

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA-ISOTÓPICA E
GEOCRONOLOGIA DO ENXAME DE DIQUES DE MANÁIRA-
PRINCESA ISABEL (PB) – PROVÍNCIA BORBOREMA**

CAROLINA PELÁEZ MEJÍA

Orientadora: Profa. Dra. Maria Helena Bezerra Maia de Hollanda

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica

São Paulo
2008

*A mis padres, German y Clara por su eterno
apoyo y amistad.
A Maria Helena, por toda su dedicación, paciencia
y sabiduría.*

AGRADECIMENTOS

Eu quero agradecer às pessoas e entidades que contribuíram no desenvolvimento deste trabalho de mestrado.

À minha orientadora Profa. Dra. Maria Helena Bezerra Maia de Hollanda por ter aberto as portas para iniciar estudos de pós-graduação, pelo contínuo apoio, pela orientação precisa e inteligente neste processo de formação.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de mestrado. A FAPESP (processo 04/08614-9), pelo recurso financeiro que permitiu o desenvolvimento deste projeto.

Ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, pela formação acadêmica a mim concedida através de seus professores. Em especial gostaria de agradecer ao Prof. Dr. Carlos Archanjo pelo seu apoio e orientação.

Ao grupo do Centro de Pesquisas Geocronológicas: Ivone, Helen, Solange, Izabel, Liliane, Arthur, Mitzi e Vasco e a Sandra, Paulinho e Marcos dos Laboratórios de Química e Microsonda Eletrônica deste instituto, pela colaboração no trabalho de laboratório.

Aos funcionários do corpo Administrativo de Instituto de Geociências, pela constante colaboração, e em especial a Ana Paula Cabanal, Magali Poli Fernandes Rizzo, Tadeu e Zé Carlos, pela disposição e a amizade.

Agradeço também aos meus colegas e amigos Angela, Mauricio, Luiz, Milene, Veridiana, Marta e Alejandro, por sua companhia e colaboração.

Aos amigos Fernanda, Daiana, Adelaida, Ricardo, Cristian, Douglas e Sérgio pela possibilidade de compartilhar bons momentos, e a ajuda constante.

A meus pais, agradeço por tudo que consegui, pela lição de vida e por todo amor, atenção e apoio moral.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram de alguma maneira para que este trabalho pudesse ser realizado.

RESUMO

O enxame de diques ácidos da região de Manaíra-Princesa Isabel aflora no na porção mais centro-ocidental do estado da Paraíba, geograficamente limitada pelas cidades de Manaíra, Princesa Isabel e Tavares. Geologicamente, intrude um substrato composto por rochas granitóides neoproterozóicas representadas pelos batólito de Triunfo e os plútons de Princesa Isabel e Tavares. Os diques estão distribuídos em um trend NNE-SSW, a sul dos milonitos verticais da Zona de Cisalhamento de Juru-Belém, compreendendo nefelina sienitos a sienitos supersaturados em sílica, com afinidade peralcalina a sub-metaluminosa, potássica a ultrapotássica. Um conjunto menor de diques é ainda representado por álcali-granitos, com afinidade peraluminosa.

A assinatura geoquímica-isotópica dos diques mostra forte enriquecimento em elementos incompatíveis (Rb, Ba, K, Th, U, Sr), depleção pronunciada em Nb, e razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (= ϵNd negativos) muito radiogênicas. A combinação desses aspectos sugere uma fonte comum, provavelmente um manto litosférico enriquecido. Um componente de subducção, sugerido pelas anomalias negativas em Nb, seria o provável responsável pela modificação geoquímica desse manto. Ao contrário, razões $^{206,207,208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ mais baixas, em relação à média dos valores crustais, sugerem a participação conjunta de um componente não-radiogênico, ainda não identificado. Idades TDM entre 1,8-2,2 Ga indicam que o evento metassomático deve ter sido antigo, provavelmente relacionado à geração de crosta (em ambiente de arco) paleoproterozóica na região.

Dados U/Pb SHRIMP em zircão e $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ em anfibólio indicam idade c. 600 Ma para o magmatismo alcalino fissural na região de Manaíra-Princesa Isabel. Esse resultado é importante para definir um cenário geodinâmico de exumação crustal, no setor central da Zona Transversal, entre dois picos de atividade magmática a c. 630 Ma e 580 Ma.

ABSTRACT

The Manaíra-Princesa Isabel dike swarm forms one of the most expressive Neoproterozoic alkaline magmatism of the Borborema Province (NE Brazil). It consists of about a hundred NE-trending bodies intrusive in Neoproterozoic porphyritic granites (Princesa Isabel and Tavares plutons) and orthogneisses and low grade metasediments of the Eoneoproterozoic Riacho Gravatá Complex. The swarm was divided in four groups according its geographic location, i.e., the Tavares dikes to the north, the Princesa Isabel and Manaíra dikes, and the Serra Talhada dikes to the south.

Silica oversaturated nepheline syenites and syenites are typical for Tavares, Princesa Isabel and Manaíra dikes, with potassic to ultrapotassic, peralkaline to sub-metaluminous affinity. A minor but distinct Serra Talhada dikes, show characteristically peraluminous affinity. Geochemical and isotopic signatures indicate strong enrichment in incompatible elements (Rb, Ba, K, Th, U, Sr), negative Nb anomaly, and quite radiogenic $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (= negative ϵNd values) initial ratios. These features suggest a common source for the swarm, which was probably an enriched lithospheric mantle reservoir. Nb depletion found in all dikes indicates an important subduction component geochemical signature. Conversely, the $^{206,207,208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratios are lower than crustal values, indicating participation of an unradiogenic component. Paleoproterozoic Sm-Nd model ages, between 1.8–2.2 Ga, are interpreted as age of an older metasomatic event modifying the dike mantle source.

SHRIMP U/Pb (zircon) and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (amphibole) data yielded crystallization age of c. 600 Ma for the Manaíra-Princesa Isabel dike swarm. This allows to define an important crustal exhumation period in the Zona Transversal domain between two significant magmatic activity peaks, at c. 630 Ma and 580 Ma.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - APRESENTAÇÃO, OBJETIVOS E GEOLOGIA REGIONAL

1.1. A MONOGRAFIA COMO PROJETO DE PESQUISA	01
1.2. ESCOPO DA MONOGRAFIA	03
1.3. CONTEXTO GEOLÓGICO: A PROVÍNCIA BORBOREMA ORIENTAL	04
1.3.1 A ZONA TRANSVERSAL	04
1.3.1.1 <i>O Domínio Rio Capibaribe</i>	05
1.3.1.2 <i>O Domínio Alto Moxotó</i>	06
1.3.1.3 <i>O Domínio Alto Pajeú</i>	09
1.3.1.4 <i>O Domínio Cachoeirinha</i>	10
1.3.1.5 <i>O magmatismo Ultrapotássico a Peralcalino</i>	12

CAPÍTULO 2 - O ENXAME DE DIQUES DE MANAÍRA: ASPECTOS DE CAMPO E GEOCRONOLOGIA

2.1 INTRODUÇÃO	14
2.2 ASPECTOS DE CAMPO	16
2.3 GEOCRONOLOGIA	17
2.3.1 GEOCRONOLOGIA U/Pb SHRIMP	18
2.3.1.1 <i>Procedimento analítico</i>	18
2.3.1.2 <i>Resultados</i>	18
2.3.2 GEOCRONOLOGIA $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	21
2.3.2.1 <i>Procedimento analítico</i>	21
2.3.2.2 <i>Resultados</i>	24

CAPÍTULO 3 - PETROGRAFIA E QUÍMICA MINERAL

3.1 Introdução	25
3.2 Aspectos Gerais Macro- e Microscópicos	26
3.3 MICROSCOPIA E QUÍMICA MINERAL	28
3.3.1 SUB-ENXAME MANAÍRA	28
3.3.2 SUB-ENXAME PRINCESA ISABEL	29
3.3.3 Sub-enxame Tavares	32
3.3.4 SUB-ENXAME SERRA TALHADA	35

CAPÍTULO 4 - LITOQUÍMICA E GEOQUÍMICA ISOTÓPICA

4.1 INTRODUÇÃO	37
4.2 RESULTADOS	39
4.2.1 ELEMENTOS MAIORES	39
4.2.2 ELEMENTOS TRAÇOS/TERRAS RARAS	41
4.2.3.1 <i>Composição isotópica de Sr</i>	45
4.2.3.2 <i>Composição isotópica de Nd</i>	46
4.2.3.3 <i>Composição isotópica de Pb</i>	47

CAPÍTULO 5 - DISCUSSÕES E CONCLUSÃO

5.1 NATUREZA DA FONTE	53
5.2 IMPLICAÇÕES REGIONAIS	55
5.3 CONCLUSÕES	57
REFERÊNCIAS	58
ANEXOS	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. A Província Borborema (NE do Brasil) com ênfase para o plutonismo neoproterozóico-cambriano (em preto) e as principais zonas de cisalhamento brasileiras.	05
Figura 2. Mapa geológico simplificado da Zona Transversal.	07
Figura 3. Diagrama de evolução isotópica do Nd para as rochas paleoproterozóicas da Zona Transversal correspondendo ao Domínio Alto Moxotó (a) e exposições do embasamento em torno de Serra Talhada (PE), Pocinhos e São José de Caiana (PB) (b) .	08
Figura 4. Diagrama de evolução isotópica do Nd para ortognaisses do Domínio Alto Pajeú (a) e metassedimentos e metavulcânicas do Complexo Riacho Gravatá (b) .	09
Figura 5. Diagrama de evolução isotópica do Nd para as rochas metasedimentares do Domínio Cachoeirinha.	10
Figura 6. Mapa esquemático ilustrando as relações espaciais entre os diques e suas encaixantes - os plútons de Triunfo, Princesa Isabel e Tavares, e sua distribuição com respeito à Zona de Cisalhamento de Juru-Belém.	14
Figura 7. Imagem de satélite LANDSAT mostrando a área representada pela intrusão sienítica de Triunfo (verde), e granitos de Princesa Isabel e Tavares (branco). Em amarelo, destacam-se os inúmeros diques cartografados, os quais nem sempre estão associados a altos topográficos.	15
Figura 8. Diques de direção NE-SW encaixados nos granitos porfiríticos de Princesa Isabel (a) e Tavares (b) .	16
Figura 9. Relações de campo dos diques de Manaíra: (a) contato entre um dique e metassedimentos de baixo grau metamórfico; (b, c) bordas resfriadas no contato do dique com o granito de Tavares, em b , e metassedimentos do Complexo Riacho Gravatá, em c .	17
Figura 10. Diagrama Concórdia Wetherhill ilustrando o plote das populações de zircões analisados do dique 05DKMN-02 (a) . À direita, um zoom da parte inferior do diagrama, com ênfase para as populações mais jovens (b) .	19
Figura 11. Histograma de probabilidade das populações de zircão analisadas no dique 05DKMN-02.	20
Figura 12. Espectros obtidos a partir das análises $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ por aquecimento gradual a laser para dois grãos de anfibólio (fração fina) da amostra 05DKTV-2A.	24
Figura 13. Espectros obtidos a partir das análises $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ por aquecimento gradual a laser para dois grãos de anfibólio (fração grossa) da amostra 05DKTV-2A.	24
Figura 14. Imagens microscópica convencional e binária de amostras dos sub-enxames Manaíra (a) e Serra Talhada (b) , mostrando a correspondência entre as fases minerais félsicas e máficas.	27
Figura 15. Diagrama de classificação para piroxênios do sub-enxame Manaíra.	29
Figura 16. Diagramas de classificação (a) Na-Ca e (b) $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})$ -Si para os anfibólios do sub-enxame Manaíra. Em (b): $(\text{Na}+\text{K})_{\text{A}} < 0,5$; $\text{Na}_{\text{B}} \geq 1,5$; $(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+}+\text{Mn}^{2+}) > 2,5$; $(\text{VIAl ou Fe}^{3+}) > \text{Mn}^{3+}$; $\text{Li} < 0,5$; $(\text{Mg ou Fe}^{2+}) > \text{Mn}^{2+}$.	29

- Figura 17. Diagrama de classificação **(a)** Na-Ca e **(b)** $Mg/(Mg+Fe^{2+})-Si$ para anfibólitos do sub-enxame Princesa Isabel. Em (b): $(Na+K)_A \geq 0,5$; $(Ca+Na_B) \geq 1$; $0,5 < Na_B < 1,5$. 30
- Figura 18. Diagrama de classificação para anfibólitos sódicos do sub-enxame Princesa Isabel, com: $Na_B \geq 1,50$; $(Mg+Fe^{2+}+Mn^{2+}) > 2,5$; $(^{VI}Al \text{ ou } Fe^{3+}) > Mn^{3+}$; $Li < 0,5$; $(Mg \text{ ou } Fe^{2+}) > Mn^{2+}$. A proporção de álcalis no sítio A é variável, sendo $[(Na+K)_A < 0,5]$ em **(a)** e $[(Na+K)_A \geq 0,5]$ em **(b)**. 32
- Figura 19. Diagrama de classificação **(a)** Na-Ca e **(b)** $Mg/(Mg+Fe^{2+})-Si$ para anfibólitos do sub-enxame Tavares. Em (b): $Na_B \geq 1,50$; $(Mg+Fe^{2+}+Mn^{2+}) > 2,5$; $(^{VI}Al \text{ ou } Fe^{3+}) > Mn^{3+}$; $Li < 0,5$; $(Mg \text{ ou } Fe^{2+}) > Mn^{2+}$; a proporção de álcalis no sítio A equivale a $[(Na+K)_A < 0,5]$. 33
- Figura 20. Diagrama de classificação para anfibólitos sódico-cálcicos do sub-enxame Tavares, com: $(Na+K)_A < 0,5$; $(Ca+Na_B) \geq 1$; $0,5 < Na_B < 1,5$. 33
- Figura 21. Diagramas de classificação para piroxênios sódicos **(a)** e cálcicos **(b)** do sub-enxame Tavares. 35
- Figura 22. Diagrama de classificação de biotitas para o sub-enxame Serra Talhada. 36
- Figura 23. Diagrama de classificação geoquímica relacionando o teor de álcalis (Na_2O+K_2O) versus a percentagem de sílica (segundo Cox et al., 1979). 39
- Figura 24. Diagramas de correlação alumina e álcalis. Em **(a)** saturação em alumina (Índice de Shand) e em **(b)** sílica versus índice agpaítico (Ind. Agp.). Rochas peralcalinas têm Ind. Agp. > 1 , enquanto outras rochas alcalinas têm valores acima de 0.87 (Liégeois e Black, 1987). 40
- Figura 25. Diagramas de variação entre óxidos (tipo Harker) para as amostras dos sub-enxames Manaíra, Princesa Isabel, Serra Talhada e Tavares. 42
- Figura 26. Espectros de comportamento de elementos incompatíveis (*spidergrams*) para as amostras dos sub-enxames Manaíra **(a)**, Princesa Isabel **(b)**, Serra Talhada **(c)** e Tavares **(d)**. 43
- Figura 27. Gráficos de correlação **(a)** Rb, **(b)** K, **(c)** Ba, **(d)** Nb versus SiO_2 . 43
- Figura 28. Espectro das concentrações de elementos terras-raras para os sub-enxames Manaíra **(a)**, Princesa Isabel **(b)**, Serra Talhada **(c)** e Tavares **(d)**. Os valores das razões $(La/Yb)_N$ são indicados em parênteses. 44
- Figura 29. Diagrama de correlação sílica versus Eu/Eu^* para os sub-enxames Manaíra e Tavares. 45
- Figura 30. Diagramas de correlação entre razões $^{87}Rb/^{86}Sr$ versus $^{87}Sr/^{86}Sr$ **(a)** e $^{87}Sr/^{86}Sr$ e $\square Nd$ **(b)** para as amostras dos sub-enxames Manaíra, Princesa Isabel, Serra Talhada e Tavares. 47
- Figura 31. Diagramas de correlação entre razões $^{207}Pb/^{204}Pb$ **(a)** e $^{208}Pb/^{204}Pb$ **(b)** com razões $^{206}Pb/^{204}Pb$ para as amostras dos sub-enxames Manaíra, Princesa Isabel, Serra Talhada e Tavares - modelo plumbotectônica. 48

ÍNDICE DE FOTOMICROGRAFIAS

Prancha 1

31

Fotomicrografia 1. Cristal de piroxênio (Prx) em matriz de feldspato potássico (FK). O piroxênio apresenta zoneamento composicional, com centros mais escuros de composição egirina-augita (Eg-Au) e bordas mais claras de egirina (Eg). E apatita (Apt) acicular. Amostra DKMN-04, análise 5 da microsonda, polarizadores paralelos.

