



**Caracterização Geoquímica de Rochas Metamáficas e Metaultramáficas da  
Faixa Pajeú-Paraíba, Província Borborema – NE Brasil**  
Geochemical Characterization of Metaultramafic and Metamafic Rocks  
From Pajeú-Paraíba Belt – Northeast Brazil

Cícera Neysi de Almeida<sup>1</sup>; Ignez de Pinho Guimarães<sup>2</sup>; Hartmut Beurlen<sup>2</sup> & Werner Topitsch<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio de Janeiro/Departamento de Geologia  
Avenida Athos da Silveira Ramos, 274 - Cidade Universitária,  
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza Bloco G, 21.941-116; Rio de Janeiro - RJ, Brasil

<sup>2</sup>Universidade Federal de Pernambuco/Departamento de Geologia  
Avenida Acadêmico Hélio Ramos, s/n, Cidade Universitária  
50.740-530, Recife - PE, Brasil

<sup>3</sup>Universidade Federal da Paraíba/Departamento de Geociências  
Cidade Universitária - 58059-900 - João Pessoa - PB, Brasil  
E-mail: neysi@geologia.ufrj.br; ignez@ufpe.br; beurlen@ufpe.br; chefia@geociencias.ufpb.br  
Recebido em: 11/11/2008 Aprovado em: 06/06/2009

## Resumo

Rochas metamáficas e metaultramáficas submetidas a metamorfismo de alta pressão ocorrem como lentes concordantes em uma seqüência de migmatitos – ortognaisses de provável idade Paleoproterozóica, na Faixa de Dobramentos Pajeú-Paraíba, Província Borborema, NE do Brasil. As rochas metamáficas possuem composição basáltica toleítica com assinatura geoquímica de arcos oceânicos, provavelmente geradas a partir de uma mesma fonte, um manto enriquecido subjacente a uma zona de subducção, que sofreu diferenciação in-situ gerando rochas com altos teores em MgO deixando um resíduo piroxenítico e um grupo de alto FeO-TiO<sub>2</sub> que poderia representar os membros mais diferenciados dessa associação, submetidos a um mais elevado grau de contaminação crustal.

A associação dessas rochas com anomalias gravimétricas positivas-negativas sugerem a presença de uma zona de colisão continental com direção geral NE-SW a E-W na Província Borborema.

**Palavras-chaves:** retroeclogite; arcos de ilhas; zona de sutura, Província Borborema

## Abstract

Concordant lenses of high pressure metaultramafic and metamafic rocks are positioned in Paleoproterozoic migmatites and orthogneisses of the Pajeú-Paraíba belt, Borborema Province, northeast Brazil. The geochemical signature of these eclogite facies rocks points to a tholeiitic basaltic composition related to an island arc evolution. They are probably associated with a enriched mantle source underlying a subduction zone. This mantelic source was melted and further underwent in-situ differentiation, producing as high-MgO as high-FeO-TiO<sub>2</sub> rocks. Cumulatic pyroxenites could be residual product of this process. The high-FeO-TiO<sub>2</sub> group seems to represent more differentiated member submits to crustal contamination event.

Reported positive and negative gravimetric anomalies in these metaultramafic and metamafic rocks occurrence area suggest the presence of possible NE-SW to E-W continental collision zone in the Borborema Province.

**Keywords:** retroeclogites; island arc; suture zone, Borborema Province

## 1 Introdução

A Província Borborema (Almeida *et al.*, 1977; Brito Neves, 1983) compreende um grande orógeno na região Nordeste do Brasil, formado durante o Ciclo Brasileiro (Pan-Africano; 0,70-0,57 Ga), cuja estruturação é constituída por quatro unidades maiores: núcleos Arqueanos e blocos Paleoproterozóicos; faixas de dobramentos Neoproterozóicas; granitóides Neoproterozóicos e extensas zonas de cisalhamento (Brito Neves *et al.*, 1995; Van Schmus *et al.*, 1995; Vauchez *et al.*, 1995).

Para alguns autores (Santos, 1995; Santos & Medeiros, 1997, 1999; Brito Neves *et al.*, 1995; 2000), a Província Borborema é o resultado de acreção e colagem de terrenos em diversos eventos tectônicos: no Ciclo Transamazônico (2,35-2,0 Ga) teria ocorrido colagem dos núcleos Arqueanos pré-existentes e extensiva produção crustal; o Ciclo Cariris Velhos (1,1-0,93 Ga), foi marcado pela amalgamação de diversos blocos decorrentes da fragmentação do supercontinente gerado no Transamazônico; no Ciclo Brasileiro/Pan-Africano, convergência e colagem de blocos decorrentes da fragmentação ocorrida no final do Ciclo Cariris Velhos, resultaria na formação de extensos cinturões colisionais na Província Borborema, a porção centro-oeste do Gondwana Ocidental.

Segundo Neves & Mariano (2001), no final do Transamazônico a Província Borborema já consistia em um único bloco, atingindo características cratônicas após o final desse evento (1,7 Ga). Associações supracrustais Neoproterozóicas depositadas em ambientes plataformais e epicontinentais, os levaram a sugerir que a Orogênese Brasileira se processou em um ambiente intracontinental (Neves *et al.*, 2000; Neves, 2003).

Na Faixa de Dobramentos Pajeú-Paraíba (FPP), foi identificado um *trend* de rochas metamáficas com direções gerais NE-SW a E-W associadas a anomalias gravimétricas positivo-negativas (Costa *et al.*, 1978; Beurlen, 1988) contendo relictos de eclogitos, os quais poderiam ser considerados remanescentes de um dos eventos orogenéticos registrados na Província Borborema.

Este artigo tem como proposta a caracterização geoquímica dessas rochas metamáficas, buscando assim contribuir para o entendimento do seu significado petrológico-tectônico.

## 2 Contexto Geológico

A Faixa de Dobramentos Pajeú-Paraíba (Brito Neves, 1983) está localizada no Domínio da Zona Transversal da Província Borborema, delimitado por lineamentos de direção E-W, as zonas de cisalhamento Patos e Pernambuco, ao norte e sul, respectivamente (Figura 1). Dados petrológicos, estruturais e geocronológicos Rb-Sr, U-Pb e Sm-Nd permitem dividir a Faixa Pajeú-Paraíba (FPP) em dois segmentos separados por extensas zonas de cisalhamento: a) uma fatia setentrional estendendo-se de leste a oeste ao longo da FPP, formada pelas sequências supracrustais de idade Meso a Neoproterozóicas, foram consideradas como constituintes de um terreno distinto, o Terreno Alto Pajeú (Santos, 1995; Oliveira & Santos, 1996; Santos & Medeiros, 1997; 1999); b) o segundo segmento, mais a sul, abrange as porções central e leste da FPP, constituído por blocos Paleoproterozóicos com núcleos e evidências de protólitos Arqueanos, (Brito Neves *et al.* 2001a, 2001b), compreendendo o embasamento da FPP, abrangeria o considerado Terreno Alto Moxotó (Santos, 1995; Oliveira & Santos, 1996; Santos & Medeiros, 1997; 1999).

Rochas metamáficas distribuem-se ao longo de aproximadamente 180 km de extensão na FPP, desde o seu extremo oeste no município de Floresta (PE), estendendo-se pelos municípios de Custódia (PE), Camalaú (PB), Queimadas (PB), Itatuba (PB), Salgado de São Félix (PB) e Itabaiana (PB)-Figura 1. As quatro últimas ocorrências, aflorantes na porção leste da FPP serão aqui abordadas.

As unidades litológicas aflorantes nessa região incluem rochas metamorfizadas a alto grau, cujos contatos são delimitados por zonas de cisalhamento: ortognaisses granodioríticos porfíricos, ortognaisses bandados laminados e ortognaisses peraluminosos, todos migmatizados durante o evento Brasileiro (Brito Neves *et al.*, 2001) – Figura 1. Rochas metamáficas abrangendo epidoto-anfibolitos, anfibolitos e retroeclogitos, ocorrem como lentes de extensão centimétrica a métrica, intercaladas nos ortognaisses bandados laminados. Nessa associação também se observam rochas metaultramáficas, metacalcários, calciossilicáticas e minério de Fe-Ti.

As rochas metamáficas relacionadas às ocorrências de Salgado de São Félix, Itatuba e

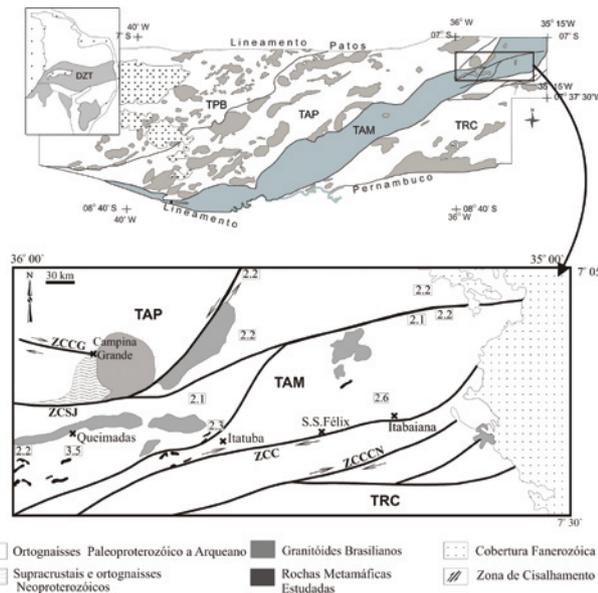


Figura 1 Esquema geológico da Zona Transversal (Província Borborema), mostrando o trend de rochas metamáficas. DZT (Domínio da Zona Transversal); TPB (Terreno Piau-Brígida); TAP (Terreno Alto Pajeú); TAM (Terreno Alto Moxotó); TRC (Terreno Rio Capibaribe); ZCCG (Zona de Cisalhamento Campina Grande); ZCCCN (Zona de Cisalhamento Congo-Cruzeiro do Nordeste). Fonte: modificado de Santos & Medeiros, 1997. No detalhe, esboço geológico da porção extremo leste da Faixa de Dobramentos Pajeú-Paraíba, mostrando a localização das rochas metamáficas estudadas.

Queimadas apresentam quatro fácies petrográficas-texturais: granada-piroxenitos, anfíbolitos bandados, anfíbolitos maciços e metapiroxenitos, que passam gradativamente uma para outra. As rochas da região de Itabaiana são essencialmente granada-piroxenitos e anfíbolitos. Para maiores detalhes sobre a petrografia dessas rochas reportar-se à Almeida *et al.* (2008, submetido RBG).

