**Figura 2.1** – Mapa de localização da Bacia do Paraná (Melfi et al., 1988) ..... 22

**Figura 2.2** – Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná (Bellieni et al., 1986; Nardy et al., 2002 e Milani, 2004): (1) Sedimentos pós-vulcânicos; (2) Rochas ácidas da Formação Serra Geral; (3) derrames básicos e intermediários da Formação Serra Geral; (4) Sedimentos pré-vulcânicos; (5) Embasamento cristalino; (6) estrutura anticlinal; (7) estrutura sinclinal; (8) lineamentos oceânicos; (9) lineamento tectônico e/ou magnético ..... 24

**Figura 2.3** – Mapa de localização das amostras..... 35

**Figura 3.1** – Ilustração do processo de formação de radioisótopos na ativação com nêutrons..... 39

**Figura 4.1** – Valores obtidos para o material geológico de referência JB-1 em relação aos valores certificados. Concentrações determinadas utilizando-se os materiais de referência GS-N e BE-N. Os erros referem-se à incerteza de  $1 \sigma$  ..... 58

**Figura 4.2** – Padrão de distribuição dos ETR normalizado em relação aos condritos (Boynton, 1984) do material geológico de referência JB-1 e comparação com valores de Govindaraju (1994) ..... 59

**Figura 4.3** – Nomenclatura das rochas de derrames (símbolos abertos) e soleiras (símbolos cheios) do norte e nordeste da PMP (De La Roche et al., 1980). Legenda: cores = verde (ATi-P;  $\text{TiO}_2 > 3 \%$ ,  $350 < \text{Sr} < 550 \mu\text{g/g}$  e  $\text{Ti/Y} > 350$ ), vermelho (ATi-U;  $\text{TiO}_2 > 3 \%$ ,  $\text{Sr} > 550 \mu\text{g/g}$  e  $\text{Ti/Y} > 500$ ), azul (ITi-P;  $2 < \text{TiO}_2 \leq 3 \%$ ,  $200 < \text{Sr} < 450 \mu\text{g/g}$  e  $\text{Ti/Y} > 350$ ) e preta ( $\text{SiO}_2 > 55 \%$  e/ou  $\text{MgO} < 3 \%$ ); símbolos: círculos = basaltos toleíticos, triângulos = andesi-basaltos toleíticos, quadrados = lati-basaltos, cruzes = lati-andesito, losangos = latitos e triângulo invertido = riódacito ..... 60

**Figura 4.4** – Classificação e nomenclatura das rochas de derrames e soleiras do norte e nordeste da PMP segundo o diagrama TAS (Le Bas et al., 1986 e Zanettin, 1984). A linha pontilhada vermelha separa os campos das rochas alcalinas e toleíticas (Irvine & Baragar, 1971). Cores: verde (ATi-P;  $\text{TiO}_2 > 3 \%$ ,  $350 < \text{Sr} < 550 \mu\text{g/g}$  e  $\text{Ti/Y} > 350$ ); vermelho (ATi-U;  $\text{TiO}_2 > 3 \%$ ,  $\text{Sr} > 550 \mu\text{g/g}$  e  $\text{Ti/Y} > 500$ ); azul (ITi-P;  $2 < \text{TiO}_2 \leq 3 \%$ ,  $200 < \text{Sr} < 450 \mu\text{g/g}$  e  $\text{Ti/Y} > 350$ ) e preta ( $\text{SiO}_2 > 55 \%$  e/ou  $\text{MgO} < 3 \%$ ). Os símbolos são os mesmos da Figura 4.3. Valores em  $\% \text{MgO} < 3 \%$ . Os símbolos são os mesmos da Figura 4.3. Valores em  $\% \dots \dots \dots 61$