Fotomicrografia 2. Cristal de anfibólio (Anf) de composição homogênea (magnésio-riebeckita), junto com piroxênio (Prx). Amostra DKMN-08, polarizadores paralelos.

Fotomicrografia 3. Cristais de piroxênio (Prx), sendo substituído por anfibólio azul (Anf) no centro. Cristais euedrais de titanita (Tnt), em feldspato potássico (FK). Amostra DKMN-02, polarizadores paralelos.

Fotomicrografia 4. Cristal de anfibólio (Anf) como zonamento composicional, com centros azuis de magnésio-riebeckita (MRb) e bordas esverdeadas de ferro-richterita (FRcht). Análise 9 da microsonda. Amostra DKPI-01, polarizadores paralelos.

Fotomicrografia 5. Cristal de anfibólio (Anf) euedral. Amostra DKPI-01, polarizadores paralelos.

Prancha 2

34

Fotomicrografia 1. Cristais de anfibólio (Anf) com pleocroísmo variando entre azul violáceo-azul escuro. Amostra DKTV-2A, polarizadores paralelos.

Fotomicrografia 2. Agregados de anfibólio (Anf) aciculares, radiais, com alteração para óxido de ferro. Amostra DKTV-05, polarizadores paralelos.

Fotomicrografia 3. Cristal de anfibólio (Anf) azul, de composição magnésio-riebeckita (MRb). Mantos de winchita em torno de MRb. Amostra DKTV-05, polarizadores paralelos.

Fotomicrografia 4. Cristal euedral de piroxênio (Prx), de composição cálcica - diopsídio. Análise 10 da microsonda. Amostra DKTV-04, polarizadores paralelos.

Fotomicrografia 11. Cristais de biotita (Bt) com alteração para clorita (Cl), entre feldspatos potássicos (FK). Amostra DKST-02, polarizadores paralelos.

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Dados U/Pb SHRIMP para zircões da amostra DKMN-02.	21
Tabela 2. Proporção volumétrica das fases minerais félsicas e máficas constituintes dos sub-enxames Manaíra, Princesa Isabel, Serra Talhada e Tavares.	27
Tabela 3. Composição química de elementos maiores (% em peso) das rochas dos sub-enxames Manaíra, Princesa Isabel, Serra Talhada e Tavares.	49
Tabela 4. Mineralogia normativa CIPW para as amostras dos sub-enxames Manaíra, Princesa Isabel, Serra Talhada e Tavares.	50
Tabela 5. Composição química de elementos traços (ppm) das amostras dos sub-enxames Manaíra, Princesa Isabel, Serra Talhada e Tavares.	51
Tabela 6. Dados isotópicos Rb-Sr e Sm-Nd das amostras dos sub-enxames Manaíra, Princesa Isabel, Serra Talhada e Tavares.	52
Tabela 7. Dados isotópicos U-Th-Pb das amostras dos sub-enxames Manaíra, Princesa Isabel, Serra Talhada e Tavares.	52

CAPÍTULO 1 - APRESENTAÇÃO, OBJETIVOS E GEOLOGIA REGIONAL

1.1. A MONOGRAFIA COMO PROJETO DE PESQUISA

Idades compreendidas entre 530 e 460 Ma obtidas principalmente pelo método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ têm sido regularmente documentadas na Província Borborema Oriental. Essas idades são encontradas em minerais (especialmente micas) de zonas de cisalhamento com forte atividade hidrotermal, e ainda em rochas graníticas intrusivas, e vêm sendo atribuídas à lenta dissipação de calor após o pico metamórfico Brasileiro datado em c. 580 Ma. A descoberta recente de diques máficos e extensiva atividade pegmatítica cambrianos nos estados da Paraíba e Rio Grande do Norte indica claramente que a reativação térmica na parte oriental da província esteve associada a ambos dinâmica do manto (produção de basalto) e importante movimentação hidrotermal-magmática na crosta (injeção de pegmatitos).

Com objetivo de investigar o significado geodinâmico da transição Precambriano-Paleozóico na Província Borborema Oriental, está sendo desenvolvido um projeto de pesquisa intitulado *O CAMBRO-ORDOVICIANO NA PROVÍNCIA BORBOREMA*, sob coordenação da profa. Maria Helena Hollanda e financiado pela Fapesp. Para atingir esse objetivo foram selecionados alvos magmáticos potencialmente candidatos à idades cambrianas e zonas de cisalhamento espacial e geneticamente associadas a estes alvos, a fim de estabelecer tipos de reservatórios-fonte envolvidos e cenário tectônico vigente neste importante período de tempo. O enxame de diques ácidos que aflora na região circunscrita pelas cidades de Manaíra, Princesa Isabel e Tavares, no estado da Paraíba, foi um desses alvos. Suas relações de intersecção com corpos graníticos e estruturas regionais neoproterozóicas apontavam para provável idade cambriana (ou ainda pós-brasiliana), assim justificando seu estudo detalhado.

Até o presente, número significativamente pequeno de dados referentes ao enxame de diques de Manaíra-Princesa Isabel esteve disponível na literatura. Sial e Ferreira (1988) apresentam dados petrográficos e geoquímicos (rocha-total) de apenas duas amostras dos diques da região de Princesa Isabel, incluindo-os em uma discussão maior sobre petrografia e quimismo do conjunto magmático definido como *linha sienitóide* (Ferreira e Sial, 1986). Esse 'alinhamento' é representado um cortejo de corpos ígneos cujo representante maior é o batólito de Triunfo. A constituição mineral desse plúton é relativamente simples,

sendo descrita pela dominância de K-feldspato (microclina) e clinopiroxênio (egirina-augita), com teor total de álcalis indicando afinidade peralcalina ultrapotássica. Os dados das duas amostras dos diques de Princesa Isabel coincidem com as características gerais daquele batólito, sendo este um dos motivos pelo qual a correlação temporal entre ambos os eventos magmáticos (fissural e plutonismo) foi estabelecida como sincrônica. No entanto, relações de contato diretas entre os diques e o sienito não são comumente observadas em campo. C.J. Archanjo (comunicação verbal) cita apenas uma localidade em que se pode observar a interseção da foliação magmática no sienito por um dique do enxame.

O magmatismo sienítico peralcalino representado pelo batólito de Triunfo e o enxame de diques ácidos de Manaíra-Princesa Isabel foi considerado por Sial e Ferreira (1988) como representantes do volumoso magmatismo sin-brasiliano que intrude toda a Província Borborema em c. 580 Ma. Esse vínculo temporal foi estabelecido com base em uma isócrona Rb/Sr para o batólito de Triunfo com idade de 583 ± 12 Ma (Ferreira et al., 1994). Todavia, relações de campo mostram que os diques cortam as estruturas dúcteis regionais (foliação e lineação de estiramento) de baixo grau desenvolvida em filitos da Faixa Cachoeirinha, as quais têm sua geração creditadas ao ciclo brasileiro; portanto, em desacordo com a interpretação de magmatismo sincrônico a esse evento. Idades absolutas ainda não tinham sido obtidas para os diques, sendo inéditos os dados apresentados nesta monografia.

Embora informações sobre aspectos petrográficos dos diques (apenas duas amostras) de Princesa Isabel estejam publicadas em Sial e Ferreira (1988), estudo adicional e detalhado desse magmatismo fissural foi realizado em seções delgadas próprias, com vistas à obtenção de maior volume de dados que incluía fases minerais constituintes, proporções modais e relações texturais. O conjunto de amostras disponíveis para execução deste projeto constou de 13 (treze) amostras, cedidas por Dr. C.J. Archanjo após coleta sistemática para trabalhos prévios de ASM (anisotropia de susceptibilidade magnética), e 5 (cinco) amostras coletadas em etapas de campo especificamente programadas neste projeto. Química mineral, litoquímica de rocha total, isotopia Sr-Nd-Pb e geocronologia U-Pb e Ar-Ar foram os métodos de abordagem utilizados nesse estudo. Os resultados estão reunidos nos capítulos a seguir, interpretados e discutidos em conjunto ao final dessa monografia.

1.2. ESCOPO DA MONOGRAFIA

presente monografia de Mestrado está organizada em seis capítulos. As informações sobre o contexto geológico regional ao qual o enxame de diques em estudo está inserido são apresentadas ao final deste primeiro capítulo. Os aspectos de campo referentes às relações de intersecção entre os diques e as unidades litoestratigráficas vizinhas - metassedimentos e plútons granitóides, constam no capítulo 2, onde também estão incluídos os dados geocronológicos U-Pb (SHRIMP) e Ar-Ar mineral. As características petrográficas incluem informações extraídas do estudo microscópico (minerais constituintes, texturas) e análises composicionais em microsonda eletrônica, estando reunidas no capítulo 3. A assinatura litoquímica (padrão de elementos maiores e traços) e isotópica Sr-Nd-Pb são individualmente comentados no capítulo 4. Por fim, os resultados expostos são interpretados em conjunto constituindo a base para as discussões e conclusões apresentadas no capítulo 5.

1.3. CONTEXTO GEOLÓGICO: A PROVÍNCIA BORBOREMA ORIENTAL

A **Província Borborema** é definida como uma entidade tectônica situada no Nordeste do Brasil, marcada pela atuação do Ciclo Brasileiro/Pan-africano (Almeida *et al.*, 1981). Limita-se a sul com o Cráton São Francisco, a oeste com a Bacia do Parnaíba, e a leste e norte com sedimentos costeiros quaternários (Fig. 1). A feição mais marcante da orogênese brasileira na Borborema é o volumoso magmatismo, predominantemente granítico, temporal e espacialmente associado à extensas zonas de cisalhamento que seccionam toda a província. Nas reconstruções paleogeográficas que antecedem a abertura do Atlântico, a Borborema é parte de um extenso cinturão orogênico transcontinental com continuidade na África Ocidental, particularmente nos escudos da Nigéria, Camarões e Hoggar (Argélia).

Dados geocronológicos, isotópicos e gravimétricos recentes têm permitido subdividir a Borborema em três sub-províncias: (i) **Sententrional**, situada a norte do Lineamento Patos, incluindo o centro e noroeste do Ceará, (ii) **Meridional**, entre o Lineamento Pernambuco e a margem norte do Cráton São Francisco, e (iii) uma sub-província central, também conhecida como **Zona Transversal**, situado entre os lineamentos Patos e Pernambuco. Na sub-província Setentrional predominam rochas paleoproterozóicas envolvendo núcleos arqueanos restritos, variavelmente retrabalhados no Ciclo Brasileiro. Rochas juvenis atribuídas a um arco magmático continental formado em *c.* 620 Ma estão preservadas no batólito Santa Quitéria, situado no Ceará Central (Fetter *et al.*, 2003). Na sub-província Meridional predominam rochas neoproterozóicas, incluindo faixas metavulcanosedimentares distais, sucessões pelito-carbonáticas marginais e bacias molássicas. A Zona Transversal, por sua vez, consiste de unidades tectônicas cronologicamente distintas justapostas por zonas de cisalhamento. O magmatismo brasileiro neste setor é diacrônico, sendo reconhecidos três estágios principais: 650-625 Ma, 580-570 Ma e 545-520 Ma (Brito Neves *et al.*, 2003).

1.3.1 A ZONA TRANSVERSAL

A Zona Transversal é formada por domínios crustais alongados na direção NE-SE com características geológicas próprias. De leste para oeste esses domínios foram denominados: Rio Capibaribe, Alto Moxotó, Alto Pajeú e Cachoeirinha, individualizados principalmente com base em dados geocronológicos (U-Pb em zircão), isotópicos (especialmente Sm-Nd) e

geoquímicos (Van Schmus *et al.*, 1995; Ferreira *et al.*, 1998). Aqui, optamos por designar essas unidades simplesmente como "domínios crustais", evitando o uso do termo "terreno" cuja caracterização e implicações geodinâmicas ainda carecem, no nosso entendimento, de um melhor suporte geológico. Para explicar a integração desses diferentes domínios durante o Ciclo Brasiliano, dois modelos contrastantes têm sido propostos. Tais modelos defendem: (i) a amalgamação de "terrenos" ao longo de uma (paleo)margem convergente e dispersão durante a deformação transcorrente brasiliana (Santos, 1996; Brito Neves *et al.*, 2000), ou (ii) a colagem de blocos no Paleoproterozóico e posterior retrabalhamento, em um cenário intraplaca, pela deformação brasiliana (Neves, 2003). Foge do escopo desta monografia qualquer discussão sobre validade ou não desses modelos, devendo o leitor buscar as referidas citações e outras contidas nestas para conhecimento do assunto.