As análises petrográficas/texturais e de campo apontam que as rochas metamáficas associadas às ocorrências de Queimadas, Itatuba e Salgado de São Félix foram submetidas a metamorfismo de alto grau, podendo-se distinguir quatro fácies metamórficas indicando processos retrometamórficos a partir da fácies eclogito, passando para granulito, anfíbolito e, por último, a fácies xisto verde, com estimativas P-T máximas de 1170°C/7,2 kb e mínimas de 657,9°C/5,6 kb (Almeida *et al.*, submetido). Nas rochas metamáficas de Itabaiana foram reconhecidas duas fácies metamórficas, granulito e anfíbolito, não se observando indícios de metamorfismo no fácies eclogito. As estimativas P-T variaram de 859,2°C/

6.4kb nas associações granulíticas a 659,7°C /2,9 kb nas anfíbolíticas (Almeida *et al.*, submetido).

### 3 Geoquímica

As amostras analisadas no presente trabalho foram selecionadas com base em critérios petrográficos, evitando-se, o máximo, processos de alteração, e objetivando a maior representatividade das rochas metamáficas ocorrentes nas regiões estudadas. Os elementos maiores ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) e alguns elementos traços (Cr, Ni, Ba, Sr, U, Zr e Y) foram analisadas por ICP (Inductively Coupled Plasma) no Acme Analytical Laboratories LTD (Vancouver, Canadá); os elementos traços (Rb, Nb, Hf, Ta, Th) e os ETR foram analisados pelo método de ativação neutrônica (INAA) no Activation Laboratories (Ontário, Canadá). Os resultados obtidos encontram-se listados na Tabela 1.

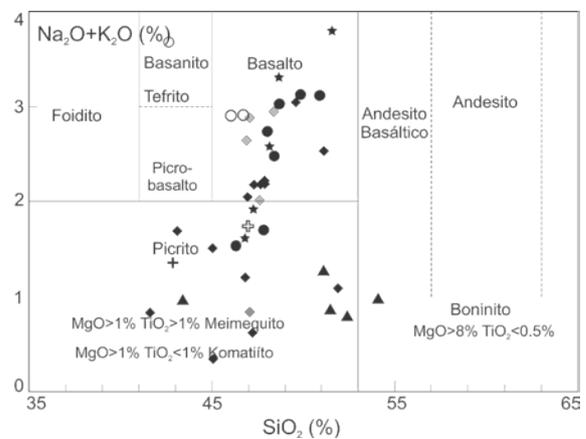


Figura 2 Diagrama TAS para classificação de rochas ultramáficas (Le Bas, 2000) onde se observa que as rochas metaultramáficas apresentam composições komatiíticas, picricíticas e meimechíticas. Símbolos: Itatuba: ● (anfíbolito bandado); ★ (anfíbolito maciço); ◆ (retroeclogito); ▲ (piroxenito); Salgado S. Félix : ● (anfíbolito bandado); Queimadas: ◆

A química de rocha total indicou que os retroeclogitos, anfíbolitos maciços e anfíbolitos bandados possuem, em sua maioria, composição basáltica, ainda que algumas amostras sejam classificadas como andesitos basálticos (Figuras 2, e 3). As rochas ultramáficas que incluem piroxenitos e olivina-anfíbolito apresentam grande variação composicional, sendo classificados como picritos, meimequitos e komatiitos (Figura 2).

O caráter toleítico para a maioria dessas rochas é indicado no diagrama  $\text{SiO}_2\text{xK}_2\text{O}$  (Figura

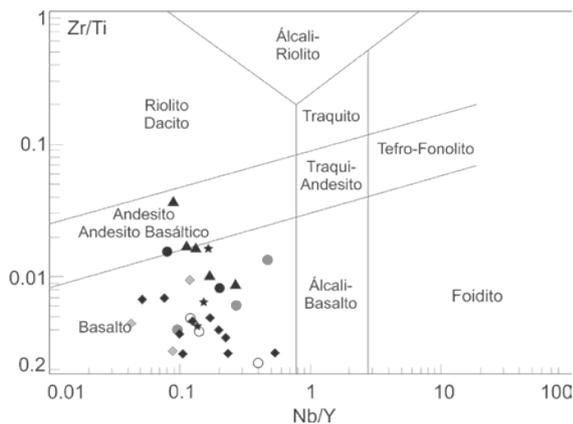


Figura 3 Diagrama Nb/Y x Zr/Ti (Pearce, 1996) mostrando a composição das rochas metamáficas estudadas. Símbolos: Itatuba: ● (anfibolito bandado); ★ (anfibolito maciço); ◆ (retroeclogito); ▲ (piroxenito); Salgado S. Félix : ● (anfibolito bandado); Queimadas: ◆

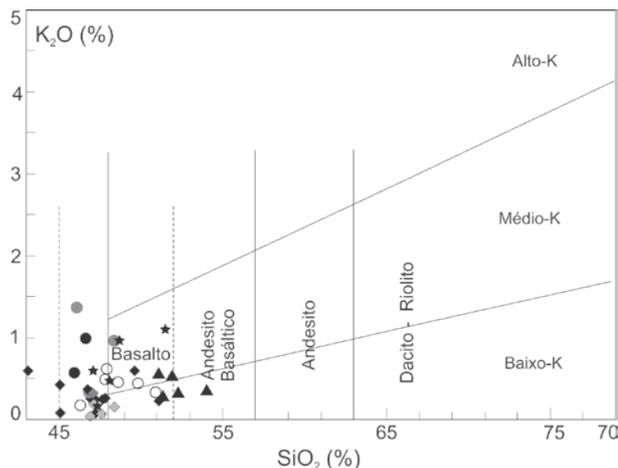


Figura 4 Diagrama K<sub>2</sub>O x SiO<sub>2</sub> (Le Maitre, 1989) mostrando a classificação das rochas metaltramáficas e metamáficas. Símbolos: Itatuba: ● (anfibolito bandado); ★ (anfibolito maciço); ◆ (retroeclogito); ▲ (piroxenito); Salgado S. Félix : ● (anfibolito bandado); Queimadas: ◆

4), entretanto, os anfibolitos mostram uma maior variação no teor de álcalis, projetando-se no campo de médio-K, sugerindo um caráter mais calcioalcalino para esse grupo. Contudo, a tendência toleítica é confirmada quando os resultados analíticos são projetados nos diagramas AFM (Figura 5) e MgO x CaO x Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Figura 6). Os piroxenitos e olivina-anfibolito mostram maior afinidade com a série komatiítica (Figura 6).

Os diagramas de variação (elementos maiores, Cr, Ni x MgO) sugerem a existência de dois grupos distintos de retroeclogitos (Figuras 7, 8 e 9): um grupo enriquecido em FeO<sub>t</sub>, TiO<sub>2</sub> e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

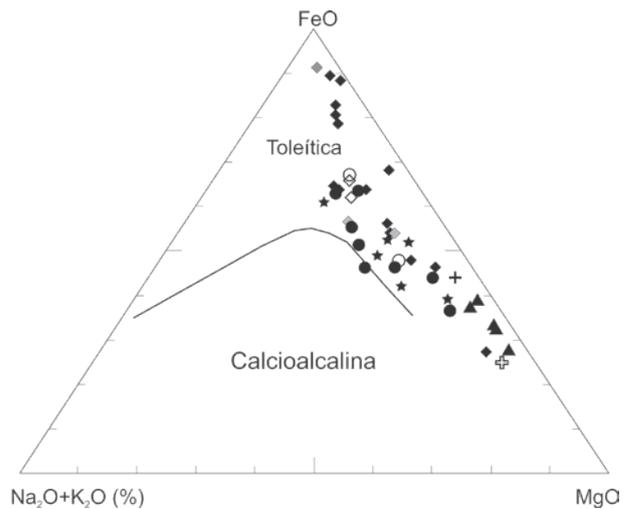


Figura 5 Diagrama AFM (curva de Irvine & Baragar, 1971) mostrando que as rochas estudadas descrevem um trend toleítico. Símbolos: Itatuba: ● (anfibolito bandado); ★ (anfibolito maciço); ◆ (retroeclogito); ▲ (piroxenito); Salgado S. Félix : ● (anfibolito bandado); Queimadas: ◆

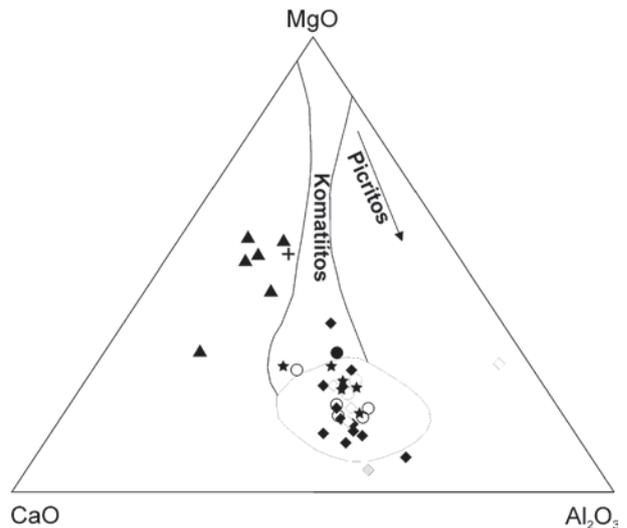


Figura 6 Diagrama CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Arndt et al. 1977) mostrando que as rochas metamáficas estudadas projetam-se predominantemente no campo das rochas toleíticas. Símbolos: Itatuba: ● (anfibolito bandado); ★ (anfibolito maciço); ◆ (retroeclogito); ▲ (piroxenito); Salgado S. Félix : ● (anfibolito bandado); Queimadas: ◆

e um grupo enriquecido em MgO, CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr e Ni. Os anfibolitos ocorrem sempre associados aos retroeclogitos ricos em MgO. Um terceiro grupo, distinto quimicamente, compreende os metapiroxenitoseolivina-anfibolito, que apresentam os teores mais elevados de MgO dessa associação. Essas variações composicionais são características de rochas eclogíticas e foram interpretadas como reflexo da composição químico/mineralógica e ambiência