**Figura 4.5** – Diagramas discriminatórios dos tipos de magmas dos derrames da PMP. (a) Sr ( $\mu\text{g/g}$ ) vs. Ti/Y e (b)  $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{t}) (\%)$  vs. Sr ( $\mu\text{g/g}$ ). Cores: verde (ATi-P;  $\text{TiO}_2 > 3 \%$ ,  $350 < \text{Sr} < 550 \mu\text{g/g}$  e  $\text{Ti/Y} > 350$ ); vermelho (ATi-U;  $\text{TiO}_2 > 3 \%$ ,  $\text{Sr} > 550 \mu\text{g/g}$  e  $\text{Ti/Y} > 500$ ); azul (ITi-P;  $2 < \text{TiO}_2 \leq 3 \%$ ,  $200 < \text{Sr} < 450 \mu\text{g/g}$  e  $\text{Ti/Y} > 350$ ) e

preta (rochas diferenciadas, com  $\text{SiO}_2 > 55\%$  e  $\text{MgO} < 3\%$ ); campo pontilhado verde = derrames Pitanga; e campo pontilhado vermelho = derrames Urubici. Os símbolos são os mesmos da Figura 4.3 ..... 63

**Figura 4.6** – Diagramas de variação (a)  $\text{SiO}_2$ , (b)  $\text{CaO}$ , (c)  $\text{TiO}_2$ , (d)  $\text{Na}_2\text{O}$ , (e)  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , (f)  $\text{K}_2\text{O}$ , (g)  $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{t})$  e (h)  $\text{P}_2\text{O}_5$ , em função de  $\text{MgO}$  das rochas do norte e nordeste da PMP (concentrações em %). Cores: verde (ATi-P;  $\text{TiO}_2 > 3\%$ ,  $350 < \text{Sr} < 550 \mu\text{g/g}$  e  $\text{Ti/Y} > 350$ ); vermelho (ATi-U;  $\text{TiO}_2 > 3\%$ ,  $\text{Sr} > 550 \mu\text{g/g}$  e  $\text{Ti/Y} > 500$ ); azul (ITi-P;  $2 < \text{TiO}_2 \leq 3\%$ ,  $200 < \text{Sr} < 450 \mu\text{g/g}$  e  $\text{Ti/Y} > 350$ ) e preta ( $\text{SiO}_2 > 55\%$  e/ou  $\text{MgO} < 3\%$ ); campo pontilhado verde = derrames Pitanga; e campo pontilhado vermelho = derrames Urubici. Os símbolos são os mesmos da Figura 4.3..... 66

**Figura 4.7** – Diagramas de variação (a) La, (b) Ta, (c) Ce, (d) Ba, (e) U, (f) Rb, (g) Th e (h) Sc ( $\mu\text{g/g}$ ), em função de  $\text{MgO}$  (%) das rochas do norte e nordeste da PMP. Cores: verde (ATi-P;  $\text{TiO}_2 > 3\%$ ,  $350 < \text{Sr} < 550 \mu\text{g/g}$  e  $\text{Ti/Y} > 350$ ); vermelho (ATi-U;  $\text{TiO}_2 > 3\%$ ,  $\text{Sr} > 550 \mu\text{g/g}$  e  $\text{Ti/Y} > 500$ ); azul (ITi-P;  $2 < \text{TiO}_2 \leq 3\%$ ,  $200 < \text{Sr} < 450 \mu\text{g/g}$  e  $\text{Ti/Y} > 350$ ) e preta ( $\text{SiO}_2 > 55\%$  e/ou  $\text{MgO} < 3\%$ ); campo pontilhado verde = derrames Pitanga; e campo pontilhado vermelho = derrames Urubici. Os símbolos são os mesmos da Figura 4.3 ..... 68

**Figura 4.8** – Diagramas de variação (a) Hf, (b) Sm, (c) Eu, (d) Tb, (e) Yb, (f) Nd, (g) Lu e (h) Cs ( $\mu\text{g/g}$ ), em função de  $\text{MgO}$  (%) das rochas do norte e nordeste da PMP. Cores: verde (ATi-P;  $\text{TiO}_2 > 3\%$ ,  $350 < \text{Sr} < 550 \mu\text{g/g}$  e  $\text{Ti/Y} > 350$ ); vermelho (ATi-U;  $\text{TiO}_2 > 3\%$ ,  $\text{Sr} > 550 \mu\text{g/g}$  e  $\text{Ti/Y} > 500$ ); azul (ITi-P;  $2 < \text{TiO}_2 \leq 3\%$ ,  $200 < \text{Sr} < 450 \mu\text{g/g}$  e  $\text{Ti/Y} > 350$ ) e preta ( $\text{SiO}_2 > 55\%$  e/ou  $\text{MgO} < 3\%$ ); campo pontilhado vermelho = derrames Urubici. Os símbolos são os mesmos da Figura 4.3..... 69