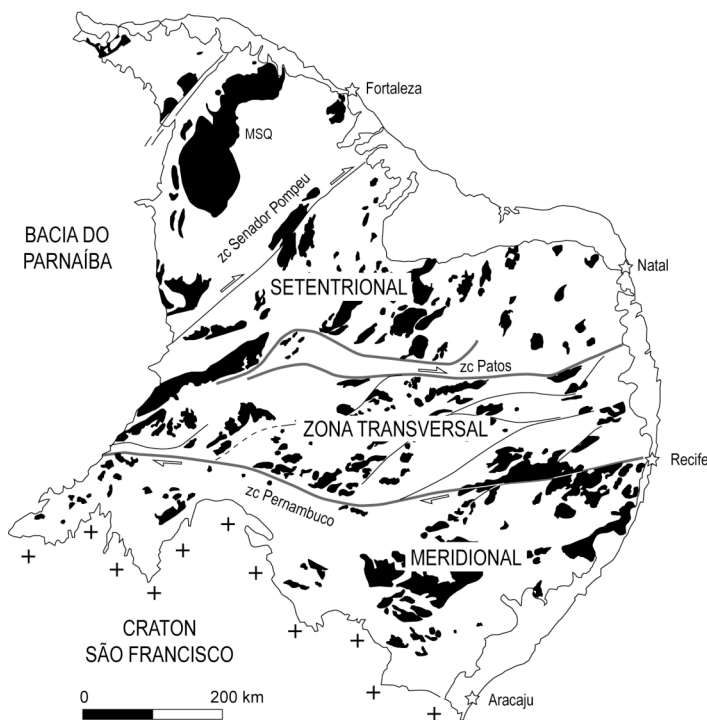


Figura 1. A Província Borborema (NE do Brasil) com ênfase para o plutonismo neoproterozóico-cambriano (em preto) e as principais zonas de cisalhamento brasilianas. Em branco é representado todo o conjunto de litotipos que constituem o embasamento dos plútons granitóides em destaque. Os lineamentos estruturais Patos e Pernambuco constituem os limites para as três sub-províncias: Setentrional (a norte de Patos), Meridional (a sul de Pernambuco) e Zona Transversal, entre Patos e Pernambuco.

MSQ - Maciço Santa Quitéria.

1.3.1.1 O Domínio Rio Capibaribe

Situado entre a zona de cisalhamento Congo-Cruzeiro do Nordeste e Lineamento Leste-Pernambuco (Fig. 2), o Domínio Rio Capibaribe é constituído por: (i) rochas ortoderivadas paleoproterozóicas que constituem o complexo de embasamento Pão de Açúcar (U/Pb zircão c. 2,15-2,04 Ga; Accioly, 2000; Neves *et al.*, 2006), (ii) metaplutônicas

mesoproterozóicas que compõem as serras de Taquaritinga (c. 1,57 Ga, em Sá *et al.*, 2002) e Passira (c. 1,74 Ga, em Accioly, 2000), e (iii) metapelitos do Complexo Surubim (idade mínima para a deposição em c. 750 Ma; Neves *et al.*, 2006). Todas essas unidades são intrudidas por um conjunto de plútons de natureza e idades distintas, o qual inclui: (i) o plúton granítico de Timbaúba, situado no contato com a zona de cisalhamento Congo-Cruzeiro do Nordeste, e (ii) plútons graníticos de composição calcioalcalina-(alto K) a alcalina (p.ex., Bom Jardim, Toritama), e grandes batólitos que se distribuem ao longo do segmento leste do Lineamento Pernambuco (p.ex., Caruaru-Arcoverde, Fazenda Nova). O plúton de Timbaúba apresenta idade relativamente precoce, em torno de 645 ± 5 Ma, enquanto que o magmatismo calcioalcalino potássico é bem mais jovem, entre c. 592 Ma (Bom Jardim) e c. 588 Ma (Fazenda Nova) (Guimarães *et al.*, 2004). Idades modelo Sm-Nd nos plútons da série calcioalcalina potássica variam de 1,94 a 2,06 Ga, com $\epsilon\text{Nd}(0)$ fortemente negativo, tipicamente < -20 .

1.3.1.2 O Domínio Alto Moxotó

Rochas gnáissicas de alto grau predominantemente paleoproterozóicas (Complexos Floresta e Sertânia) ocorrem a oeste do Domínio Rio Capibaribe, estando agrupadas no Domínio Alto Moxotó (Fig. 2). As idades de formação desses ortognaisses situam-se entre 2,15-2,20 Ga, enquanto idades-modelo Sm-Nd estão predominantemente agrupadas entre 2,1 e 2,7 Ga, com $\epsilon\text{Nd}(0)$ fortemente negativo (Fig. 3a; Brito Neves *et al.*, 2005). Esse domínio é pervasivamente intrudido por plútons graníticos, com idades c. 575 Ma (p. ex., Serra Branca, Serra Redonda, Queimadas; Almeida *et al.*, 2002; Guimarães *et al.*, 2004; Archanjo *et al.*, 2008), e ainda por um importante cortejo de rochas cambrianas de idades compreendidas entre 545-535 Ma, que incluem gabros (Uruçu, Jabitacá ?), plútons e *stocks* graníticos (Prata, Serra do Velho Zuza, Pereiro) e diques de dacito e diabásio (Sumé, Monteiro) (Guimarães *et al.*, 2004; Hollanda *et al.*, 2007). Idades modelo Sm-Nd de alguns desses corpos intrusivos (Serra Branca, Prata, Serra do Velho Zuza, Uruçu) agrupam-se entre 2,04-2,5 Ga com $\epsilon\text{Nd}(0) \geq -23$. Esses dados são indicativos de contaminação do magma pela encaixante regional e/ou origem a partir da fusão de fonte (manto-crosta) paleoproterozóica. O limite entre os domínios Alto Moxotó e Alto Pajeú a oeste é impreciso, podendo estar representado em parte pelas zonas de cisalhamento de Afogados da Ingazeira (oeste) e São José dos Cordeiros (norte).

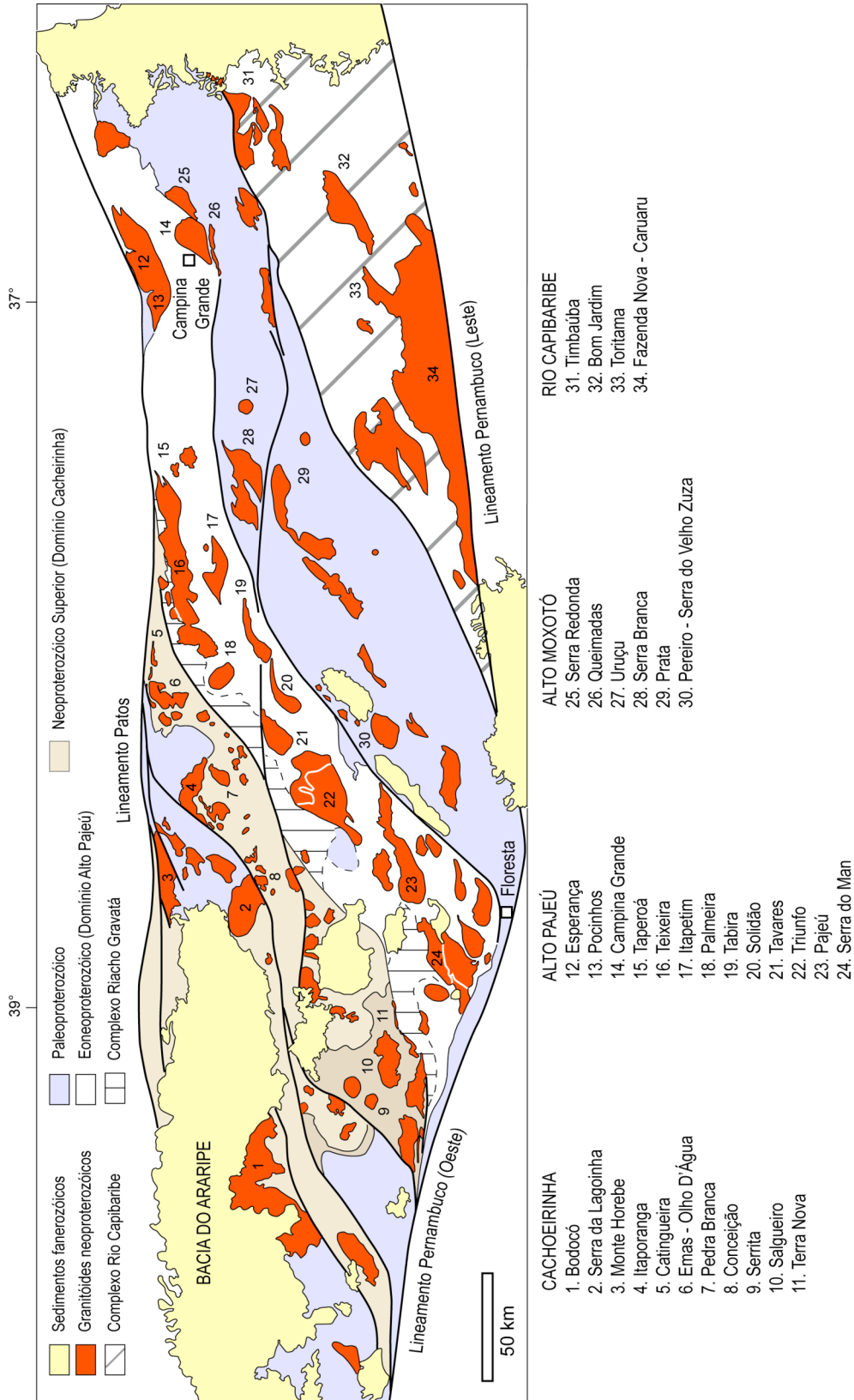


Figura 2. Mapa geológico simplificado da Zona Transversal. Os números representam os plútons neoproterozoicos reconhecidos (os nomes regionais estão listados abaixo, de acordo com sua localização em cada um dos domínios crustais que definem esta su-provincia).

Ortognaisses paleoproterozóicos também afloram no extremo oeste da Zona Transversal, e são reconhecidos informalmente como Complexo São José de Caiana-Piancó. Em São José de Caiana ocorrem ortognaisses granodioríticos com idade de 2250 ± 24 Ma (U-Pb em zircão; Kozuch, 2003). Idades-modelo Sm-Nd agrupam-se entre 2,4-2,7 Ga e, como no Domínio Alto Moxotó, estão associadas a valores $\epsilon\text{Nd}(0)$ fortemente negativo (Fig. 3b; Kozuch, 2003). Próximo à cidade de Piancó afloram ortognaisses bandados variavelmente migmatizados de composição granodiorítica a tonalítica, enquanto que a sudoeste ortognaisses granodioríticos e granada-anfibolitos hospedam veios de quarto mineralizados em Au. Idades modelo Sm-Nd desses anfibolitos são semelhantes àquelas obtidas para os ortognaisses de São José de Caiana, em c. 2,2 Ga (R. Caby, com. pessoal, 2002).

Dados isotópicos Sm-Nd e U-Pb no Complexo São José de Caiana-Piancó são consistentes com aqueles encontrados no Complexo Caicó, situado a norte do Lineamento Patos, podendo indicar uma origem comum para essas unidades.

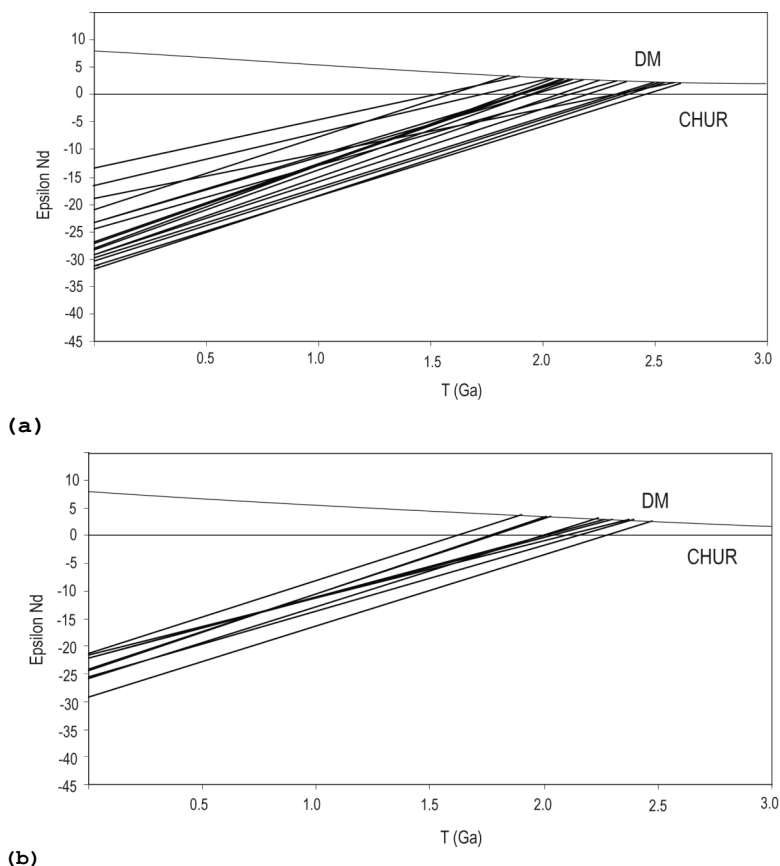


Figura 3. Diagrama de evolução isotópica do Nd para as rochas paleoproterozóicas da Zona Transversal correspondendo ao Domínio Alto Moxotó (a) e exposições do embasamento em torno de Serra Talhada (PE), Pocinhos e São José de Caiana (PB) (b). Fonte: Brito Neves et al., 2005.

1.3.1.3 O Domínio Alto Pajeú

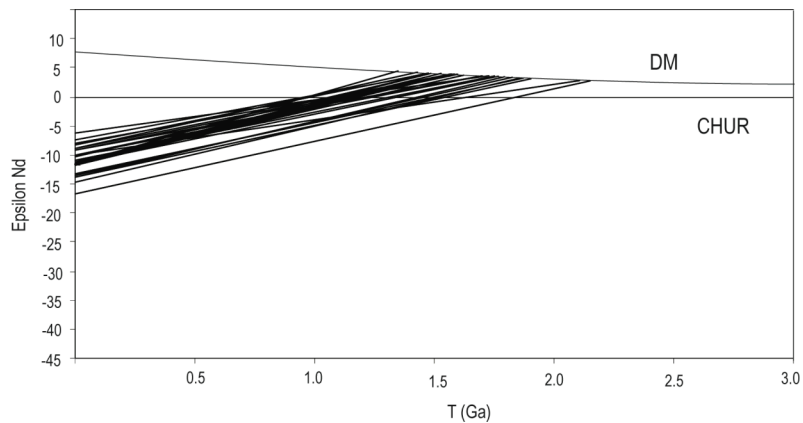
Esse domínio é caracterizado pela presença marcante de metagranitóides (ortognaisses) eoneoproterozóicos (c. 950 Ma; Brito Neves *et al.*, 2001), bem como por diversos batólitos granitóides brasileiros. Está limitado a norte pelo Lineamento Patos, e a sul por rochas do Domínio Alto Moxotó em contato com o Lineamento Pernambuco (Fig. 2). Seu contato foi (re)definido a oeste com zona de cisalhamento da Serra do Cabloco (Medeiros, 2004) que também delimita a ocorrência de metavulcânicas félsicas e máficas intercaladas em metasiliciclásticos denominada 'Complexo Riacho Gravatá'. Esse complexo, datado em c. 1,0 Ga (Bittar, 1998), provavelmente representa o correspondente supracrustal dos metagranitóides eoneoproterozóicos que definem o Domínio Alto Pajeú.