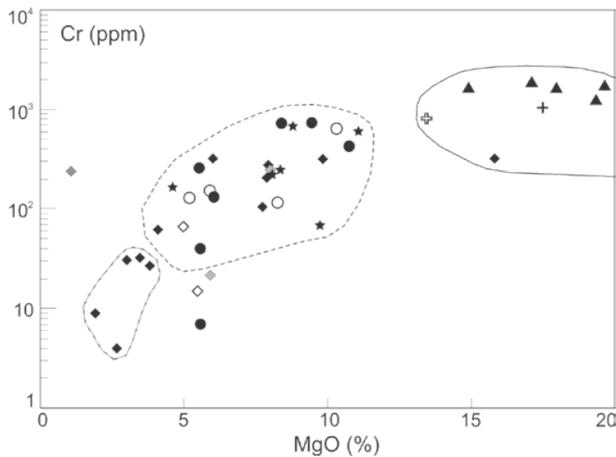


Figura 7 Diagramas de variação (Cr x MgO) para as rochas metamáficas estudadas. Distinguem-se dois grupos de retroeclogitos: rico em Cr (—); pobre em Cr (—□□—). Símbolos: Itatuba: ● (anfíbrolito bandado); ★ (anfíbrolito maciço); ◆ (retroeclogito); ▲ (piroxenito); Salgado S. Félix : ● (anfíbrolito bandado); Queimadas: ◆

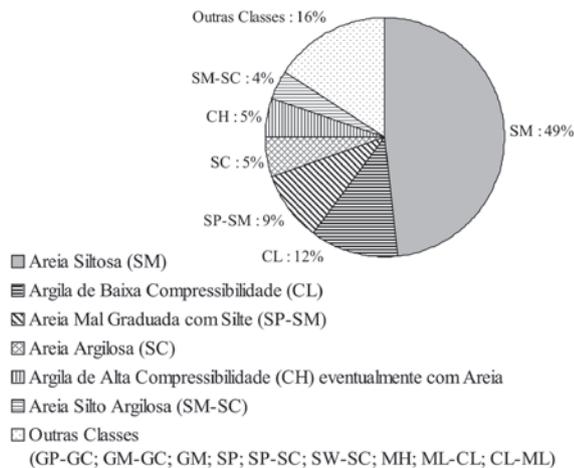


Figura 8 Diagramas de variação (Ni x MgO) para as rochas metamáficas estudadas. Distinguem-se dois grupos de retroeclogitos: rico em Ni (—); pobre em Ni (—□□—). Símbolos: Itatuba: ● (anfíbrolito bandado); ★ (anfíbrolito maciço); ◆ (retroeclogito); ▲ (piroxenito); Salgado S. Félix : ● (anfíbrolito bandado); Queimadas: ◆

tectônica dos seus protólitos. Eclogitos ricos em Fe e Ti são interpretados como magmas basálticos toleíticos intrudidos em uma crosta oceânica em expansão (Mottana & Bochio, 1975; Mottana *et al.* 1990; Cortesogno *et al.*, 1977; Droop *et al.*, 1990); enquanto que os eclogitos ricos em Mg, Ca, Al, Cr e Ni teriam sido originados de cumulados formados por cristalização fracionada de um magma básico envolvendo fracionamento de plagioclásio (Messiga *et al.*, 1983; Ernst, 1973; Droop *et al.*, 1990).

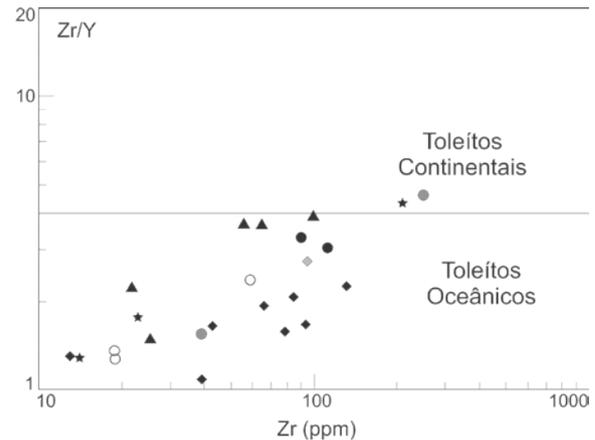


Figura 10 Diagramas  $Zr \times Zr/Y$  (Pearce & Norry 1979) mostrando uma ambiência oceânica para as rochas metamáficas estudadas. Figura 7 Diagramas de variação (Cr x MgO) para as rochas metamáficas estudadas. Distinguem-se dois grupos de retroeclogitos: rico em Cr (—); pobre em Cr (—□□—). Símbolos: Itatuba: ● (anfíbrolito bandado); ★ (anfíbrolito maciço); ◆ (retroeclogito); ▲ (piroxenito); Salgado S. Félix : ● (anfíbrolito bandado); Queimadas: ◆

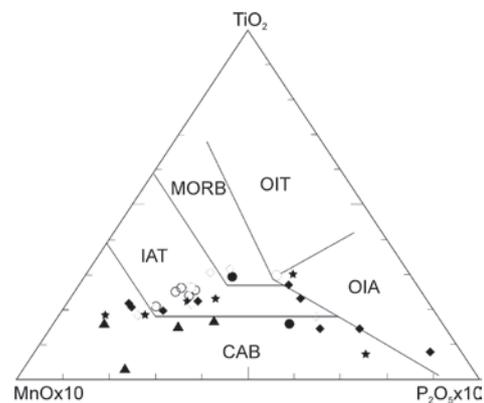


Figura 11 Diagrama  $MnO \times 10 \times TiO_2 \times P_2O_5 \times 10$  (Mullen, 1983) mostrando que a maior parte das rochas metamáficas estudadas projeta-se no campo dos basaltos de margens convergentes. CAB (basalto calcioalcalino); IAT (toleítos de arco de ilhas); MORB (basaltos de dorsais mesoocênicas); OIA (basaltos alcalinos de ilhas oceânicas); OIT (toleítos de ilhas oceânicas). Símbolos: Itatuba: ● (anfíbrolito bandado); ★ (anfíbrolito maciço); ◆ (retroeclogito); ▲ (piroxenito); Salgado S. Félix : ● (anfíbrolito bandado); Queimadas: ◆

No diagrama  $Zr \times Zr/Y$  (Pearce & Norry, 1979) que distingue toleítos oceânicos de toleítos continentais, observa-se que a maioria das rochas metamáficas projeta-se no campo dos toleítos oceânicos (Figura 10). Nos diagramas  $MnO \times 10 \times TiO_2 \times P_2O_5 \times 10$  (Mullen, 1983; Figura 11;  $Zr \times Ti/100 \times Y^*3$  (Pearce & Cann, 1973; Figura 12) e  $Ti/Y \times Zr/Y$  (Pearce & Gale, 1977; Figura 13) que distinguem basaltos oceânicos intraplacas

**Caracterização Geoquímica de Rochas Metamáficas e Metaltramáficas da Faixa Pajeú-Paraíba, Província Borborema – NE Brasil**  
 Cícera Neysi de Almeida; Ignez de Pinho Guimarães; Hartmut Beurlen & Werner Topitsch

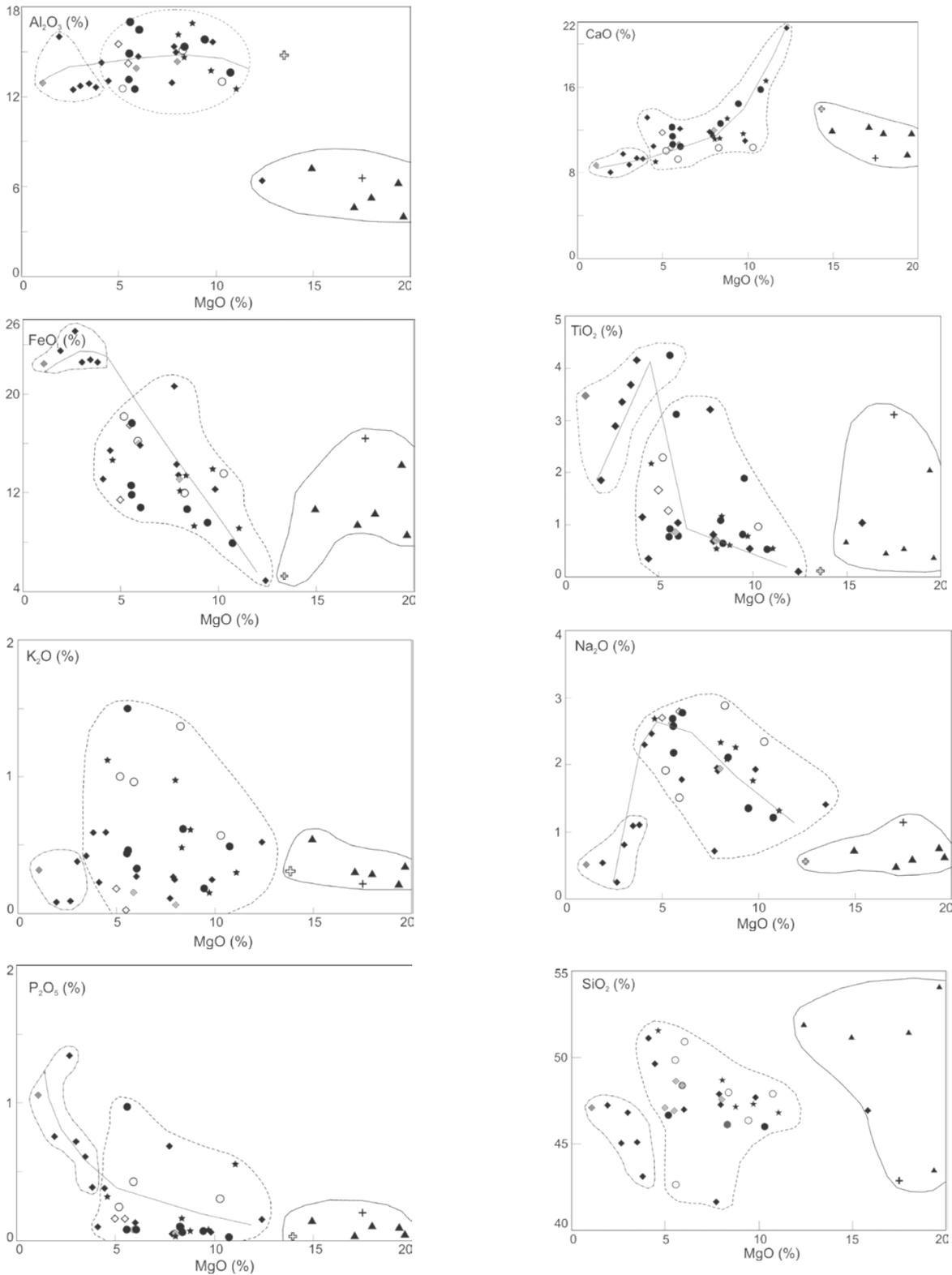


Figura 9 Diagramas de variação (elementos maiores x MgO) para as rochas estudadas. Nestes diagramas distinguem-se dois tipos de retroeclogitos: grupo rico em Fe-Ti (—□□—); grupo rico em Mg-Ca-Al (—). O grupo envolto por linha contínua compreende as metaltramáficas. Símbolos: Itatuba: ● (anfibolito bandado); ★ (anfibolito maciço); ◆ (retroeclogito); ▲ (piroxenito); Salgado S. Félix : ● (anfibolito bandado); Queimadas: ◆