**Figura 4.9** – Padrões de abundância de elementos terras raras, normalizados em relação aos meteoritos condríticos (Boynton, 1984), dos derrames e soleiras ATi-P da parte norte e nordeste da PMP. (a) derrames e soleiras com  $\text{MgO} > 4\%$ ; (b) derrames e soleiras com  $3\% \leq \text{MgO} \leq 4\%$ ; (c) soleiras com  $\text{MgO} < 3\%$  e (d) Comparação entre os derrames ATi-P e magmas-tipo Pitanga com  $\text{MgO} > 4\%$ ..... 71

**Figura 4.10** – Padrões de abundância de elementos terras raras, normalizados em relação aos meteoritos condríticos (Boynton, 1984), das rochas intrusivas e extrusivas do norte e nordeste da PMP. (a) derrames ATi-U; (b) Comparação entre soleiras ITi-P e derrames Paranapanema; (c) Dique ATi-P e campo dos derrames Pitanga e (d) Comparação entre derrames ATi-U e Urubici ..... 74

**Figura 4.11** – Diagramas de elementos incompatíveis normalizados em relação ao manto primordial (Sun & McDonough, 1989) das rochas ITi-P, ATi-P e ATi-U da parte norte e nordeste da PMP. (a) Derrames e soleiras ATi-P; (b) Derrames ATi-U; (c) Soleiras ITi-P e (d) Comparação entre rochas ITi-P, ATi-P e ATi-U..... 75

**Figura 4.12** – Diagramas de elementos-traço ( $\mu\text{g/g}$ ) por elementos-traço ( $\mu\text{g/g}$ ) de rochas intrusivas (símbolos cheios) e extrusivas (símbolos abertos) da PMP. (a) La vs. Sm; (b) Th vs. Yb; (c) La vs. Th; (d) Th vs. Hf; (e) La vs. Ta; (f) Ta vs. Yb; (g) Ta vs. U e (h) U vs. Tb. Cores: verde (ATi-P;  $\text{TiO}_2 > 3\%$ ,  $350 < \text{Sr} < 550 \mu\text{g/g}$  e  $\text{Ti/Y} > 350$ ); vermelho (ATi-U;  $\text{TiO}_2 > 3\%$ ,  $\text{Sr} > 550 \mu\text{g/g}$  e  $\text{Ti/Y} > 500$ ) e azul (ITi-P;  $2 < \text{TiO}_2 \leq 3\%$ ,  $200 < \text{Sr} < 450 \mu\text{g/g}$  e  $\text{Ti/Y} > 350$ ).A linha pontilhada delimita os campos em ATiP e ATi-U..... 76

**Figura 4.13** – Diagramas de variação (a) La/Yb vs. La; (b) Th/Tb vs. Tb; (c) Th/Hf vs. Th; (d) U/Tb vs. U; (e) Th/Ta vs. Th e (f) Th/La vs. Th de rochas intrusivas (símbolos cheios) e extrusivas (símbolos abertos). Cores: verde (ATi-P;  $TiO_2 > 3 \%$ ,  $350 < Sr < 550 \mu g/g$  e  $Ti/Y > 350$ ); vermelho (ATi-U;  $TiO_2 > 3 \%$ ,  $Sr > 550 \mu g/g$  e  $Ti/Y > 500$ ) e azul (ITi-P;  $2 < TiO_2 \leq 3 \%$ ,  $200 < Sr < 450 \mu g/g$  e  $Ti/Y > 350$ )..... 77

**Figura 4.14** – Diagramas de elementos incompatíveis normalizados em relação ao manto primordial (Sun & McDonough, 1989) das rochas ITi-P, ATi-P e ATi-U do norte e nordeste da PMP. (a) Comparação entre rochas ATi-P e Pitanga; (b) Comparação entre derrames ATi-U e Urubici; (c) Comparação entre soleiras ITi-P e derrames Paranapanema e (d) Comparação entre rochas ITi-P, ATi-P e ATi-U..... 80