As rochas do domínio Alto Pajeú exibem um comportamento característico quanto à assinatura isotópica Sm-Nd. Idades-modelo dos ortognaisses situam-se entre 2,0-1,5 Ga com $\epsilon\text{Nd}(0)$ negativo, variando tipicamente entre -8 e -14 (Fig. 4a; Brito Neves *et al.*, 2001). Esse padrão isotópico é estreitamente similar àquele do Complexo Riacho Gravatá (Fig. 4b).

Exposições do embasamento paleoproterozóico no interior do domínio Alto Pajeú ocorrem em Serra Talhada (PE), Afogados da Ingazeira (PB) e, possivelmente, nas imediações de Pocinhos (PB). Na região de Serra Talhada, ortognaisses granodioríticos forneceram idade de 2136 ± 14 Ma, enquanto ortognaisses intrusivos em gnaisses bandados do Complexo Afogados da Ingazeira possuem idade c. 2,1 Ga (Kozuch, 2003). Gnaisses migmatíticos a oeste de Pocinhos, por sua vez, apresentaram idades-modelo Sm-Nd mais antigas que 2,2 Ga, com $\epsilon\text{Nd}(0)$ fortemente negativo (Archanjo e Fetter, 2004).

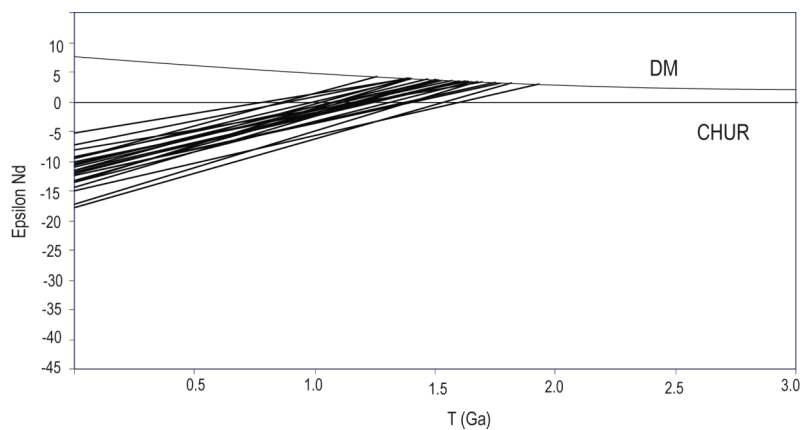
O magmatismo granítico no interior do Domínio Alto Pajeú apresenta idades que variam entre: (i) 650-620 Ma (plútons de Tavares, Itapetim e Tabira), (ii) 591-585 Ma (plútons de Pocinhos, Teixeira e Pajeú) e (iii) 581 Ma (plúton de Campina Grande) (Brito Neves *et al.* 2003; Guimarães *et al.* 2004; Archanjo & Fetter 2004; Archanjo *et al.* 2008). Idades-modelos Sm-Nd desse magmatismo se distribuem em dois grupos distintos. Nos plútons de Campina Grande, Esperança-Pocinhos, Itapetim e Tabira os valores T_{DM} situam-se entre 1,4-2,0 Ga, com $\epsilon\text{Nd}(0) < -15$ (Archanjo e Fetter, 2004; Guimarães *et al.*, 2004), sugestivos de processos de contaminação do magma com a encaixante regional. O segundo grupo compreende granitos com idades-modelo mais antigas que 2,0 Ga, associadas a valores de $\epsilon\text{Nd}(0) < -20$, semelhante àqueles observados no embasamento paleoproterozóico. Todos esses plútons, conjuntamente com representantes

do magmatismo ultrapotássico-peralcalino (ver ítem 3.1.5, adiante) estão reunidos no chamado 'Alto de Teixeira-Terra Nova' (Brito Neves *et al.*, 2005).



(a)

Figura 4. Diagrama de evolução isotópica do Nd para ortognaisses do Domínio Alto Pajeú (a) e metasedimentos e metavulcânicas do Complexo Riacho Gravatá (b). Fonte: Brito Neves *et al.*, 2005.



(b)

1.3.1.4 O Domínio Cachoeirinha

Consiste basicamente de metasedimentos siliciclásticos finos, de médio a baixo grau metamórfico (o Terreno Piancó-Alto Brígida de Brito Neves *et al.*, 2000), limitados a leste pela Zona de Cisalhamento da Serra do Cabloco (Medeiros, 2004), e a oeste recobertos pela Bacia do Araripe (Fig. 2). A faixa central, balizada por essa estrutura, é subdividida em duas unidades principais: as formações Serra do Olho D'Água e Santana dos Garrotes. A primeira é constituída por metapelitos e metarenitos que gradam lateralmente para metaconglomerados polimícticos/polimodais, interpretados como depósitos turbidíticos proximais. Os clastos dos metaconglomerados variam de seixos a matações (comprimento maior entre 0,5 cm a 1 m) de quartzo, filito, metarenito, fragmentos de rochas vulcânicas intermediárias e máficas, metacalcário, *augen* gnaisse e

metagranitóides, cuja fonte presumida seria o Complexo Riacho Gravatá (Medeiros, 2004). A Formação Santana dos Garrotes consiste de metaturbiditos areno-argilosos com algumas metagrauvas e formações ferríferas contendo, ainda, intercalações localizadas de metavulcânicas bimodais. Dados inéditos de zircões detríticos extraídos de metaturbiditos arenosos indicam que a unidade foi depositada durante o Neoproterózoico (W. R. Van Schmus, com. pessoal, 2006).

Idades-modelo Sm-Nd dos metapelitos e metavulcânicas da Formação Santana dos Garrotes situam-se tipicamente entre 1,0-1,4 Ga, com $\epsilon_{Nd}(0) > -12$ (Fig. 5; Brito Neves *et al.*, 2005). Esses dados indicam que o suprimento de material clástico para o preenchimento da bacia contou com áreas-fonte relativamente jovens, provavelmente material eoneoproterozóico (e até mesmo mais jovens) do Domínio Alto Pajeú.

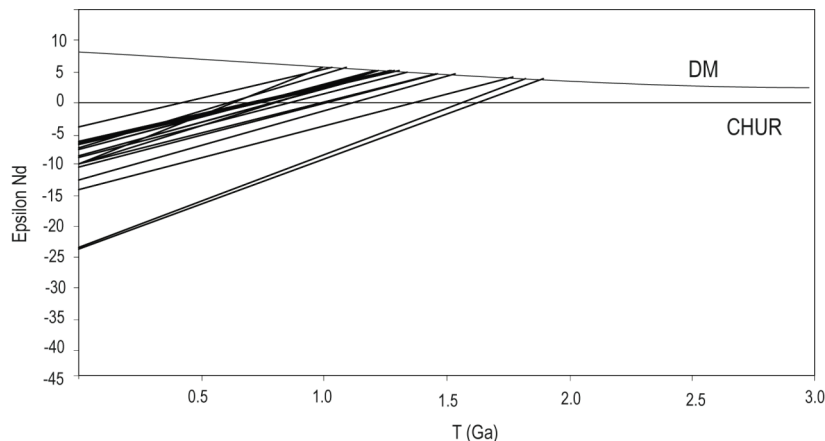


Figura 5. Diagrama de evolução isotópica do Nd para as rochas metasedimentares do Domínio Cachoeirinha. Fonte: Brito Neves *et al.*, 2005.

Plútons granitóides de afinidade calcioalcalina (tipo Conceição), calcioalcalina potássica (tipo Itaporanga) e peralcalina (tipo Catingueira) (Sial, 1986; Ferreira *et al.*, 1998), intrudem o Domínio Cachoeirinha. O magmatismo calcioalcalino consiste de granodioritos, tonalitos e dioritos-gabros constituindo, tipicamente, *stocks* sub-circulares a elípticos encaixados nos metapelitos. Datações U/Pb em zircão em alguns desses corpos forneceram idades de 608 ± 8 Ma (granodiorito de Emas-Olho D'Água) e 619 ± 9 Ma (gabro Alto Vermelho), ambas publicadas em Kozuch (2003), e 635 ± 9 Ma (granodiorito de Conceição; Brito Neves *et al.*, 2003).

O magmatismo calcioalcalino potássico está restrito à borda ocidental da paleobacia Cachoeirinha, sendo os corpos melhor estudados aqueles de Bodocó, Serra da Lagoinha e Itaporanga. Consistem de granitos porfiríticos grossos, com anfibólio e biotita, frequentemente associados a monzonitos e dioritos. Feições de mistura de magmas e formação de

rochas híbridas são comuns nesses plútons. Em termos cronológicos, esse magmatismo parece ser mais jovem que o calcioacalino, com idade c. 580 Ma. Seu melhor representante, o batólito de Itaporanga, situado ao longo do contato entre os metapelitos e o embasamento paleoproterozóico, possui idade U/Pb de 584 ± 2 Ma (Brito Neves et al., 2003).

1.3.1.5 O magmatismo ultrapotássico a peralcalino

Granitos e sienitos peralcalinos formam corpos plutônicos e subvulcânicos intrusivos notadamente no Domínio Alto Pajeú, bem como ao longo de zonas de cisalhamento que recortam a Zona Transversal (Fig. 2). Suas composições variam de ultrapotássica (plútons Serra do Man e Triunfo), peralcalina ultrapotássica (plútons da Serra do Casé e Serra do Livramento, diques de Manaíra) a peralcalina (plúton de Cacimbas, diques de Serrita e Terra Nova, Serra do Pico, Serrote das Duas Irmãs e Serrote do Paulo). Tipos peralcalinos de ocorrência mais restrita são igualmente cartografados nos domínios Cachoeirinha (diques do Riacho Santo Antônio, Catingueira, Tigre) e Rio Capibaribe (diques Moderna). Uma revisão atualizada da caracterização geoquímica do magmatismo na Zona Transversal pode ser encontrado em Guimarães et al. (2004) e Ferreira et al. (2004).

Os plútons de Triunfo e Serra do Man são exemplos típicos do magmatismo ultrapotássico da Zona Transversal. A mineralogia é bastante homogênea, consistindo basicamente de microclina pertítica e egirina-augita. O anfibólio, predominantemente da série richterita-winchita, ocorre substituindo parcialmente o piroxênio. Titanita, apatita, quartzo, e ocasionalmente magnetita, são os acessórios principais. No sienito de Triunfo ocorrem finos diques piroxeníticos sin-plutônicos consistindo basicamente de egirina-augita, e xenólitos ultramáficos contendo predominantemente piroxênio (diopsídio-salita) e, subordinadamente, Fe-flogopita (até 20% em volume). As relações de campo indicam que os diques sin-plutônicos e o sienito hospedeiro teriam se formado por processos de imiscibilidade a partir de um magma máfico sienítico (Ferreira et al., 1994). Os xenólitos ultramáficos, por sua vez, seriam derivados de um manto litosférico metasomatizado, o qual constituiria a fonte do magma sienítico que formou os plútons de Triunfo e Serra do Man (Ferreira et al., 1994; Ferreira et al., 2002). Idades Rb-Sr (rocha total) nesses plútons situam-se, respectivamente, entre c. 580-570 Ma, com razões isotópicas $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ iniciais da ordem de 0,710. As idades modelo Sm-Nd correspondentes são próximas a 2,4 Ga, com $\epsilon\text{Nd}(0) < -22$ (Brito Neves et al., 2005).

Os tipos peralcalinos na Zona Transversal variam preferencialmente entre composições sienograníticas a sieníticas, contendo egirina-augita e anfibólio azul (riebeckita) como máficos essenciais (Ferreira *et al.*, 1998). No complexo anelar de Serrita os diques variam de egirina-quartzo sienito a sienogranito. Anfibólio azul, substituindo parcialmente o piroxênio, titanita e apatita são os principais acessórios. Essa mesma assembléia mineralógica também foi encontrada em corpos quartzo-monzoníticos, como o plúton de Cacimbas e o dique da Serra do Pico, ambos inseridos no batólito granítico de Teixeira de c. 590 Ma (Archanjo *et al.*, 2007) (Fig. 2). O plúton de Cacimbas está limitado a leste pela Zona de Cisalhamento de Itapetim. Seu limite oriental com o batólito de Teixeira não é bem definido exceto pela presença, no batólito, de Fe-hastingsita como máfico principal e ausência de egirina-augita (Archanjo *et al.*, 2008). O "dique" da Serra do Pico está encaixado na zona de cisalhamento de Taperoá, que por sua vez limita a borda oriental do batólito de Teixeira.

CAPÍTULO 2 – O ENXAME DE DIQUES DE MANAÍRA: ASPECTOS DE CAMPO E GEOCRONOLOGIA

2.1 INTRODUÇÃO

O enxame de diques sieníticos de Manaíra aflora cobrindo uma área de aproximadamente 60 km² limitada a norte pelos milonitos verticais da Zona de Cisalhamento de Juru-Belém e a sul-leste pelas cidades de Manaíra, Princesa Isabel e Tavares (PB) (Fig. 6). De ocorrência bem mais restrita, alguns diques também são mapeados próximos à cidade de Serra Talhada (PE), mas desaparecem no polígono circunscrito por esta cidade e aquelas de Triunfo e Flores, também em Pernambuco.