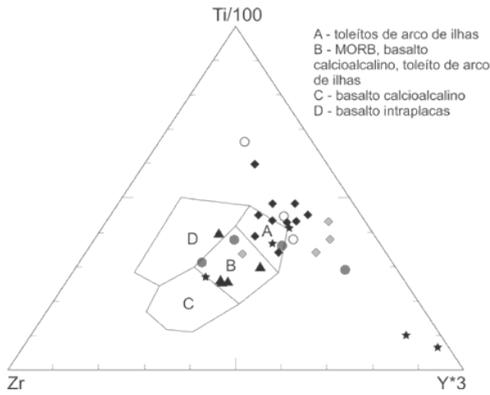


Figura 12 Diagrama  $Zr/Ti/100xY^3$  (Pearce & Cann, 1973) mostrando que a maioria das rochas estudadas mostram afinidades com arcos toleíticos. Símbolos: Itatuba: ● (anfíbrolito bandado); ★ (anfíbrolito maciço); ◆ (retroeclogito); ▲ (piroxenito); Salgado S. Félix : ● (anfíbrolito bandado); Queimadas: ◆

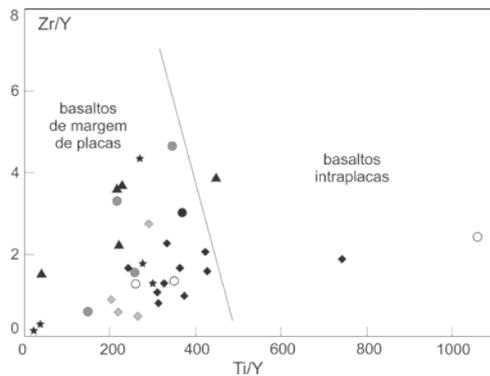


Figura 13 Diagrama  $Ti/YxZr/Y$  (Pearce & Gale, 1977) sugerindo que as rochas metamáficas estudadas estão relacionadas a ambiência de limites de placas. Símbolos: Itatuba: ● (anfíbrolito bandado); ★ (anfíbrolito maciço); ◆ (retroeclogito); ▲ (piroxenito); Salgado S. Félix : ● (anfíbrolito bandado); Queimadas: ◆

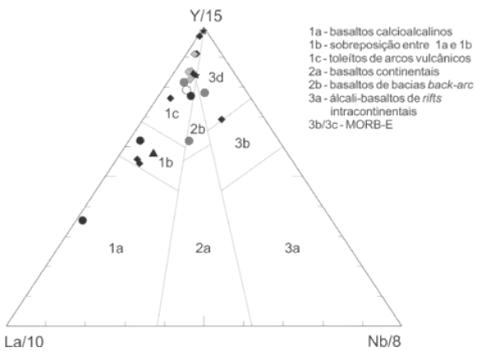


Figura 14 Diagrama  $La/10xY/15xNb/8$  (Cabani & Lecolle, 1989) mostrando que as rochas metamáficas estudadas mostram afinidades com ambientes convergentes. Símbolos: Itatuba: ● (anfíbrolito bandado); ★ (anfíbrolito maciço); ◆ (retroeclogito); ▲ (piroxenito); Salgado S. Félix : ● (anfíbrolito bandado); Queimadas: ◆

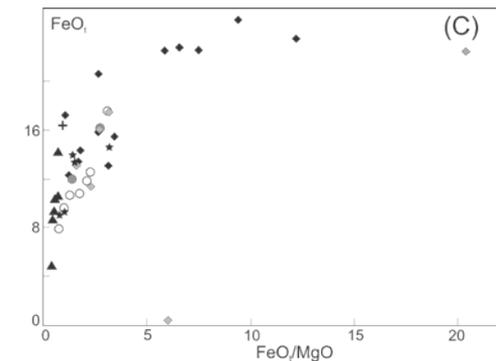
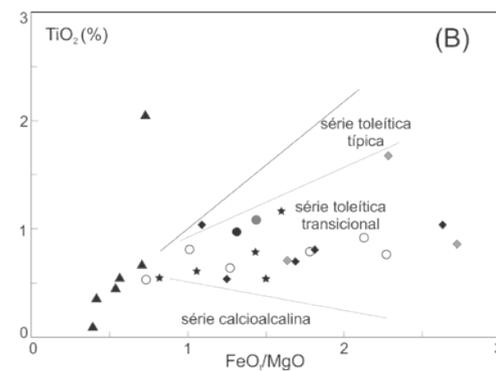
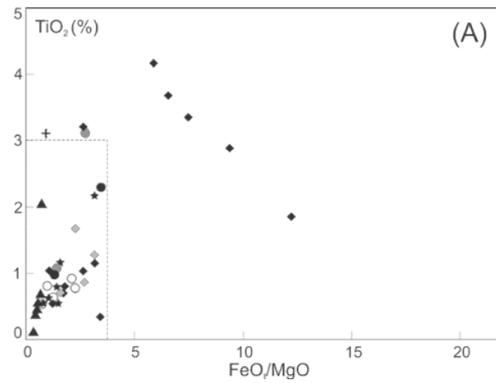


Figura 15 (A) Diagrama  $FeO/MgOxTiO_2$  sugerindo que as rochas estudadas desenvolvem um trend semelhante ao da série toleítica com ponto de inflexão marcando fracionamento de fases ricas em  $TiO_2$  nos estágios mais avançados da evolução magmática. As amostras inseridas no retângulo pontilhado são mostradas em detalhe na Figura 15B. (B) Diagrama  $FeO/MgOxTiO_2$  onde estão projetadas as amostras dos grupos ricos em  $MgO$ ,  $CaO$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Cr$ ,  $Ni$ , mostrando que as mesmas mostram características semelhantes à série toleítica de Miyashiro & Shido (1975). (C) Diagrama  $FeO/MgOxFeO$  sugerindo que as rochas estudadas desenvolvem um trend semelhante ao da série toleítica com ponto de inflexão marcando fracionamento de fases ricas em  $FeO$  nos estágios mais avançados da evolução magmática. As amostras inseridas no retângulo pontilhado são mostradas em detalhe na figura 15A. Símbolos: Itatuba: ● (anfíbrolito bandado); ★ (anfíbrolito maciço); ◆ (retroeclogito); ▲ (piroxenito); Salgado S. Félix : ● (anfíbrolito bandado); Queimadas: ◆

de basaltos gerados em margens convergentes, as rochas estudadas projetam-se principalmente no campo dos basaltos toleíticos de arco de ilhas. Uma certa dispersão pode ser verificada nesses diagramas, indicando um enriquecimento de Y em relação ao Zr, feição comum em rochas geradas em ambientes de subducção, como demonstrado no diagrama La/10 x Y/15 x Nb/8 (Cabanis & Lecolle, 1989; Figura 14). Esse leve enriquecimento em Y poderia refletir o fracionamento de anfíbólio e granada. As amostras dos retroeclogitos ricos em Fe-Ti e uma amostra de piroxenito (O19) apresentam ambigüidades, projetando-se em alguns diagramas no campo dos álcali-basaltos intraplacas ou no campo dos basaltos calcioalcalino.

Os diagramas de variação ainda mostram que os três grupos quimicamente distintos, levando em consideração a dispersão por remobilização metamórfica, desenvolvem *trends* com pontos de inflexão, compatíveis com um modelo de evolução magmática via fracionamento-resíduo (Wilcox *et al.*, 1979). Fusão parcial de uma fonte mantélica poderia ter gerado os protólitos dos retroeclogitos alto-MgO e anfibolitos, onde correlações negativas de CaO, Cr e Ni e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> podem sugerir uma evolução controlada por fracionamento de plagioclásio e olivina ( $\pm$ clinopiroxênio) deixando clinopiroxênio como resíduo.

A dispersão observada nos diagramas MgOxK<sub>2</sub>O e MgOxSiO<sub>2</sub> poderiam indicar uma maior remobilização desses elementos durante o metamorfismo ou contaminação crustal. Entretanto, os teores mais baixos de K<sub>2</sub>O e SiO<sub>2</sub> nessas amostras apontam que remobilização por metamorfismo é a hipótese mais provável.

Nos diagramas FeO<sub>t</sub>/MgOxFeO<sub>t</sub> e FeO/MgOxTiO<sub>2</sub> (Figura15), esse conjunto de amostras delinea *trends* semelhantes à da série toleítica transicional de Miyashiro & Shido (1975), enquanto que os retroeclogitos ricos em Fe-Ti desenvolvem correlações negativas com TiO<sub>2</sub> e levemente positivas com FeO<sub>t</sub>. Nas séries toleíticas típicas verifica-se que durante cristalização fracionada o conteúdo de FeO<sub>t</sub> e TiO<sub>2</sub> aumenta no magma residual, devido às baixas condições de fO<sub>2</sub>, podendo com o prosseguimento da evolução sofrer um empobrecimento nesses elementos, devido ao início da cristalização das fases ricas em Fe-Ti.