**Figura 4.15** – Diagramas de elementos incompatíveis normalizados em relação ao manto primordial (Sun & McDonough, 1989) das rochas ITi-P, ATi-P e ATi-U. Comparação destas rochas com: (a) componentes E-MORB e OIB (Sun & McDonough, 1989); (b) componentes N-MORB (Sun & McDonough, 1989) e de Tristão da Cunha (Weaver et al., 1987 e Le Roex et al., 1990)..... 82

**Figura 4.16** – Diagrama das razões Zr/Nb vs. Zr/Y das rochas intrusivas (símbolos cheios) e extrusivas (símbolos abertos) do norte e nordeste da PMP. Cores: verde (ATi-P;  $TiO_2 > 3 \%$ ,  $350 < Sr < 550 \mu g/g$  e  $Ti/Y > 350$ ); vermelho (ATi-U;  $TiO_2 > 3 \%$ ,  $Sr > 550 \mu g/g$  e  $Ti/Y > 500$ ) e azul (ITi-P;  $2 < TiO_2 \leq 3 \%$ ,  $200 < Sr < 450 \mu g/g$  e  $Ti/Y > 350$ ). Comparação com basaltos do tipo N-MORB, E-MORB e OIB (Sun & McDonough, 1989), rochas toleíticas e alcalinas das cadeias Walvis e Rio Grande, e rochas alcalinas de Tristão da Cunha ( $MgO > 5\%$ ; Weaver et al., 1987; Le Roex et al., 1990; Gibson et al., 2005) e HIMU (Woodhead, 1996)..... 83

# LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1</b> – Critérios de classificação dos magmas-tipo da PMP, segundo Peate et al. (1992) .....	27
<b>Tabela 3.1</b> – Elementos determinados nas medidas realizadas 5 dias após a irradiação com nêutrons epitérmicos .....	53
<b>Tabela 3.2</b> – Elementos determinados nas medidas realizadas 18 dias após a irradiação com nêutrons epitérmicos .....	54
<b>Tabela 3.3</b> – Elementos determinados na ativação com nêutrons térmicos .....	54
<b>Tabela 4.1</b> – Concentrações de elementos terras raras e outros elementos-traço no material geológico JB-1 e comparação com as recomendadas na literatura.....	58
<b>Tabela 4.2</b> – Análises químicas de elementos maiores (%), menores (%) e traços ( $\mu\text{g/g}$ ) de amostras representativas do norte e nordeste da Província Magmática do Paraná .....	64

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	16
<b>2 CONTEXTO GEOLÓGICO</b> .....	21
2.1 Características gerais da Bacia do Paraná.....	21
2.2 Província Magmática do Paraná.....	23
2.2.1 Características geoquímicas .....	25
2.2.2 Características isotópicas.....	28
2.2.3 Rochas intrusivas .....	30
2.3 Localização das amostras .....	34
<b>3 METODOLOGIA ANALÍTICA</b> .....	37
3.1 O Método de Análise de Ativação com Nêutrons .....	38
3.1.1 Princípios básicos.....	38
3.1.2 Equação fundamental da análise por ativação com nêutrons .....	43
3.2 Procedimento experimental .....	48
3.2.1 Preparação de amostras .....	49
3.2.2 Materiais de referência utilizados .....	50
3.2.3 Irradiação de amostras e materiais de referência.....	51
3.2.4 Sistemas de detecção e contagem.....	52
3.2.5 Determinação das concentrações de elementos-traço.....	53
3.2.6 Validação do procedimento analítico .....	54
3.2.7 Tratamento estatístico nos dados de AAN .....	55

<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	56
4.1 Análise do material de referência JB-1 .....	57
4.2 Classificação e nomenclatura das amostras .....	59
4.3 Características geoquímicas .....	65
4.3.1 Elementos maiores, menores e traços .....	65
4.3.2 Comparação entre derrames e soleiras.....	72
4.4 Comparação com os derrames básicos da PMP.....	78
4.5 Fontes mantélicas.....	81
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	84
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	87

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.  
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.