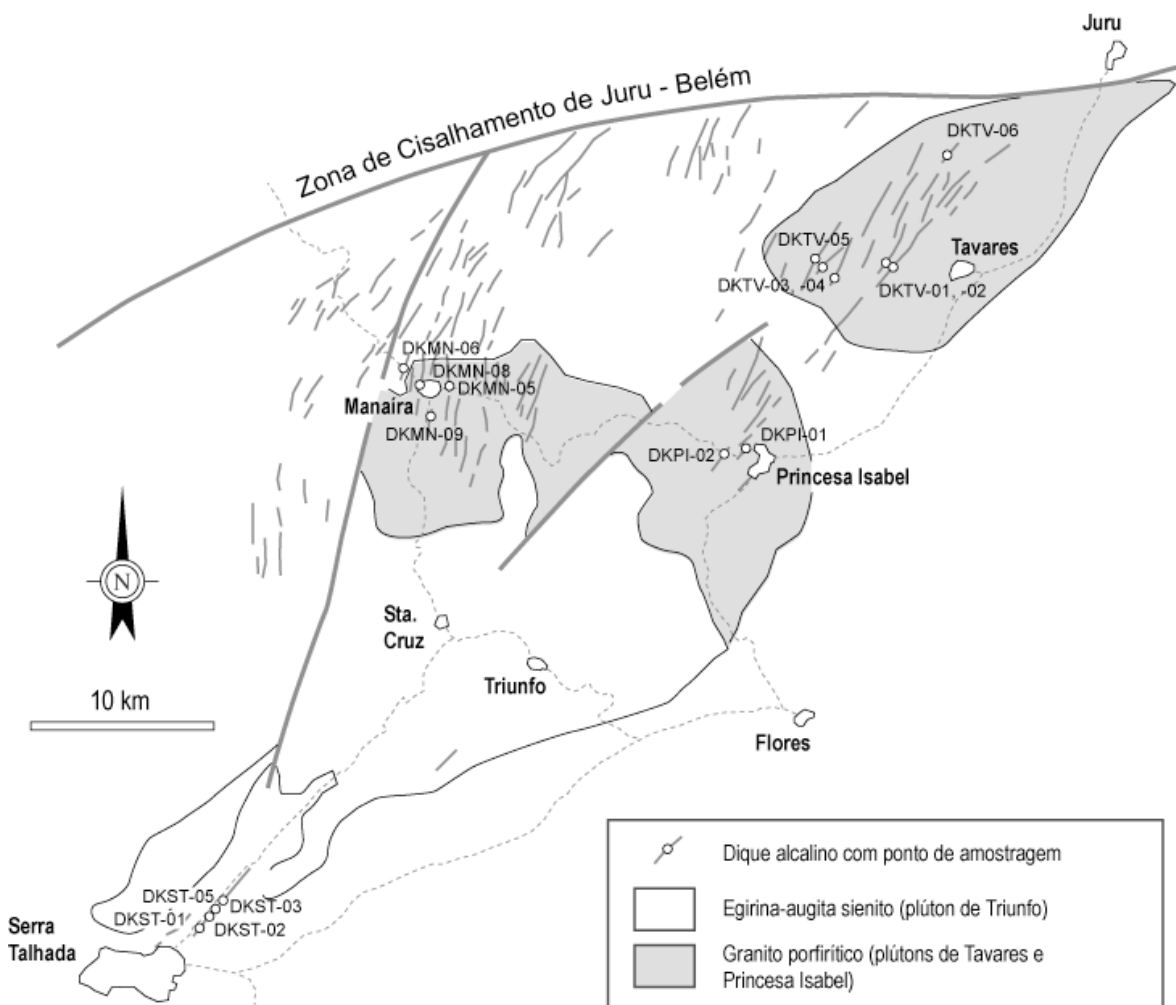


Figura 6. Mapa esquemático ilustrando as relações espaciais entre os diques e suas encaixantes - os plútons de Triunfo, Princesa Isabel e Tavares, e sua distribuição com respeito à Zona de Cisalhamento de Juru-Belém. A numeração de campo refere-se às localidades onde cada amostra foi coletada (MN - Manaíra, PI - Princesa Isabel, ST - Serra Talhada e TV - Tavares).

O estudo de imagens de satélite LANDSAT vinculado a *check* de campo permitiu caracterizar cerca de uma centena de diques, cuja expressão distintiva é o alinhamento (semi)contínuo de altos topográficos alinhados segundo a direção NE-SW (Fig. 7), com variações locais para N-S a sudoeste de Manaíra. Todavia, em campo fica evidente que nem sempre os diques encontram-se associados à cristas do relevo regional. Em Tavares e Princesa Isabel, por exemplo, os diques estão arrasados e destacam-se da encaixante granítica (os plútons homônimos) pela cor mais escura (Fig. 8). As relações de intrusão com o sienito de Triunfo não são diretamente observadas. Aparentemente os diques não afetam esse plúton que, por sua vez, é intrusivo no granito porfirítico de Princesa Isabel. Por essas relações e semelhanças mineralógicas, o magmatismo sienítico de Triunfo e o enxame de diques de Manaíra são considerados um evento magmático único (Sial e Ferreira, 1986, 1988).

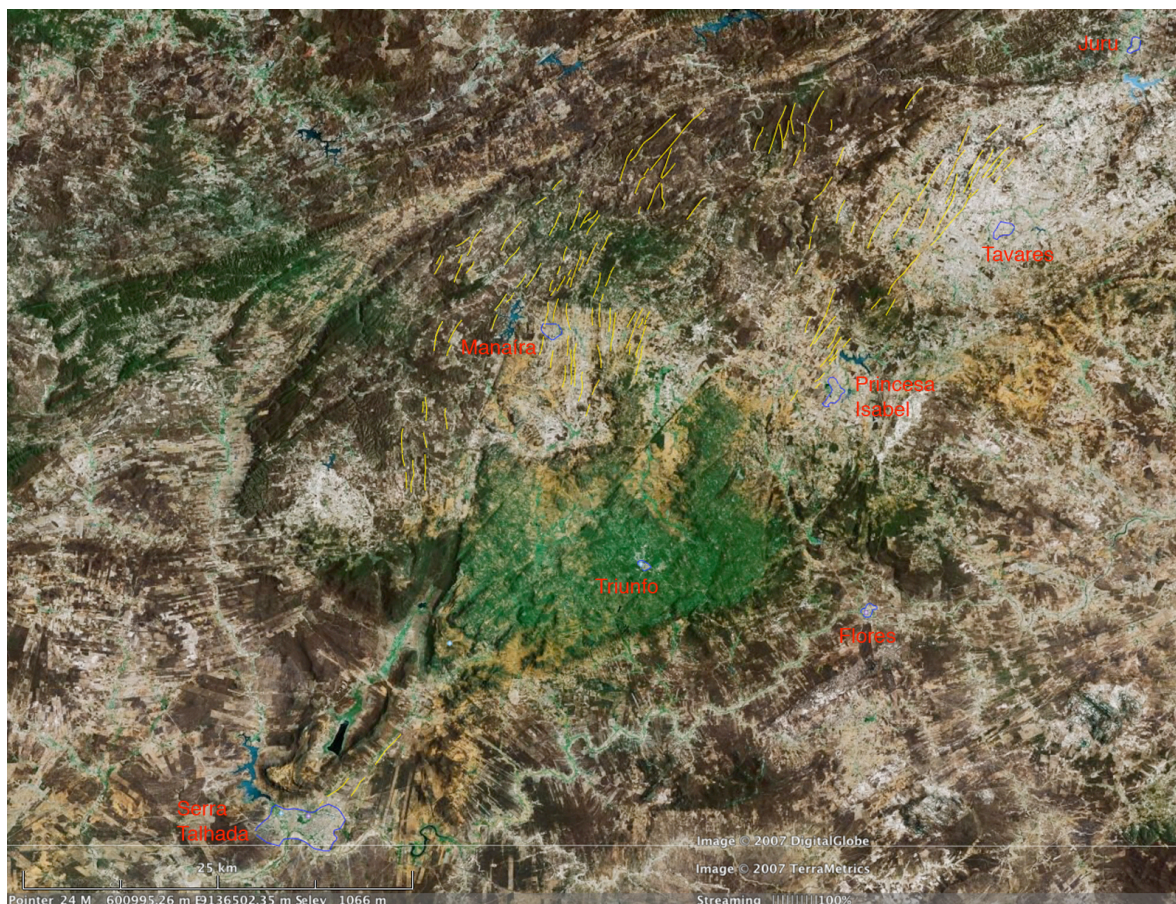


Figura 7. Imagem de satélite LANDSAT mostrando a área representada pela intrusão sienítica de Triunfo (verde), e granitos de Princesa Isabel e Tavares (branco). Em amarelo, destacam-se os inúmeros diques cartografados, os quais nem sempre estão associados a altos topográficos. A estimativa de aproximadamente uma centena de diques é, portanto, conservadora.

2.2 ASPECTOS DE CAMPO

Os diques sieníticos de Manaira são macroscopicamente maciços, normalmente com granulação fina e contatos sub-verticais bem definidos com a encaixante. Diques com textura porfirítica fina são encontrados em Tavares e a norte de Princesa Isabel. As larguras são variáveis, desde uma dezena de centímetros até algumas dezenas de metros, sendo a média entre 1-3 metros. O comprimento dos diques foi estimado através da observação direta em campo nos afloramentos amostrados e imagens de satélite; eles variam de algumas dezenas de metros a alguns quilômetros.



(a)



(b)

Figura 8. Diques de direção NE-SW encaixados nos granitos porfiríticos de Princesa Isabel (a) e Tavares (b).

Os diques cortam tanto os granitos porfiríticos de Princesa Isabel e Tavares e suas estruturas magmáticas, bem como a foliação/bandamento metamórfico de baixo grau do Complexo Riacho Gravatá (Fig. 9a). No contato com essas encaixantes frequentemente desenvolvem uma margem resfriada de alguns centímetros de largura, indicando colocação em nível crustal raso (Fig. 9b, c). O estudo detalhado de uma dessas feições em dique intrusivo nos metasedimentos finos do Complexo Riacho Gravatá mostrou a presença de fenocristais de K-feldspato e egirina-augita imersos em uma matriz muito fina, que engloba fragmentos da rocha encaixante. No centro do dique, entretanto, a textura torna-se mais grossa. O conjunto é cortado por microfissuras preenchidas por quartzo e calcita. Não foram observadas reações metamórficas no contato dique-encaixante.



(a)



(b)



(c)

Figura 9. Relações de campo dos diques de Manaíra: **(a)** contato entre um dique e metassedimentos de baixo grau metamórfico; **(b, c)** bordas resfriadas no contato do dique com o granito de Tavares, em **b**, e metassedimentos do Complexo Riacho Gravatá, em **c**.

2.3 GEOCRONOLOGIA

Um dos aspectos inéditos deste projeto foi a determinação precisa da idade do enxame de diques de Manaíra e, por conseguinte, do magmatismo peralcalino que afeta a Zona Transversal. Dois métodos foram escolhidos para obtenção desse dado: o método U/Pb SHRIMP em zircão e o método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ em anfibólio. Para o primeiro foi escolhido um dique que aflora próximo à cidade de Manaíra (amostra 05DKMN-02), sendo que cerca de 23 grãos foram selecionados para análise pontual no SHRIMP II da Australian National University. Para a datação $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ foi selecionado um dique intrusivo no granito de Tavares (05DKTV-2A), tendo em vista a presença mais expressiva de anfibólio modal nesta amostra. Os dados são apresentados individualmente, abaixo.

2.3.1 GEOCRONOLOGIA U/PB SHRIMP

2.3.1.1 *Procedimento analítico*

A análise U/Pb dos zircões da do dique 05DKMN-02 foi realizada na microsonda iônica SHRIMP II, na Research School of earth Sciences, Australian National University. Um concentrado de minerais pesados (dominantemente zircão e apatita) foi extraído da amostra e purificado em lupa binocular para separação de aproximadamente 100 zircões. Esses foram dispostos sobre disco de resina epoxy (*mount*), com diâmetro em torno 2,5 cm, juntamente com outras amostras e os padrões de calibração de concentração de U e Th (SL13) e razões isotópicas/idade ($TEM^{206}Pb^*/^{238}U = 416,75 \pm 0,24 \text{ Ma}$).

Microscopia de luz refletida e transmitida, bem como imageamento por catodoluminescência foram utilizadas para investigar as estruturas internas dos cristais antes das análises propriamente ditas. Esta etapa permitiu definir sítios mais propícios (livres de inclusões e imperfeições estruturais), garantindo maior precisão e qualidade à análise.

Em linhas gerais, a análise U/Pb SHRIMP consiste na medição das abundâncias dos isótopos de urânio, tório e chumbo, por meio da incidência de um feixe de íons primários (diâmetro *c.* 30 μm) sobre o grão, permitindo a análise pontual em uma determinada região do grão. Uma quantidade do material (íons metais simples e espécies moleculares) é ionizada e introduzida no espectrômetro para análise. No espectrômetro, o feixe de íons secundários (amostra) passa por um analisador eletrostático que consiste de duas placas de alumínio as quais é aplicada uma energia potencial constante que irá separar os íons em termos de sua energia. A partir daí, os íons passam por um setor magnético onde eles são filtrados de acordo com suas massas e, então, medidas.

Os dados medidos no SHRIMP foram tratados no software estatístico SQUID 1.00 (Ludwig, 2000), de acordo com os procedimentos descritos em Williams e Claesson (1987) e Compston *et al.* (1992). As representações gráficas dos dados foram geradas no programa Isoplot 3.00/Excel (Ludwig, 2003).

2.3.1.2 *Resultados*

A análise da população de zircões presentes no dique 05DKMN-02 mostrou ampla diversidade temporal, com grãos de idades paleo-, meso- e

neoproterozóica (Fig. 10a). A população mais antiga inclui zircões com idades $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ entre 1,86-2,39 Ga, a grande maioria com algum grau de discordância (ver Tabela 1). Dois grãos definem um pequeno grupo com idades c. 920-940 Ma, enquanto um terceiro grupo em c. 600 Ma reúne 4 grãos sendo um deles concordante em ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$) $603,6 \pm 3,9$ Ma (Fig. 10b). Por fim, duas análises fortemente discordantes plotam próximas a 540 Ma.

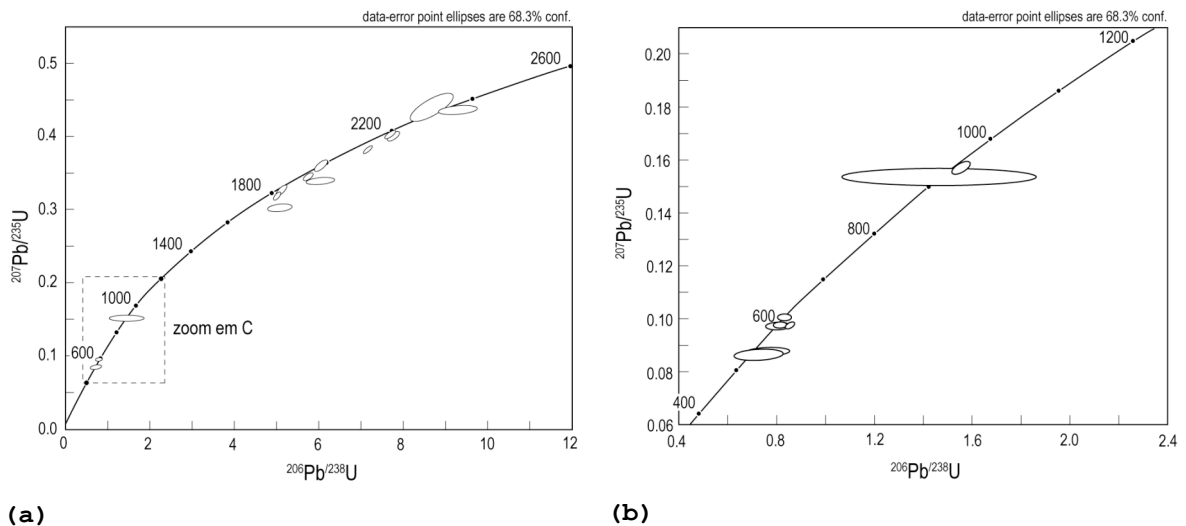


Figura 10. Diagrama Concórdia Wetherhill ilustrando o plote das populações de zircões analisados do dique 05DKMN-02 **(a)**. À direita, um zoom da parte inferior do diagrama, com ênfase para as populações mais jovens **(b)**.