Esses três grupos de rochas podem ser ainda subdivididos segundo os *spiderdiagrams* e padrões normalizados de ETR. Para as rochas altas em MgO-CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> são distintos quatro padrões normalizados de ETR:

i) O primeiro tipo, que inclui amostras de retroeclogitos e de anfibolitos maciços e bandados, consiste num padrão horizontalizado a levemente enriquecido nos ETRL (5 a 20x condrito) e razões (Ce/Yb)<sub>N</sub>=0,58-1,30) com ausência ou presença muito moderada de anomalia positiva de Eu, típico de toleítos de arco de ilhas (Figura 16). Os *spiderdiagrams* para esse grupo de amostras são semelhantes (Figura 17), apresentando um padrão em

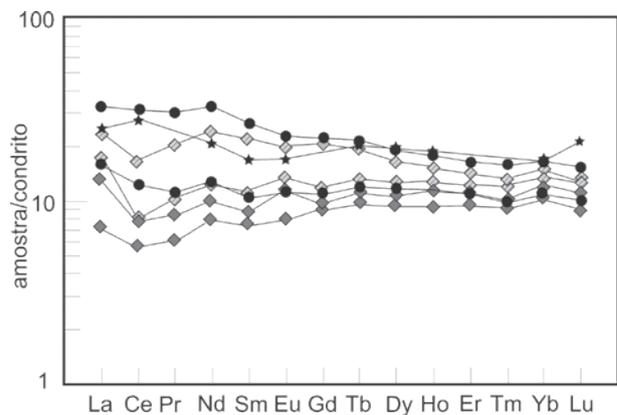


Figura 16 Padrão normalizado de ETR (tipo 1) para anfibolitos e retroeclogitos altos MgO-CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Símbolos: Itatuba: ● (anfíbólio bandado); ★ (anfíbólio maciço); ◆ (retroeclogito); ▲ (piroxenito); Salgado S. Félix : ● (anfíbólio bandado); Queimadas: ◆ Fatores de normalização de Sun (1982).

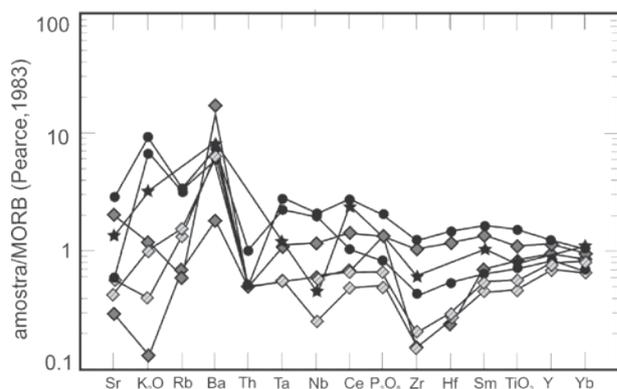


Figura 17 Spiderdiagram (tipo1) para retroeclogitos e anfibolitos maciços altos MgO-CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Símbolos: Itatuba: ● (anfíbólio bandado); ★ (anfíbólio maciço); ◆ (retroeclogito); ▲ (piroxenito); Salgado S. Félix : ● (anfíbólio bandado); Queimadas: ◆

zig-zag com enriquecimento em LILE, depressões de Ta-Nb e Zr, picos ou moderadas depressões em Sr compatíveis também com basaltos toléiticos gerados em arco de ilhas.

ii) O segundo tipo inclui amostras de retroeclogitos e de anfibolitos maciços e mostra um padrão horizontalizado ( $Ce_N/Yb_N = 0,87 - 1,13$ ) com leve enriquecimento nos ETRL (10 x condrito) e anomalia positiva de Eu (1,48 – 2,0), semelhante a de basaltos toléiticos de arco de ilhas ou intraplacas continentais (Figura 18). Contudo, os *spiderdiagrams* para esse grupo de amostras (Figura 19) mostram padrão pontiagudo e fracionado com enriquecimento em LILE e depressão em Nb e Zr, feições estas características de basaltos toléiticos de

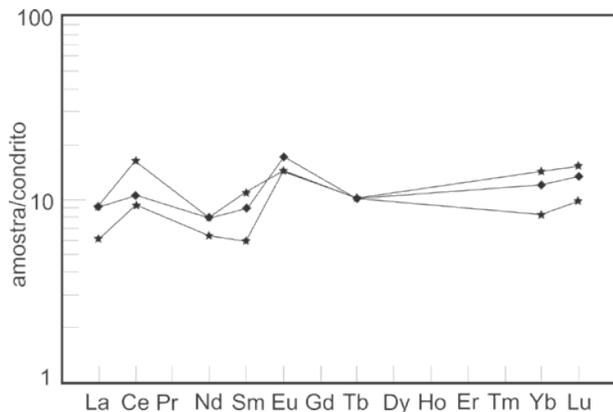


Figura 18 Padrão normalizado de ETR (tipo 2) para anfibolitos e retroeclogitos altos MgO-CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Símbolos: Itatuba: ● (anfibolito bandado); ★ (anfibolito maciço); ◆ (retroeclogito); ▲ (piroxenito); Salgado S. Félix : ● (anfibolito bandado); Queimadas: ◆ Fatores de normalização de Sun (1982).

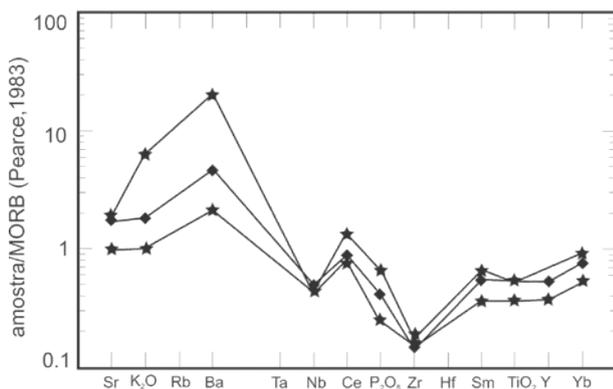


Figura 19 Spiderdiagram (tipo 2) para retroeclogitos e anfibolitos maciços altos MgO-CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Símbolos: Itatuba: ● (anfibolito bandado); ★ (anfibolito maciço); ◆ (retroeclogito); ▲ (piroxenito); Salgado S. Félix : ● (anfibolito bandado); Queimadas: ◆

arco. A atípica anomalia positiva de Ce observada na Figura 18 sugere contaminação por rochas crustais durante a ascensão do magma ou elevado grau de fusão parcial de uma fonte enriquecida em plagioclásio e hornblenda.

iii) O terceiro tipo inclui amostras de retroeclogito e de anfibolito maciço, dispõe de um padrão horizontalizado, enriquecido no amplo espectro de ETR em relação, ainda que possa apresentar um leve enriquecimento nos ETRL ( $Ce_N/Yb_N = 1,0 - 2,0$ ), sem anomalia de Eu, sendo um padrão típico de toléiticos de arco de ilhas, com exceção da forte depressão em Nd (Figura 20). Sabe-se que somente os ETR muito leves são verdadeiramente incompatíveis, dessa forma, o empobrecimento em Nd poderia estar relacionado aos primeiros estágios de desenvolvimento do arco, onde o aporte de elementos incompatíveis via subducção ainda não foi o suficiente para elevar os teores de Nd no manto. Os *spiderdiagrams* dessas duas amostras são semelhantes (Figura 21), apresentando-se sob a forma pontiaguda

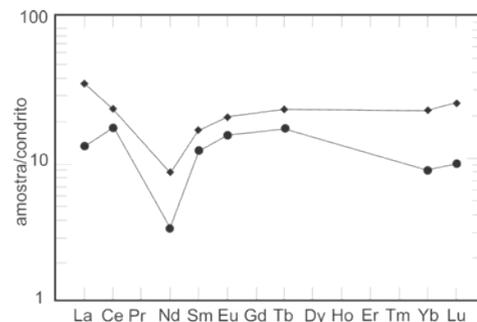


Figura 20 Padrão normalizado de ETR (tipo 3) para anfibolitos e retroeclogitos altos MgO-CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Símbolos: Itatuba: ● (anfibolito bandado); ★ (anfibolito maciço); ◆ (retroeclogito); ▲ (piroxenito); Salgado S. Félix : ● (anfibolito bandado); Queimadas: ◆ Fatores de normalização de Sun (1982).

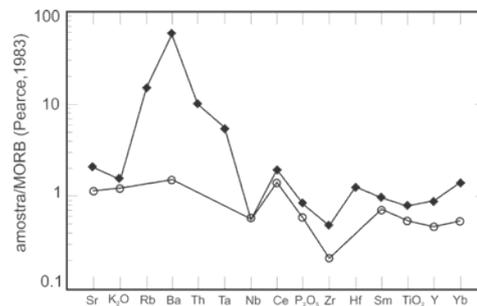


Figura 21 Spiderdiagram (tipo 3) para retroeclogitos e anfibolitos maciços altos MgO-CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Símbolos: Itatuba: ● (anfibolito bandado); ★ (anfibolito maciço); ◆ (retroeclogito); ▲ (piroxenito); Salgado S. Félix : ● (anfibolito bandado); Queimadas: ◆

com enriquecimento nos elementos incompatíveis (em média 10x MORB), leve depressão em Nb e picos no Sr, embora o anfibolito maciço mostre um maior grau de enriquecimento nos elementos

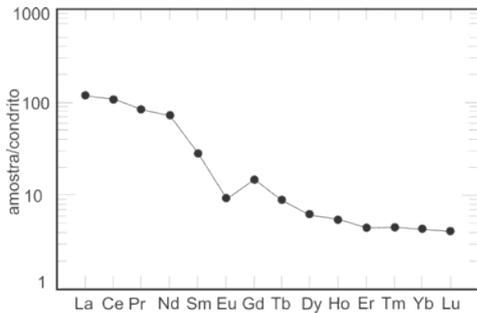


Figura 22 Padrão normalizado de ETR (tipo 4) para anfibolitos e retroeclogitos altos MgO-CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Símbolos: Itatuba: ● (anfibolito bandado); ★ (anfibolito maciço); ◆ (retroeclogito); ▲ (piroxenito); Salgado S. Félix : ● (anfibolito bandado); Queimadas: ◆ Fatores de normalização de Sun (1982).

incompatíveis, e particularmente nos LILE (até 100x condrito), podendo refletir a participação de um fator contaminante ou um maior grau de fusão de um manto enriquecido.

iv) o quarto padrão foi verificado na amostra ita-06 (Figura 22), sendo caracterizado pelo enriquecimento nos ETR com forte fracionamento ETRL/ETRP ( $Ce_N/Yb_N = 33$ ) e proeminente anomalia negativa de Eu (0,44). O *spiderdiagram* para essa amostra exibe também um amplo enriquecimento nos elementos incompatíveis, leve fracionamento com depressões em K, Sr e Nb e picos em Ce (Figura 23). As feições acima descritas poderiam refletir à participação de um componente crustal durante a evolução do arco na gênese desses magmas. Contudo,

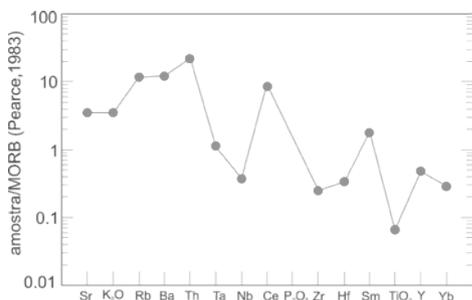


Figura 23 *Spiderdiagram* (tipo 4) para retroeclogitos e anfibolitos maciços altos MgO-CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Símbolos: Itatuba: ● (anfibolito bandado); ★ (anfibolito maciço); ◆ (retroeclogito); ▲ (piroxenito); Salgado S. Félix : ● (anfibolito bandado); Queimadas: ◆

convém salientar que a assinatura de margem de placas vista nos diagramas anteriores e a composição basáltico-andesítica para essa rocha, indicam que a possibilidade desse magma estar associado a *rifits* intracontinentais é remota.