A distribuição relativa das análises é mostrada no histograma da Figura 11. A representatividade individual dos grupos individualmente é baixa. Grãos paleoproterozóicos certamente foram herdados quando da ascensão dos diques, uma vez que as relações de campo mostram claramente sua intrusão tardia com respeito às estruturas dúcteis que afetam o embasamento regional. Embora não exatamente aflorando nas proximidades da área de ocorrência dos diques, rochas mesoproterozóicas podem ter sido a fonte potencial dos zircões c. 930 Ma. A exclusão desses dois grupos mais antigos leva-nos a considerar os dois grupos de idades neoproterozóica e cambriana como sendo aquelas que mais provavelmente representam a idade desse magmatismo, inclusive por considerar as relações de intersecção observadas em campo.

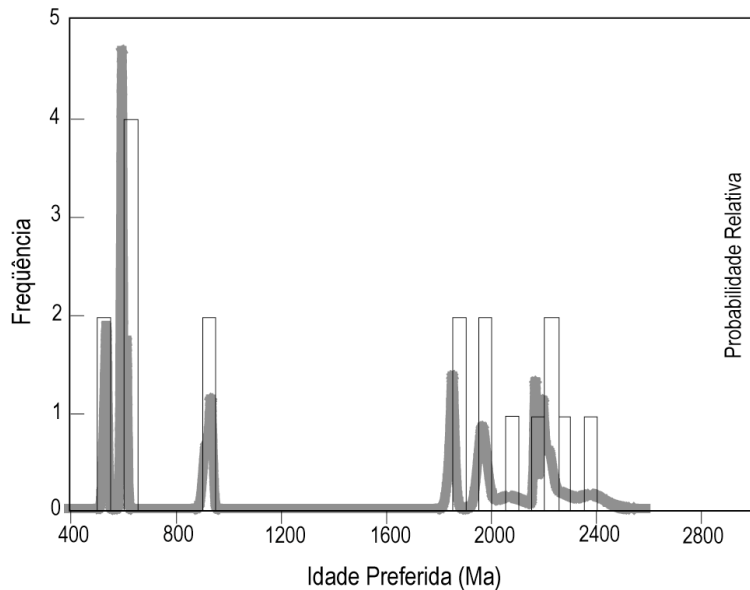


Figura 11. Histograma de probabilidade das populações de zircão analisadas no dique 05DKMN-02.

O grupo de idades cambrianas é representado, na verdade, por apenas duas análises (spots 3.1 e 5.1) fortemente discordantes (Tabela 1), com idades $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$ c. 540 Ma e erros bastante elevados para as idades $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$. A qualidade analítica do dado fornecido pelo grão/spot 5.1 é ainda prejudicada face ao alto conteúdo de Pb comum medido. Essas características sugerem que os dois grãos podem representar zircões mais antigos, parcialmente resetados durante evento posterior à sua formação.

Por sua vez, o grupo de idades neoproterozóicas é representado por quatro análises (spots 1.1, 14.1, 18.1 e 19.1) com idades preferencialmente em c. 600 Ma (Tabela 1). Dessas, apenas o grão 14.1 é fortemente discordante, muito embora os grãos 1.1 e 18.1 mostrem pequeno grau de discordância e, este último, com idade $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$ discretamente mais elevada que o conjunto dos demais três grãos. Todavia, a indiscutivelmente excelente qualidade analítica do dado fornecido pelo grão/spot 19.1, concordante, valida a informação cronológica do conjunto. Apesar de estatisticamente pouco representativa, o resultado em c. 600 Ma parece ser a mais provável idade desse importante magmatismo fissural. Para confirmar essa indicação, foram datados grãos de anfibólio de um dique do sub-enxame Tavares pelo método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$. Considerando que os aspectos de campo apontam para intrusão em nível crustal raso, as condições de resfriamento devem ter sido rápidas o suficiente para aproximar a temperatura de fechamento do sistema Ar-Ar nos anfibólios à idade de cristalização.

Spot	% ²⁰⁶ Pb _c	U ppm	Th ppm	²⁰⁶ Pb* ppm	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U (1)	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb (1)	% Disc	²⁰⁷ Pb*/ ²⁰⁶ Pb* (1)	±%	²⁰⁷ Pb*/ ²³⁵ U (1)	±%	²⁰⁶ Pb*/ ²³⁸ U (1)	±%	corr
1.1	1.85	320	184	27.4	600.9 ±4.6	588 ±83	-2	0.0596	3.8	0.803	3.9	0.0977	0.8	.21
2.1	3.11	374	110	101	1710 ±15	1978 ±59	14	0.1215	3.3	5.09	3.5	0.3038	1	.30
3.1	3.37	178	82	14	545.7 ±5.3	693 ±160	21	0.0626	7.5	0.762	7.5	0.0883	1	.13
4.1	9.32	1222	333	179	923 ±11	890 ±370	-4	0.069	18	1.46	18	0.1539	1.3	.07
5.1	14.09	265	133	23.1	537.2 ±6.9	621 ±180	13	0.0605	8.4	0.725	8.5	0.0869	1.3	.16
6.1	0.07	358	184	117	2086 ±14	2178 ±5.6	4	0.1361	0.3	7.168	0.9	0.382	0.8	.93
7.1	0.08	373	67	105	1825 ±19	1858 ±14	2	0.1136	0.8	5.126	1.4	0.3273	1.2	.85
8.1	0.19	173	76	60	2176 ±15	2228 ±15	2	0.1401	0.9	7.756	1.2	0.4016	0.8	.68
10.1	0.11	139	71	48.4	2187 ±16	2205 ±7.9	1	0.1382	0.5	7.695	0.9	0.4038	0.9	.88
11.1	0.29	174	77	23.6	942.7 ±7.1	966 ±24	2	0.0713	1.2	1.548	1.4	0.1575	0.8	.57
12.1	0.10	278	65	76.4	1788 ±11	1863 ±7.8	4	0.1139	0.4	5.021	0.9	0.3196	0.7	.86
12.2	3.02	310	31	94	1888 ±14	2079 ±58	9	0.1286	3.3	6.03	3.4	0.3404	0.9	.25
14.1	-	299	183	25.2	603.6 ±4.3	711 ±19	15	0.0631	0.9	0.854	1.2	0.0982	0.8	.64
16.1	0.10	136	35	51.2	2336 ±17	2393 ±51	2	0.1542	3	9.29	3.1	0.4368	0.9	.28
17.1	0.19	212	60	66	1989 ±22	1982 ±17	0	0.1217	0.9	6.066	1.6	0.3614	1.3	.79
18.1	1.32	758	72	66.8	621.4 ±4	590 ±37	-5	0.0596	1.7	0.832	1.8	0.1012	0.7	.37
19.1	0.50	861	194	73	603.6 ±3.9	603 ±35	0	0.0599	1.6	0.812	1.8	0.09816	0.7	.39
23.1	1.59	472	286	143	1914 ±12	1971 ±16	3	0.1211	0.9	5.767	1.1	0.3456	0.7	.63
23.2	0.32	41	13	15.7	2353 ±57	2264 ±43	-4	0.1431	2.5	8.69	3.8	0.441	2.9	.76

Erros são 1-sigma; Pb_c e Pb* indicam as porções comum e radiogênica, respectivamente.

Erro na calibração do padrão foi 0.23% (não incluído nos erros acima, mas necessário na comparação de dados dos diferentes mounts).

(1) Pb comum corrigido usando ²⁰⁴Pb medido.

Tabela 1. Dados U/Pb SHRIMP para zircões da amostra DKMN-02.

2.3.2 GEOCRONOLOGIA ⁴⁰Ar/³⁹Ar

2.3.2.1 Procedimento analítico

Assim como em qualquer método de análise isotópica, a obtenção de idades ⁴⁰Ar/³⁹Ar de boa qualidade também requer cuidados no procedimento de seleção dos grãos/fragmentos a serem analisados. O maior cuidado é selecionar minerais livres de quaisquer sinais de alteração secundária, os quais podem fornecer resultados espúrios. O procedimento de separação consistiu em isolar grãos de anfibólio após fragmentação da amostra em pilão de aço, peneiramento para separação de diferentes frações granulométricas, separação magnética, e purificação em lupa binocular. Dados ⁴⁰Ar/³⁹Ar foram obtidos em duas frações, uma fina (60-100 mesh) e outra grossa (25-35 mesh).

O processo de irradiação de amostras para obtenção de idades ⁴⁰Ar/³⁹Ar representa uma etapa fundamental do método, uma vez que é durante esta etapa que é gerado ³⁹Ar (bem como partículas interferentes) a partir do ³⁹K. A transmutação ocorre mediante interação da amostra com um fluxo de neutrons incidente, segundo a reação ³⁹K(n,p)³⁹Ar (+ Q), donde Q = 0,22 MeV. O tempo de irradiação é uma variável estritamente dependente da idade (aproximada) da amostra.

A preparação da amostra para irradiação consistiu na inserção de grãos pré-selecionados de anfibólio (de ambas as frações), distribuídos dentro de orifícios de 2 mm de diâmetro de um disco de alumínio específico. Juntamente com a amostra, foram colocados grãos-padrão de sanidina Fish Canyon para monitorar o fluxo de neutron dentro do reator. O disco foi numerado e fechado com tampa de alumínio apropriada, e individualmente empacotado com papel alumínio. Após isto, o disco é ordenado, juntamente com outros tantos, dentro de um tubo de sílica, o qual é selado e condicionado (por controle remoto) dentro de um *container* de cádmio e levado ao reator. A irradiação foi realizada no reator nuclear Triga da *Oregon State University* (OSU - CLICIT Facility). Para o presente caso, os grãos-amostra foram irradiados seguindo o procedimento de rotina do laboratório UQ-AGES para amostras neoproterozóicas, cujo tempo regular é de 14 horas. Após serem irradiados, os grãos-amostra permaneceram em resfriamento por um período de um mês, e foram então submetidos à análise espectrométrica.

A metodologia $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ pode ser empregada utilizando dois modos operacionais distintos para extração de gás: fusão total e aquecimento gradual (*step-heating*) do mineral ou fragmento de rocha selecionado (Turner 1969; Reynolds e Muecke, 1978; McDougall e Harrison, 1999; Vasconcelos *et al.*, 2002). Uma das desvantagens da análise por fusão total, em comparação com análises por aquecimento gradual, é não fornecer informações sobre as propriedades de retenção de Ar na amostra, presença (ou não) de múltiplas gerações de Ar ou contaminantes, e possíveis sítios de perda ou ganho de Ar e/ou K na amostra. Isso significa que a fusão total seria o modo operacional mais indicado para grãos minerais (não fragmentos de rocha) que apresentem homogeneidade composicional e história termal relativamente simples.

Para os grãos de anfibólio da amostra 05DKTV-2A, o procedimento analítico escolhido foi a extração de gás através de aquecimento gradual, via *laser* de argônio. Nesse procedimento um feixe de *laser* incide sobre a amostra, a uma intensidade conhecida, e permanece interagindo com o material por cerca de 30 segundos. Esse procedimento é repetido várias vezes para o mesmo grão, aumentando-se gradativamente a potência/intensidade do *laser* até que o material sofra fusão completa. Com isto, várias frações de gás são extraídas a temperaturas progressivamente mais altas. A intensidade do *laser* e o número de frações (ou *steps*) a serem analisadas são parâmetros programados antecipadamente à análise.

O sistema de extração do UQ-Ar/Ar Lab está acoplado ao espectrômetro de massa Finnigan MAP-215-50, e consiste essencialmente de

uma linha ultra-alto vácuo *on line* ao longo da qual o gás é purificado antes de ser medido. O gás extraído da amostra é submetido a duas etapas de purificação (*clean up*), que consistem em eliminar outros gases ativos (N_2 , O_2 , CO_2 , H_2 , H_2O , hidrocarbonetos, etc) antes da análise espectrométrica. A primeira etapa de purificação ocorre quando o gás flui através de um tubo de aço inoxidável parcialmente obstruído por uma barreira interna vertical - *cold trap*, refrigerada a $-140^\circ C$ por um sistema criogênico (*cryocooler*) externo. O *cold trap* tem por finalidade trapear (por congelamento) CO_2 , H_2O e outros gases ativos, mas não exatamente impedir a passagem de outros gases nobres junto com Ar. Estes são posteriormente removidos por adsorção dentro de dois aparatos alinhados em série - C-50 SAESTM Zr-V-Fe *getters*, posicionados fisicamente após o *cold finger*, os quais operam respectivamente a $400-500^\circ C$ e a *c.* $25^\circ C$. Após os dois estágios de purificação, o gás Ar é admitido no espectrômetro para análise isotópica. Cada um dos estágios descritos acima, têm duração pré-fixada: 180 e 180 segundos para cada uma das etapas de purificação do gás-amostra, e 45 segundos para a admissão do gás Ar (já purificado) no espectrômetro. A análise do gás Ar extraídos em cada estágio/*step* dura 25 minutos, e consta de 10 ciclos. Cada ciclo representa medidas sistemáticas das massas 40, 39, 38, 37 e 36, sendo que cada uma das massas 40 a 37 é medida 10 vezes, enquanto a massa 36 é medida 25 vezes. O número de repetições está diretamente relacionado à (maior ou menor) abundância natural de cada um dos isótopos. O conjunto de 10 ciclos constitui um *step*, ou seja, uma análise total da fração de gás ionizada; o número de *steps* é definido arbitrariamente para cada amostra, a depender de características tais como idade estimada e % K. Após cada *step*, são efetuadas medidas nas posições 36,5 e 35,8 (*baseline*) para detectar o nível de ruído no equipamento.

Todo o processo descrito acima é totalmente automatizado pelo software *Mass Spec version 7.2* (plataforma Macintosh), desenvolvido especificamente para obtenção e tratamento de dados $^{40}Ar/^{39}Ar$. Os procedimentos analíticos e de automação utilizados nessas análises estão descritos em Deino e Potts (1990), Deino et al. (1990), Vasconcelos (1999) e Vasconcelos et al. (2002). As idades aparentes, calculadas em cada etapa usando-se o fator $J = 0,003686 \pm 0,000014$, foram corrigidas para discriminação de massa, interferências nucleogênicas e contaminação atmosférica. A partir daí, foram construídos os gráficos apropriados (platô) para todos os grãos analisados. Os dados analíticos estão listados no Anexo 1.