Para os retroeclogitos com elevados teores em FeO-TiO<sub>2</sub> são distintos dois padrões normalizados de ETR:

i) O primeiro tipo (Figura 24) mostra enriquecimento no amplo espectro dos ETR (30 a 100 x condrito), dispendo de um padrão de levemente fracionado com enriquecimento dos ETRL/ETRP ( $Ce_N/Yb_N = 3,67 - 4,55$ ) e moderada anomalia negativa de Eu (0,68 – 0,80) semelhantes aos de basaltos toleíticos de derrames continentais ou podendo representar uma assinatura de magmatismo pós-colisional associado à transtensão (*back-arc?*). Os *spiderdiagrams* mostram que essas rochas também são enriquecidas no amplo espectro de elementos traços (Figura 25), ainda que os LILE apresentem maior grau de enriquecimento em relação ao HFSE

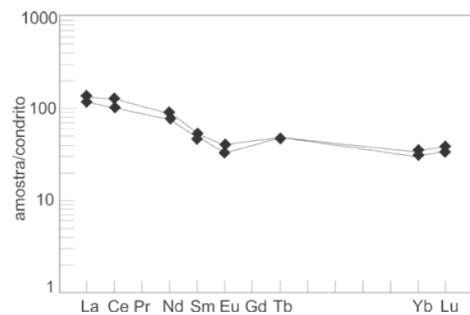


Figura 24 Padrão normalizado de ETR (tipo 1) para retroeclogitos com altos teores de FeO-TiO<sub>2</sub>. Símbolos: Itatuba: ● (anfibolito bandado); ★ (anfibolito maciço); ◆ (retroeclogito); ▲ (piroxenito); Salgado S. Félix : ● (anfibolito bandado); Queimadas: ◆ Fatores de normalização de Sun (1982)

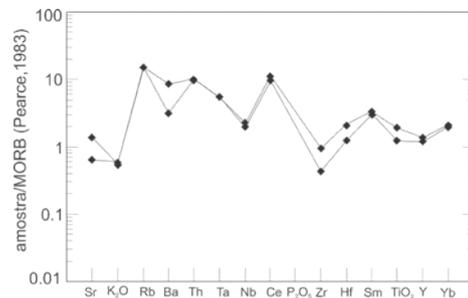


Figura 25 *Spiderdiagram* (tipo 1) para retroeclogitos com altos teores de FeO-TiO<sub>2</sub>. Símbolos: Itatuba: ● (anfibolito bandado); ★ (anfibolito maciço); ◆ (retroeclogito); ▲ (piroxenito); Salgado S. Félix : ● (anfibolito bandado); Queimadas: ◆

(0,7 – 20 x MORB), podendo-se verificar quedas nos valores de Ta e Nb e depressões em Sr, Ba e K, e picos em Ce, configuração associada a magmas que sofreram diferenciados graus de contaminação crustal (Wilson, 1989).

Entretanto, à semelhança da amostra ita-06 que apresenta padrões similares, esses retroeclogitos com altos teores de FeO-TiO<sub>2</sub> também possuem assinatura de basaltos de margem de placas, projetando-se em alguns diagramas acima mostrados, no campo de basaltos de margem continental, o que indica mais uma vez que a assinatura química indicando a participação de um componente crustal não está relacionada à ambiência intrapalcos continental, demonstrando que a análise isolada dos dados analíticos fornecem interpretações ambíguas.

ii) o segundo tipo de padrão ETR relacionado aos retroeclogitos com altos teores em alto FeO-TiO<sub>2</sub> é semelhante ao segundo tipo das rochas altas MgO-CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Figura 26), entretanto, os *spiderdiagrams* são simetricamente opostos, mostrando depressões em K e Sr, picos em Zr, TiO<sub>2</sub>, Y e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, suave depressão em Nb (Figura 27), sugerindo a presença de um membro contaminante ou elevado grau de fusão parcial de um manto profundo. A anomalia positiva de Ce no padrão de ETR mais uma vez sugere a presença de uma fonte enriquecida nos elementos mais incompatíveis.

As rochas metaultramáficas mostram padrões de ETR distintos; o padrão para uma amostra de piroxenito dispõe-se bastante fracionado (Ce<sub>N</sub>/Yb<sub>N</sub> = 5,0) e com ausência de anomalia de Eu (Figura 28). O *spiderdiagram* representativo dessas rochas

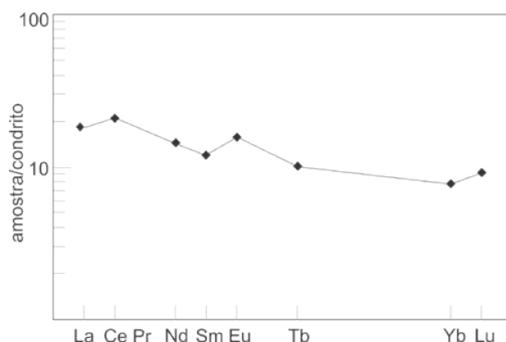


Figura 26 Padrão normalizado de ETR (tipo 2) para retroeclogitos com altos teores de FeO-TiO<sub>2</sub> Símbolos: Itatuba: ● (anfíbólito bandado); ★ (anfíbólito maciço); ◆ (retroeclogito); ▲ (piroxenito); Salgado S. Félix : ● (anfíbólito bandado); Queimadas: ◆. Fatores de normalização de Sun (1982).

também apresenta-se fracionados com razões LILE/HFSE = 2,5 (Figura 29). Considerando que os piroxenitos tratam de cumulos resultantes da cristalização fracionada de rochas máficas, esse padrão é adequado, haja vista que num processo de cristalização fracionada os cumulos poderiam ficar enriquecidos nos elementos incompatíveis (Austrheim *et al.*, 2003). Além disso, alguns lherzholitos associados a ambientes de arcos insulares são extremamente enriquecidos nos LILE, a exemplo dos nódulos com anfíbólio das ilhas Kerguelen (Maine, 2001). Uma amostra de tremolita-actinolita xisto mostra os mais baixos teores de elementos traços, com padrão normalizado de ETR horizontalizado (Ce<sub>N</sub>/Yb<sub>N</sub> = 2,0), com moderada anomalia positiva de Eu e *spiderdiagram* potiagudo, enriquecido nos LILE em relação aos HFSE, com picos em Ba, K e Sr e queda em Ta-Nb e Zr, típico de toleítos de arcos insulares.

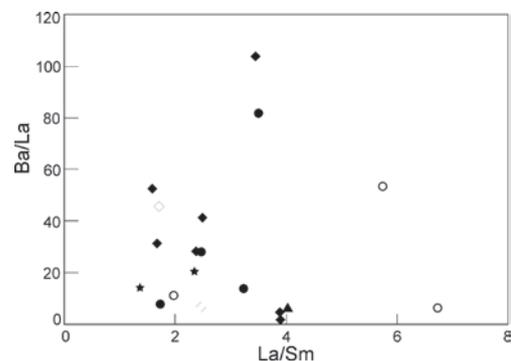


Figura 27 Spiderdiagram (tipo 2) para retroeclogitos com altos teores de FeO-TiO<sub>2</sub>. Símbolos: Itatuba: ● (anfíbólito bandado); ★ (anfíbólito maciço); ◆ (retroeclogito); ▲ (piroxenito); Salgado S. Félix : ● (anfíbólito bandado); Queimadas: ◆

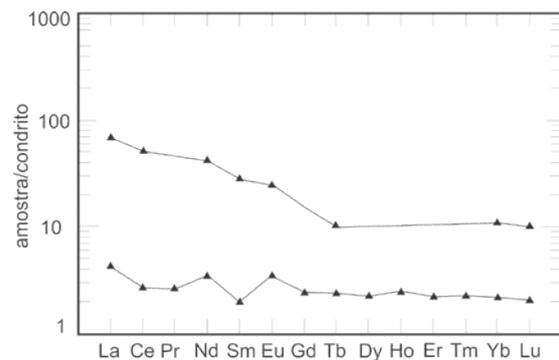


Figura 28 –Padrão normalizado de ETR para as rochas metaultramáficas. Símbolos: Itatuba: ● (anfíbólito bandado); ★ (anfíbólito maciço); ◆ (retroeclogito); ▲ (piroxenito); Salgado S. Félix : ● (anfíbólito bandado); Queimadas: ◆ Fatores de normalização de Sun (1982).

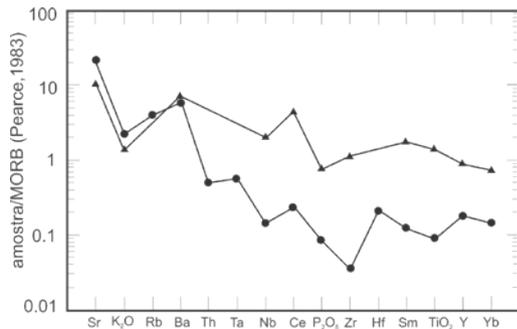


Figura 29 Spiderdiagrama para as metaultramáficas. Símbolos: Itatuba: ● (anfíbrolito bandado); ★ (anfíbrolito maciço); ◆ (retroeclogito); ▲ (piroxenito); Salgado S. Félix : ● (anfíbrolito bandado); Queimadas: ◆

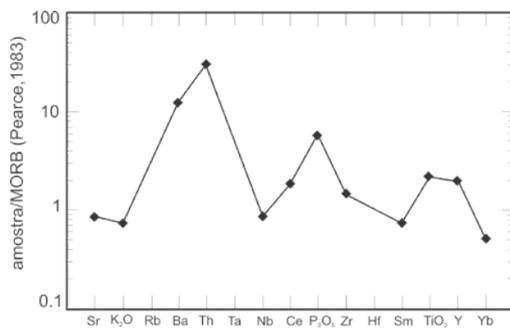


Figura 30 Diagrama La/Sm x Ba/La mostrando que as rochas estudadas são enriquecidas nos elementos incompatíveis com razões semelhantes a rochas associadas a arcos de ilhas. Símbolos: Itatuba: ● (anfíbrolito bandado); ★ (anfíbrolito maciço); ◆ (retroeclogito); ▲ (piroxenito); Salgado S. Félix : ● (anfíbrolito bandado); Queimadas: ◆

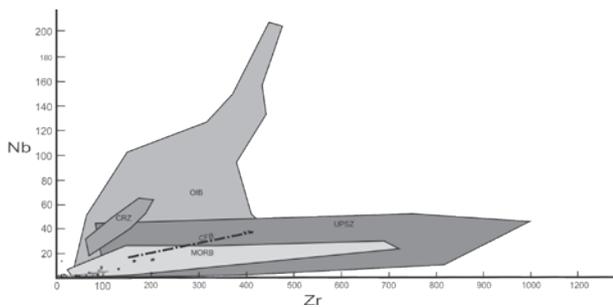


Figura 31 Diagrama Zr/Nb mostrando os campos para basaltos de ambiências tectônicas distintas.

Neste diagrama, as rochas estudadas mostram teores semelhantes a de basaltos toleíticos de arco de ilhas. Símbolos: Itatuba: ● (anfíbrolito bandado); ★ (anfíbrolito maciço); ◆ (retroeclogito); ▲ (piroxenito); Salgado S. Félix : ● (anfíbrolito bandado);

Haja vista, a análise tradicional de padrões normalizados apresentarem ambigüidades em termos de distinção das assinaturas geoquímicas de rochas basálticas, alguns autores têm utilizado as razões de elementos traços, levando em consideração os

diversos graus de fracionamento desses elementos em condições distintas e a variação nos teores em fontes diferentes (Baker *et al.* 1977; Bougault *et al.*, 1980; Sun & McDonough, 1989).

No diagrama La/Sm x Ba/La (Arculus & Powel, 1986) verifica-se que as razões La/Sm das rochas estudadas variam bastante (2 -8) próximas aos valores observados nos basaltos oceânicos com um componente enriquecido (Figura 30): os valores La/Sm para toleitos de arco de ilhas variam de 2-8 (Clift & Lee, 1998), os valores para MORB-P são de aproximadamente 7.5, enquanto que para os basaltos de ilhas oceânicas e para o MORB-N tendem a serem mais baixos, variando de 0,5 – 8 (ap. 1.0) e de 2.4 -3.0, respectivamente (Geokem). As razões Ba/La variam dentro de um grande intervalo (1-55) sendo compatíveis com as observadas em toleitos de arco de ilhas. Duas amostras de retroeclogitos, aquelas pertencentes ao grupo rico em Fe-Ti apresentam razões anormalmente elevadas (82–104), sugerindo a participação de um componente mais rico em material cristal ou de um manto subjacente a um arco maduro.

A razão Zr/Nb tem sido usada por diversos autores para distinguir basaltos oceânicos (por ex, Baker *et al.*, 1977; Wood, 1979; Fodor & Vetter, 1984; Humphris *et al.*, 1985; Condie, 2005; Dorais *et al.*, 2005), sendo que os valores mais elevados são registrados nos MORB-N (>30) e nos toleitos de arcos insulares (15-30); Os basaltos intra-oceânicos são os que apresentam as razões Zr/Nb mais baixas, haja vista, o aporte de Nb através de plumas advindas de uma manto mais profundo e menos diferenciado. No diagrama Zr x Nb (Thompson & Fowler, 1986) que distingue rochas de zonas ultrapotássicas relacionadas a zonas de subducção (UPSZ) foi adicionado os campos para os basaltos de ilhas oceânicas, MORB, CFB, CRZ e IAT Neoproterozóicos baseados nos dados do GEOROC/GEOKEM, Thompson *et al.* (1983, 1984); Fryer & Pearce (1992); Humphris *et al.* (1985) e Dovzhikova *et al.* (2004) - Figura 31. Verifica-se que para rochas com teores de Nb < 20 ppm há uma sobreposição entre MORB, OIB, CFB e UPSZ, entretanto, MORB, CFB e UPSZ são distintas do OIB por apresentarem teores mais elevados de Zr (Figura 32). Os toleitos Neoproterozóicos de arco de ilhas são os que apresentam os teores mais baixos de Nb e Zr (Figura 33 - detalhe Zr x Nb). Nesta figura e no diagrama Zr x Zr/Nb (Figura 33) observa-se que as rochas metamáficas estudadas desenvolvem dois *trends* distintos: as amostras de rochas altos em

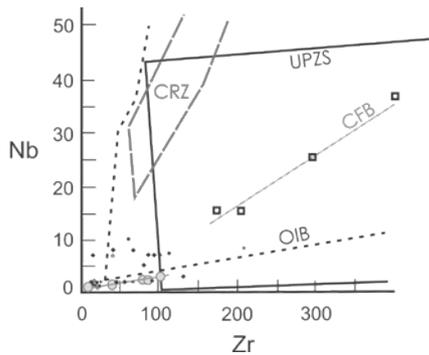


Figura 32 Detalhe do diagrama ZrxNb mostrando que as rochas metamáficas estudadas apresentam baixos valores Zr e Nb caindo fora dos campos de basaltos intraplacas continentais e oceânicos. Símbolos: Itatuba: ● (anfíbolito bandado); ★ (anfíbolito maciço); ◆ (retroeclogito); ▲ (piroxenito); Salgado S. Félix : ● (anfíbolito bandado); Queimadas: ◆

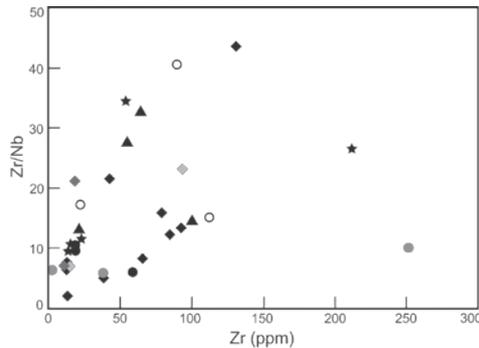


Figura 33 Diagrama ZrxZr/Nb mostrando que as rochas metamáficas desenvolvem trends semelhantes a de toleítos de arco de ilhas. Símbolos: Itatuba: ● (anfíbolito bandado); ★ (anfíbolito maciço); ◆ (retroeclogito); ▲ (piroxenito); Salgado S. Félix : ● (anfíbolito bandado); Queimadas: ◆

Fe-Ti projetam-se no limite inferior do campo OIB com razões  $Zr/Nb$  variando aproximadamente entre 2 – 15, enquanto que as amostras dos retroeclogitos alto MgO-CaO, metaultramáficas e a maioria dos anfíbolitos coincidem com o *trend* dos toleítos de arco de ilhas Neoproterozóicos com razões  $Zr/Nb$  mais elevadas variando entre 5 – 42. Em ambos os casos, as razões  $Zr/Nb$  são compatíveis com as razões observadas em toleítos de arcos insulares (Pfander *et al.*, 2002; Dovzhikova *et al.*, 2004), refletindo a retenção de Nb na fonte.

#### 4 Conclusões

Os dados geoquímicos para as rochas metamáficas com remanescentes de fácies eclogito, apontam para uma composição predominantemente basáltica toleítica com assinatura geoquímica de arcos oceânicos.

A associação dessas rochas com anomalias gravimétricas positivas-negativas que refletem variáveis profundas da interface crosta-manto onde as anomalias negativas são indicativas de espessamento crustal e as anomalias positivas de proximidade de rochas mais densas, constituem mais um indício de uma paleozona de subducção. Dessa forma, as rochas estudadas poderiam representar os relictos de uma zona de colisão continental com direção geral NE-SW a E-W na Faixa de Dobramentos Pajeú-Paraíba na Província Borborema.

Os dados geoquímicos também sugerem que as rochas metamáficas estudadas podem ter sido geradas a partir de uma mesma fonte, um manto enriquecido subjacente a uma zona de subducção, que sofreu diferenciação *in-situ* gerando as rochas com altos teores em MgO deixando piroxenitos como resíduo, e o grupo com altos teores em FeO-TiO<sub>2</sub> poderiam representar os membros mais diferenciados dessa associação submetida a um maior grau de contaminação crustal. Os primeiros líquidos teriam sido gerados sob condições moderadas de  $f_{O_2}$  e a anomalia de Eu levemente positiva poderia ser decorrente da retenção de piroxênio na fase residual, enquanto que, os retroeclogitos ricos em Fe-Ti seriam os produtos de líquidos mais diferenciados, nos quais anomalia levemente negativa de Eu e depressões em Ba e Sr sugerem decréscimo nas condições de  $f_{O_2}$  promovendo o enriquecimento em Fe e Ti, e fracionamento de ilmenita nos estágios mais tardios de cristalização e retenção de plagioclásio na fonte.

#### 5 Agradecimentos

Esse trabalho foi financiado pelo CNPq, mediante concessão de Bolsa DCR (processo 301040/99-0 (NV)).

Os autores agradecem a valiosa contribuição dos revisores Ciro Alexandre Ávila e Júlio César Mendes.

#### 6 Referências

- Almeida, F.F.M.; Hasui, Y.; Brito Neves, B.B. & Fuck, R.A. 1977. Províncias estruturais brasileiras. 1977. *In*: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 8. Campina Grande, 1977. *Atas...* Campina Grande, SBG/NE, p. 363-391.