2.3.2.2 Resultados

A fração fina é representada pelos grãos 4500-01 e 4500-02 (Fig. 12). O primeiro (Fig. 12a) não define uma idade platô. As características deste espectro sugerem a presença de alteração do anfibólio para uma fase mais rica em potássio, indicada por razões Ca/K menores nas etapas de mais baixa temperatura. O grão 4500-02 define um platô entre os degraus D e I, com idade de 605 ± 6 Ma (Fig. 12b) e idade integrada de 609 ± 7 Ma. Esse resultado é compatível com as idades platôs obtidas para os dois grãos da fração grossa: o grão 4499-01, em 599 ± 4 , e o grão 4499-02, em 606 ± 5 Ma (Fig. 13). As idades integradas dos dois grãos analisados são também fortemente correlacionáveis (608 ± 6 Ma e 619 ± 5 Ma).

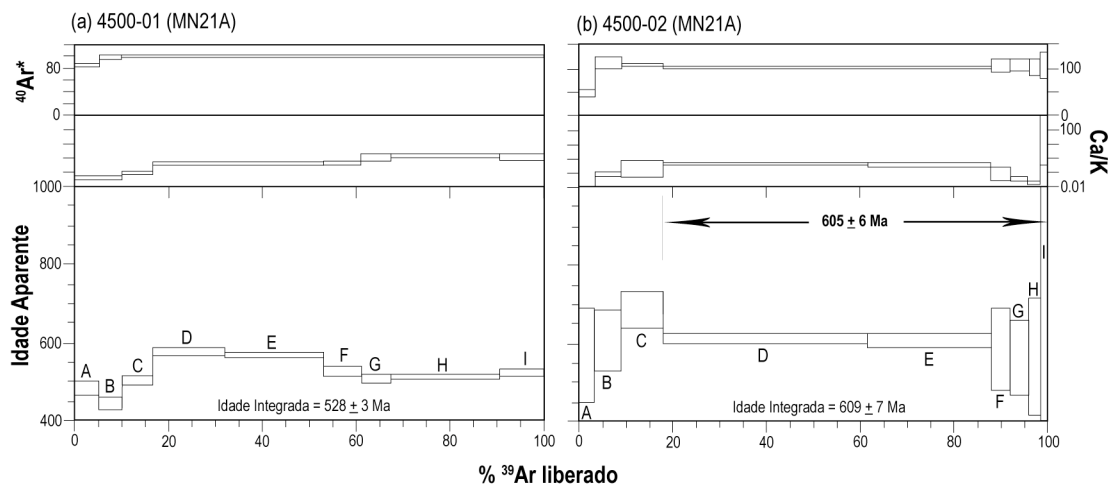


Figura 12. Espectros obtidos a partir das análises $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ por aquecimento gradual a laser para dois grãos de anfibólio (fração fina) da amostra 05DKTV-2A.

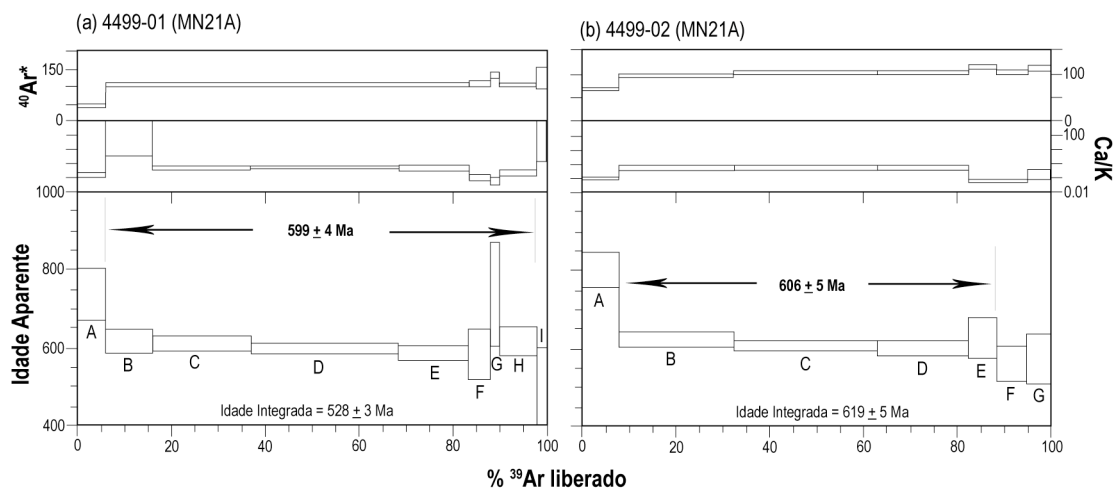


Figura 13. Espectros obtidos a partir das análises $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ por aquecimento gradual a laser para dois grãos de anfibólio (fração grossa) da amostra 05DKTV-2A.

CAPÍTULO 3 – PETROGRAFIA E QUÍMICA MINERAL

3.1 INTRODUÇÃO

Os dados petrográficos macro- e microscópicos de um conjunto de amostras representativas do magmatismo fissural da região de Manaíra e adjacências estão apresentados neste item. As descrições incluem informações sobre as assembléias mineralógicas constituintes, microtexturas e relações entre fases, e classificação modal.

A identificação das fases minerais foi conduzida com base em características ópticas distintivas (pleocroísmo, ângulo $2V$, extinção) e análises químicas pontuais. O estudo de química mineral foi especialmente dedicado aos minerais máficos principais (piroxênio, anfibólio e biotita), muito embora algumas análises tenham sido também realizadas em cristais de K-feldspato, o qual representa a única fase mineral félsica, e volumetricamente mais expressiva nos diques. A composição modal foi estimada pelo método convencional de contagem de pontos, em contador automático SWIFT acoplado ao microscópio petrográfico. Foram selecionadas duas amostras representativas de cada um dos sub-enxames discriminados (Manaíra, Princesa Isabel, Serra Talhada, Tavares), e computados c. 1000 pontos em cada seção delgada. Considerando a homogeneidade composicional dos diques, testamos ainda um método alternativo para estimar a moda que consiste em gerar uma imagem binária da fase máfica a partir da seção delgada (Fig. 14). A comparação dos resultados de cada método, convencional e de imagem, foi satisfatória, motivo pelo qual estendemos o teste alternativo (%félsicos versus %máficos) para todo o conjunto de seções delgadas estudadas (Tabela 2).

Os dados de química mineral foram obtidos por análise pontual em microsonda eletrônica JEOL JXA-8600S, calibrada a partir de padrões reconhecidos internacionalmente. As condições analíticas incluíram: (i) voltagem de aceleração de 15 kV, (ii) corrente 20,1 η A para o feixe de elétrons, (iii) diâmetro de 5 μ m para o feixe de elétrons, (iv) tempo médio de contagem de 15 segundos e (v) correções estatísticas PROZA. As tabelas reunindo todas as análises na forma de proporção de óxidos, cátions e a fórmula estrutural calculada com base em 6 átomos de oxigênios para piroxênio e 23 átomos para anfibólio constam no Anexo 1. A fórmula estrutural para piroxênios foi calculada seguindo as recomendações de Morimoto (1990) e tendo em conta a fórmula química geral: $M_2M_1T_2O_6$, onde M_2 refere-se aos cátions em coordenação octaédrica,

normalmente distorcida; M1 aos cátions em coordenação octaédrica regular, e T aos cátions em coordenação tetraédrica. A proporção Fe^{2+}/Fe^{3+} foi calculada a partir da fórmula de Droop (1987), e o ajuste dessa razão foi obtido fixando-se o cálculo catiônico na base de 6 oxigênios e 4 cátions. A classificação obedeceu às recomendações da IMA (Morimoto, 1990), calculando os diversos parâmetros necessários para os diagramas de classificação. A fórmula estrutural para anfibólios foi calculada seguindo as recomendações de Leake (1997) e obedecendo a fórmula geral $AB_2^{VI}C_5^{IV}T_8O_{22}(OH)_2$, sendo: A=1 sítio por fórmula unitária; B=2 sítios M4 por fórmula unitária; C=5 sítios compostos de 2 M1, 2 M2 e 1 M3 por fórmula unitária; T=8 sítios, em dois grupos de 4; OH=2 sítios por fórmula unitária. O cálculo catiônico foi feito na base de 23 oxigênios assumindo que tenham 2 (OH, Cl, F), tendo em conta a incerteza na quantidade de H_2O na estrutura mineral. A classificação foi feita em diagramas específicos, com limites dos campos estabelecidos para cada um destes.

As fórmulas estruturais das biotitas foram calculadas na base anidra de 22 cargas positivas (o equivalente a 11 oxigênios) seguindo as recomendações de Rieder (1999). A fórmula estrutural geral das micas é expressa como: $IM_{2-3}\square_{1-0}T_4A_2$, onde I é ocupado por K, Na ou Ca, incluindo também Ba, Rb, Cs e NH_4 ; M é ocupado por Li, Fe (di- ou trivalente), Mg, Al ou Ti, podendo também conter Mn (di- ou trivalente), Zn, Cr e V; \square é uma vacância; T é preenchido por Si, Al ou Fe (trivalente), incluindo também Be ou B; A é ocupado por OH ou F, adicionalmente Cl, O (oxi-micas) e S.

As fórmulas dos feldspatos foram calculadas na base de 32 átomos de oxigênio, sendo classificados no sistema ternário Ab-Na-Or conforme as recomendações de Deer *et al.* (1992). O cálculo foi executado através dos seguintes componentes moleculares: Albita (Ab): $Na_4[Al_4Si_{12}O_{32}]$; Anortita (Na): $Ca_4[Al_8Si_8O_{32}]$ e Ortoclásio (Or): $K_4[Al_4Si_{12}O_{32}]$.

3.2 ASPECTOS GERAIS MACRO- E MICROSCÓPICOS

Macroscopicamente os diques são homogêneos, não deformados e sem alterações mineralógicas visíveis. Consistem em rochas de cor cinza, aparentemente com textura fanerítica fina. Em geral os diques dos sub-enxames Manáira e Princesa Isabel têm granulometria, mineralogia e texturas similares, mas o conjunto de Tavares mostra algumas diferenças importantes. Esses três sub-enxames são composicionalmente semelhantes,

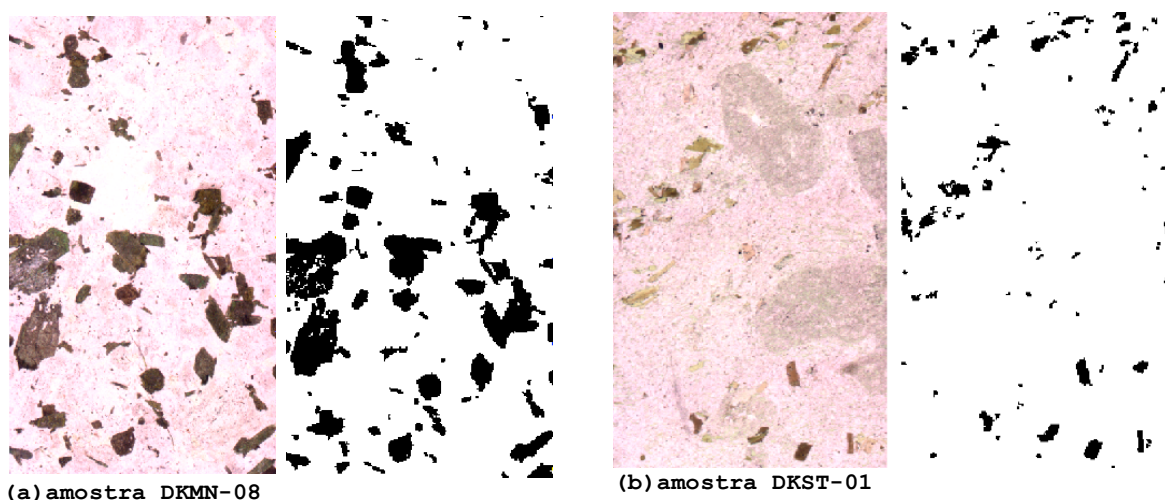


Figura 14. Imagens microscópica convencional e binária de amostras dos sub-enxames Manaira (a) e Serra Talhada (b), mostrando a correspondência entre as fases minerais félsicas e máficas. Em (a) a fase máfica é predominantemente representada por clinopiroxênio, enquanto em (b) por biotita.

Amostra	Análise de Imagem Binária		Contagem Automática de Pontos			
	%Félsicos	%Máficos	%K-feldspato	%Piroxênio	%Anfibólio	%Biotita
DKMN-04	86	14				
DKMN-05	87	13				
DKMN-06	85	15	82	18	-	-
DKMN-08	83	17	81	19	-	-
DKMN-09	84	16				
DKMN-10	84	16				
DKPI-01	80	20	78	-	22	-
DKPI-02	81	19	82	-	18	-
DKST-01	92	08	90	-	-	10
DKST-02	94	06				
DKST-03	95	05				
DKST-05	94	06				
DKTV-01	82	18				
DKTV-02a	78	22	76	-	24	-
DKTV-02b	59	41				
DKTV-03	40	60				
DKTV-04	67	33	63	37	-	-
DKTV-05	70	30				

Tabela 2. Proporção volumétrica das fases minerais félsicas e máficas constituintes dos sub-enxames Manaira, Princesa Isabel, Serra Talhada e Tavares. Os resultados da análise de imagem binária são apresentados em termos de proporção modal total de félsicos (dominantemente K-feldspato) e máficos (incluindo piroxênio e/ou anfibólio e/ou biotita; titanita e opacos não foram contabilizados uma vez que não somam 1%). Observar a correspondência com os resultados obtidos pela contagem automática de pontos, realizada em algumas das amostras.

constituídos por K-feldspato, piroxênio e/ou anfibólio e como minerais acessórios apatita, titanita e zircão em menor proporção; carbonatos, de uma maneira geral, são pouco comuns. Já os diques de Serra Talhada apresentam feldspatos altamente sericitizados e biotita como única fase mineral máfica.

Os resultados percentuais da moda obtidos por análise de imagem binária mostram a dominância de K-feldspato como fase mineral principal, subordinadamente acompanhado pelas fases máficas piroxênio, anfibólio e biotita. Considerando a ausência de quartzo e plagioclásio modais em todas as amostras, K-feldspato representaria 100% do total de félsicos no diagrama Q-A-P de Streckeisen (1976), não ilustrado. Sendo assim, os diques são petrograficamente classificados como álcali-feldspato sienitos.