- Almeida, C.N.; Guimarães, I.P.; Beurlen, H., Topitsch, W. & Ferrer, D.M.M. 2008. Evidências de metamorfismo de alta pressão na Faixa de Dobramentos Pajeú – Paraíba, Província Borborema, Nordeste do Brasil: Petrografia e Química Mineral de Rochas Metamáficas. Submetido (2008). *Revista Brasileira de Geociências*.
- Arndt, N.T.; Naldrett, A.J. & Pyke, D.R. 1977. Komatiitic and iron-rich tholeiitic lavas of Munro Township, northeast Ontario. *Journal of Petrology*, 18:319-369.
- Arculus, R.J. & Powell, R. 1986. Source component mixing in the regions of arc magma generation. *Journal of Geophysical Research - Solid Earth*, 91:5913–5926.
- Austrheim, H.; Corfu, F.; Bryhni, I. & Andersen, T.B. 2003. The Proterozoic Hustad igneous complex: a low strain enclave with a key to the history of the Western Gneiss Region of Norway. *Precambrian Research*, 120:149-175
- Baker, B.H.; Goles, G.G.; Leeman, W.P. & Lindstrom, M.M., 1977, Geochemistry and petrogenesis of a basalt-benmoreite-trachyte suite from the southern part of the Gregory rift, Kenya. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 64:303–332.
- Beurlen H. 1988. *Fazenda Esperança (Bodocó) e Riacho da Posse (Floresta): duas ocorrências atípicas de Fe-Ti no Estado de Pernambuco*. Tese para concurso de professor titular, UFPE, Recife, 72p.
- Brito Neves, B.B. 1983. *O mapa geológico do Nordeste Oriental do Brasil, escala 1:1.000.000*. Tese de Livre Docência, Instituto de Geociências/ Universidade de São Paulo, 171p.
- Brito Neves, B.B.; Van Schmus, W.R.; Hackspacher, P.C. & Santos, E.J. 1995a. Geocronologia da Borborema, 1995: os fatos e as questões abertas. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 16. Recife, 1993. *Boletim... Recife, SBG/NE*, 14(2):410-413.
- Brito Neves, B.B.; Santos, E.J. & Van Schmus, W.R. 2000. The tectonic history of the Borborema Province. In: U.G. Cordani; E.J. Milani; A. Thomaz Filho & D.A. Campos (eds.) “*Tectonic Evolution of the South American Continent*”, Rio de Janeiro, 38th International Geological Congress, 151-182.
- Brito Neves, B.B.; Campos Neto, M.C.; Van Schmus, W.R.; Fernandes, T.M.G. & Souza, S.L. 2001ba. O sistema Pajeú-Paraíba e o Maciço São José do Campestre no Leste da Borborema. *Revista Brasileira de Geociências*, 31: 173-184.
- Brito Neves, B.B.; Campos Neto, M.C.; Van Schmus, W.R.; Fernandes, T.M.G. & Souza, S.L. 2001b. O Terreno Alto Moxotó no leste da Paraíba (“Maciço Caldas Brandão”). *Revista Brasileira de Geociências*, 31:185-194.
- Bougault, H.; Joron, J. L. & Treuil, M. 1980. The primordial chondritic nature and large scale heterogeneities in the mantle: evidence from high and low partition coefficient elements in oceanic basalts. *The Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 297:203-213
- Cabanis, B. & Lecolle, M. 1989. Le diagramme La/10, Y/15, Nb/8: un outil pour la discrimination des series volcaniques et la mise en evidence dès procussus de melanges et/ ou de contamination crustale. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 309:2023-2029.
- Clift, P.D. & Lee, J. 1998. Temporal evolution of the Mariana arc during rifting of the Mariana Trough traced through the volcanoclastic record. *The Island Arc*, 7(3):496-512.
- Condie, K.C. 2005. High field strength element ratios in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes? *Lithos*, 79:491– 504
- Cortesogno, L.; Ernst, W.G.; Galli, M.; Messiga, B.; Pedemonte, G.M. & Picardo, G.B. 1977. Chemical petrology of eclogitic lenses in serpentinite, Grupo di Voltri, Ligurian Alps. *Journal of Geology*, 85:255-277.
- Costa, A.C.; Mendes, V.A.; Rocha, D.E.G.A. & Andrade, D.A. 1980. Projeto Extremo Nordeste do Brasil. Relatório Final, DNPM/ CPRM, Recife. Vol. I e II, 337p.
- Dorais, M.J.; Harper, M.; Larson, S.; Nugroho, H.; Richardson, P. & Roosmawati, N. 2005. A comparison of Eastern North America and Coastal New England magma suites: implications for subcontinental mantle evolution and the broad-terranes hypothesis. *Canadian Journal of Earth Science*, 42: 1571–1587.
- Dovzhikova, E; Pease, V. & Remizov, D. 2004. Neoproterozoic island arc magmatism beneath the Pechorra Basin, NW Rússia. *GFF Online*, 126:353-362.
- Droop, G.T.R.; Lombardo B. & Pognante, U. 1990. Formation and distribution of eclogite-facies rocks in the Alps. In: CARSWELL, D.A. (ed).

- Eclogite-facies rocks*, Blackie, Glasgow, pp 225-259.
- Ernst, W.G. 1973. Interpretive synthesis of metamorphism in the Alps. *Geological Society of American Bulletin*, 16:2053-2078. Geokem. www.geokem.com
- Fodor, R.V. & Vetter, S.K. 1984. Rift zone magmatism: petrology of basaltic rocks transitional from CFB to MORB, southeastern Brazil margin. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 88: 307-321.
- Fryer, P. & Pearce, J A. 1992. Introduction to the scientific results of Leg 125. In: FRYER.; PEARCE, J. A. & STOKKING, L. B. (eds.). *Proceedings of the Ocean Drilling Program Scientific Results*, 125: 3-11.
- Humphris, S. E.; Thompson G.; Schilling, J. G. & Kinsley, R. H. 1985. Petrological and geochemical variations along the Mid-Atlantic Ridge between 46°S and 32°S: Influence of the Tristan da Cunha mantle plume. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49: 1445–1464.
- Irvine, T.N. & Baragar, W.P.A. 1971. A guide to chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8:523-548.
- Le Bas, M.J. 2000. IUGS reclassification of the high-Mg and picritic volcanic rocks. *Journal of Petrology*, 41(10):1467-1470.
- Le Maitre, R.W. 1989. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms. Recommendations of the IUGS Commission on the Systematics of Igneous Rocks. Oxford: Blackwell, 40p.
- Messiga, B.; Piccardo, G.B. & Ernst, W.G. 1983. High pressure Eo-alpine parageneses developed in magnesian metagabbros, Gruppo di Voltri, Western Liguria, Italy. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 83: 1-15.
- Miyashiro, A. & Shido, F. 1975. tholeiitic and calc-alkalic series in the relation to the behaviors of titanium, vanadium, chromium and nickel. *American Journal of Science*, 275:265-277.
- Mottana, A.; Carswell, D. A.; Chopin, C. & Oberhänsli, R. 1990. Eclogite facies mineral parageneses. In: Carswell, D. A. (ed.) *Eclogite Facies Rocks*. Glasgow: Blackie, pp. 14–52.
- Mullen, E.D. 1983.  $MnO/TiO_2/P_2O_5$ : a minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis. *Earth Planetary Science and Letters*, 62:53-62.
- Neves, S.P. & Mariano, G. 2002. Província Borborema: orógeno acrescionário ou intracontinental? *Estudos Geológicos*, 11:37-52.
- Neves S.P.; Mariano G.; Guimarães I.P. & Da Silva Filho A.F. 2000. Geoquímica do manto litosférico e acreção de terrenos tectônicos na Província Borborema. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 16. Recife, 2000. *Boletim...* Recife, SBG/NE, 16:99.
- Neves, S.P. 2003. Proterozoic history of the Borborema province (NE Brazil): Correlations with neighboring cratons and Pan-African belts and implications for the evolution of western Gondwana. *Tectonics*, 22(4):5-14.
- Oliveira, R.G. & Santos, E.J. 1993. Seção geológica-geofísica e inferências geotectônicas na porção centro-sul da Província Borborema. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 3. *Resumos Expandidos*, 1:643-747.
- Pearce, J.A. 1996. A user's guide to basalt discrimination diagrams, in trace element geochemistry of volcanic rocks. In: Wyman, D.A. (ed.). *Applications for massive sulphide exploration: Winnipeg. Geological Association of Canada Short Course Notes*, 12:79–113.
- Pearce, J.A., & Cann, J. R., 1973, Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth Planetary Science and Letters*, 19(2):290-300.
- Pearce, J.A., and Gale, G. H., 1977, Identification of ore-deposition environment from trace element geochemistry of associated igneous host rocks. *Geological Society Special Publications*, 7:14-24.
- Pearce, J.A. & Norry, M.J. 1979. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 69:38-47.
- Pfander, J.A.; Jochum, K.P. & Kozakov, I. 2002. Coupled evolution of back-arc and island arc-like mafic crust in the late-Neoproterozoic Agardagh Tes-Chem ophiolite, Central Asia: evidence from trace element and Sr–Nd–Pb isotope data. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143: 154–174.
- Santos, E.J. 1995. O complexo granítico Lagoa das Pedras: acreção e colisão na região de Floresta (Pernambuco), Província Borborema. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências/ Universidade de São Paulo, 219p.
- Santos E.J. & Medeiros V.C. 1997. Constraints

- from granitic plutonism on proterozoic crustal growth of the Zona Transversal Domain, Borborema Province, NE Brazil. *In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON GRANITES AND ASSOCIATED MINERALIZATION*, 2. Salvador. *Extended Abstracts*, 237-239.
- Santos, J.E. & Medeiros, V.C. 1999. Constraints from granitic plutonism on Proterozoic crustal growth of the Transverse Zone, Borborema Province, NE Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 29: 73-84.
- Sun, S.S. & McDonough, W.F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle compositions and processes. *In: SAUNDERS, A.D. & NORRY, M.J. (eds.). Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society Special Publications*, 42:96-98.
- Thompson, R. N. & Fowler, M. B. 1986. Subduction-related shoshonitic and ultrapotassic magmatism: a study of Siluro-Ordovician syenites from the Scottish Caledonides. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 94(4):507-522.
- Thompson, R.N.; Morrison, M.A.; Dickin, A.P. & Hendry, G.L. 1983. Continental flood basalts... arachnids rule OK? *In: HAWKESWORTH, C.J., & NORRY, M.J. (Eds.), Continental Basalts and Mantle Xenoliths*, Cheshire, UK (Shiva), p.158-185.
- Thompson, R.N.; Morrison, M.A.; Hendry, G.L. & Parry, S.J. 1984. An assessment of the relative roles of crust and mantle in magma genesis: an elemental approach. *The Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 310:549-590.
- Van Schmus, W.R.; Brito Neves, B.B.; Hackspacher, P.C. & Babinski M. 1995. U/Pb and Sm/Nd geochronologic studies of the Eastern Borborema Province, Northeastern Brazil: initial conclusions. *Journal of South American Earth Science Review*, 8: 267-288.
- Vauchez. A.; Neves S.P.; Caby R.; Corsini M.; Egydio-Silva M.; Arthaud M. & Amaro V. 1995. The Borborema Shear Zone. *Journal of South American Earth Science Review*, 8:247-266.
- Wilcox, R.E. 1979, The liquid line of descent and variation diagrams. *In: YODER, H.S., Jr. (ed.). The Evolution of the Igneous Rocks*, Princeton University Press, Princeton, p. 205-232.
- Wilson, M. 1989. *Igneous Petrogenesis*. London, Unwin Hyman. 466p.