3.3 MICROSCOPIA E QUÍMICA MINERAL

3.3.1 SUB-ENXAME MANAÍRA

Ao microscópio as amostras de Manaíra mostram textura inequigranular, hipidiomórfica a xenomórfica, com notável variação granulométrica abrangendo o intervalo de 0,1-1,2 mm. A assembléia mineralógica é dominada por K-feldspato+piroxênio+anfibólio; titanita, apatita e zircão ocorrem como acessórios, em proporção não superior a 1%.

O K-feldspato é microclina. Ocorre como cristais de dimensões variadas, entre 0,1 e 1 mm, e morfologia subeudral a anedral. Em geral apresentam macla albita-periclina em grade; pertitas tipo *string* e *stringlets* podem estar presentes nos cristais maiores.

O piroxênio (2V 65°-75°) ocorre como cristais subedrais a anedrais, ora dispersos e em contato direto com feldspatos ora formando pequenos agregados monominerálicos. Por vezes, pode mostrar leve corrosão/absorção magmática nas bordas. Apresenta pleocroísmo variando de verde esmeralda a verde amarelado, com os tons mais intensos verde amarelado. Quando apresentam zonamentos são do tipo setorial e concêntrico (Prancha 1; Foto 1), o qual refere-se às variações composicionais ditadas pela troca preferencial entre Na e Ca [$\text{NaFe}^{3+} \leftrightarrow \text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})$] no sítio M2. Os centros dos cristais são predominantemente menos sódicos (egirina-augita) em relação às bordas (egirina) (Fig. 15).

O anfibólio aparece em proporção significativamente menor em relação ao piroxênio. São cristais subedrais a anedrais, com 2V entre 50°-70° e forte pleocroísmo verde azulado (Prancha 1; Foto 2). Suas

composições são homogêneas, ricas em Mg [$Mg/(Mg+Fe^{2+})$ c. 0,5] mas com relativamente baixos teores em álcalis [$(Na+K)_A < 0,5$], apontando para magnésio-riebeckita (Fig. 16).

Como fases minerais acessórias ocorrem zircão e, mais raramente, titanita, na forma de cristais subedrais a euedrais (Prancha 1; Foto 3); apatita ocorre como grãos prismáticos tipicamente aciculares. Ocorrem freqüentemente como inclusões nas fases minerais principais.

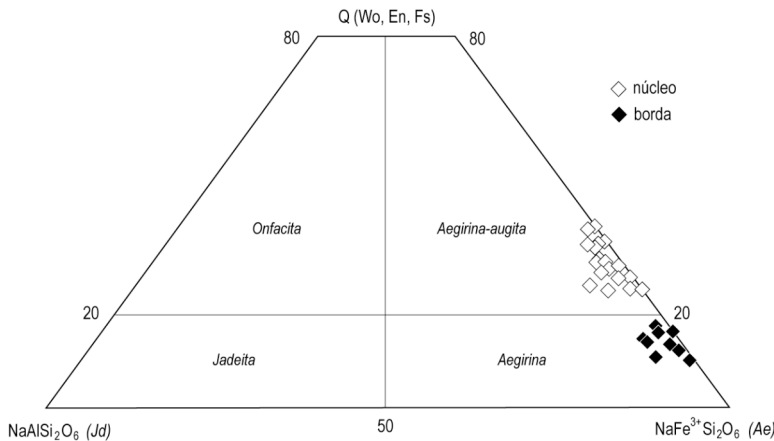


Figura 15. Diagrama de classificação para piroxênios do sub-enxame Manaíra.

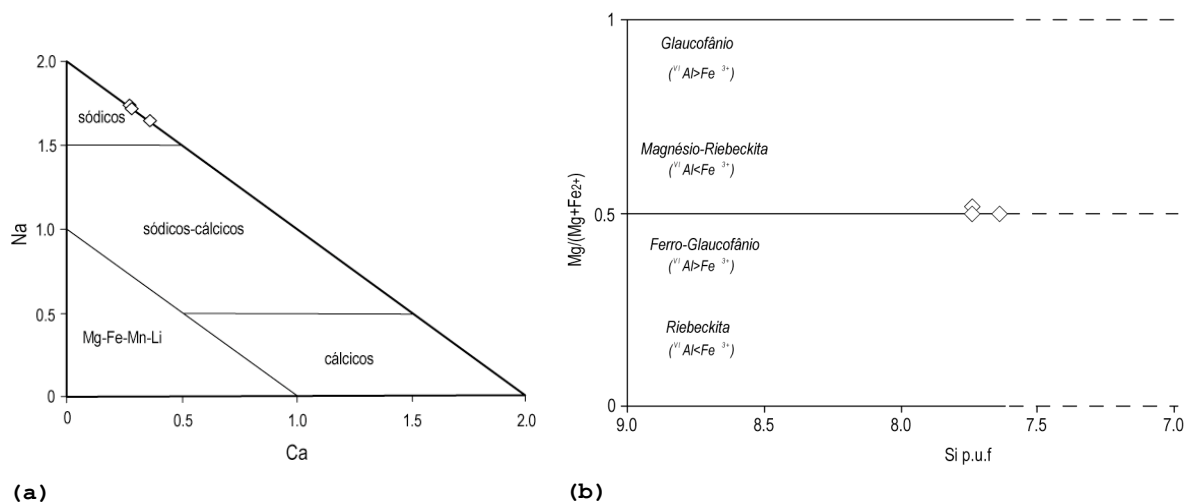


Figura 16. Diagramas de classificação (a) Na-Ca e (b) $Mg/(Mg+Fe^{2+})$ -Si para os anfibólios do sub-enxame Manaíra. Em (b): $(Na+K)_A < 0,5$; $Na_B \geq 1,5$; $(Mg+Fe^{2+}+Mn^{2+}) > 2,5$; $(^{VI}Al$ ou $Fe^{3+}) > Mn^{3+}$; $Li < 0,5$; $(Mg$ ou $Fe^{2+}) > Mn^{2+}$.

3.3.2 SUB-ENXAME PRINCESA ISABEL

Ao microscópio a textura é hipidiomórfica a xenomórfica, inequigranular seriada, caracterizada pelo arranjo de cristais de feldspato alcalino subedrais. No geral, não há uma orientação preferencial dos grãos, muito embora um arranjo discretamente linear pode

ser observado entre grãos de feldspato tabulares. A fase máfica dominante é anfibólio azul, com apatita e titanita aparecendo como acessórios.

O feldspato alcalino é microclina. Tem dimensões equidimensionais, sendo em sua maioria cristais subeudrais mostrando predominantemente padrões de macla albita-periclina; eventualmente pode apresentar planos de macla em uma única direção. Aspectos texturais tais como micropertitas e extinção ondulante são pouco comuns.

O anfibólio é geralmente subeudral a anedral, aparecendo alguns grãos eudrais com até 6 mm. É comum aparecer como finas 'agulhas', dispostas em arranjos radiais. Apresentam relativa variação composicional (Fig. 17a), sendo menos comuns os tipos sódico-cálcicos de composições ferro-richterita com $[(Ca+Na)_B \geq 1]$ (Fig. 17b). Grande parte dos cristais maiores têm zonação pleocróica, de tons azulados no centro passando a matizes levemente esverdeadas nas bordas (Prancha 1; Fotos 4, 5). A proporção de álcalis no sítio estrutural A dita a variação composição observada nos cristais do sub-enxame Princesa Isabel: magnésio-riebeckita $[(Na+K)_A < 0,5]$ a ferro-ekermanita-arfvedsonita $[(Na+K)_A \geq 0,5]$ (Fig. 18).

A titanita ocorre como grãos eudrais a subeudrais. A apatita aparece em pouca quantidade na forma de cristais eudrais.

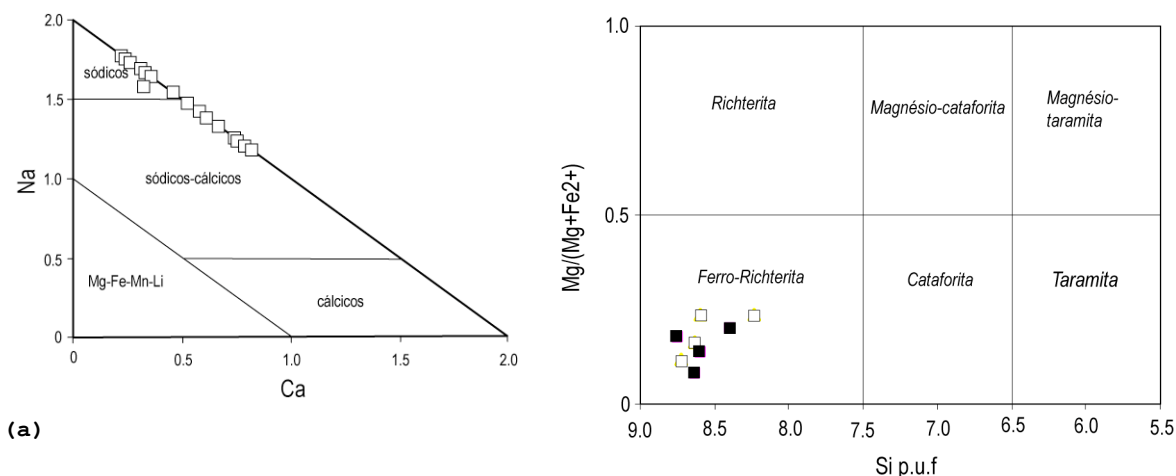
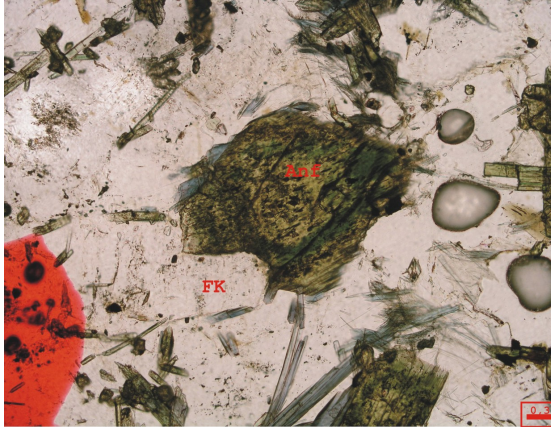
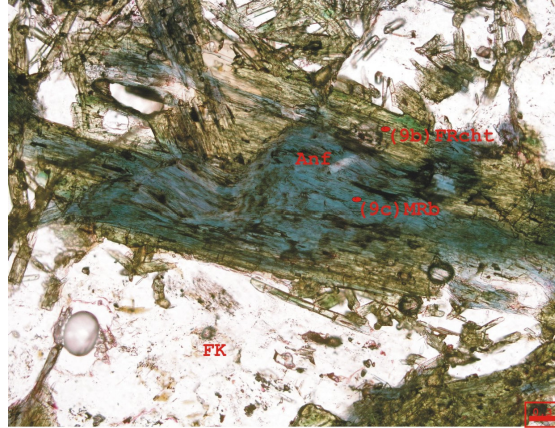
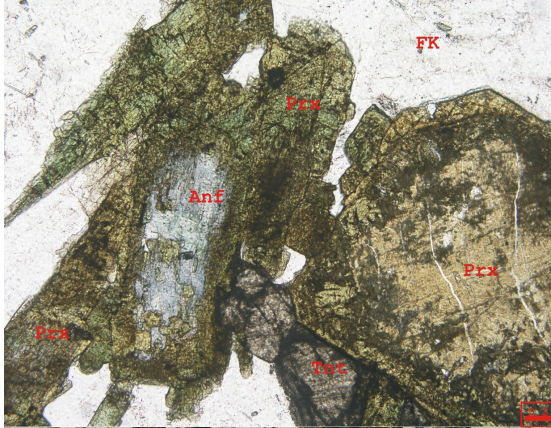
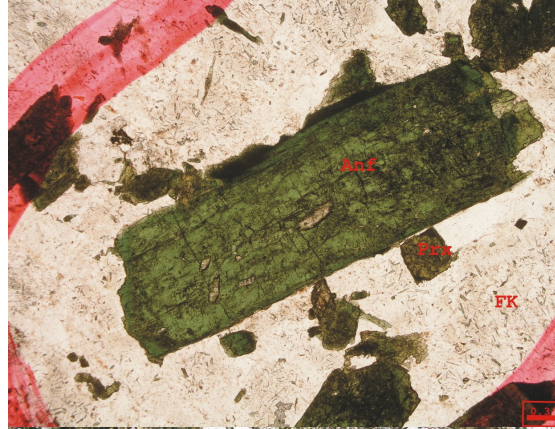
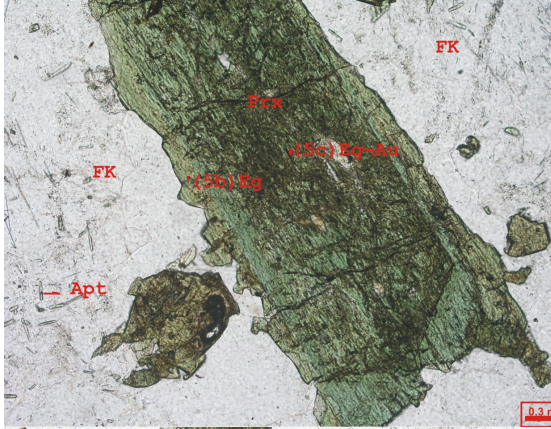


Figura 17. Diagrama de classificação (a) Na-Ca e (b) $Mg/(Mg+Fe^{2+})$ versus sílica para anfibólios do sub-enxame Princesa Isabel. Em (b): $(Na+K)_A \geq 0,5$; $(Ca+Na)_B \geq 1$; $0,5 < Na_B < 1,5$.



Prancha 1.

Fotomicrografia 1. Cristal de piroxênio (Prx) em matriz de feldspato potássico (FK). O piroxênio apresenta zonamento composicional, com centros mais escuros de composição egrina-augita (Eg-Au) e bordas mais claras de egrina (Eg). E apatita (Apt) acicular. Amostra DKMN-04, análise 5 da microsonda, polarizadores paralelos.

Fotomicrografia 2. Cristal de anfibólio (Anf) de composição homogênea (magnésio-riebeckita), junto com piroxênio (Prx). Amostra DKMN-08, polarizadores paralelos.

Fotomicrografia 3. Cristais de piroxênio (Prx), sendo substituído por anfibólio azul (Anf) no centro. Cristais euedrais de titanita (Tnt), em feldspato potássico (FK). Amostra DKMN-02, polarizadores paralelos.

Fotomicrografia 4. Cristal de anfibólio (Anf) com zonamento composicional, com centros azuis de magnésio-riebeckita (MRb) e bordas esverdeadas de ferro-richterita (FRcht). Análise 9 da microsonda. Amostra DKPI-01, polarizadores paralelos.

Fotomicrografia 5. Cristal de anfibólio (Anf) euedral. Amostra DKPI-01, polarizadores paralelos.

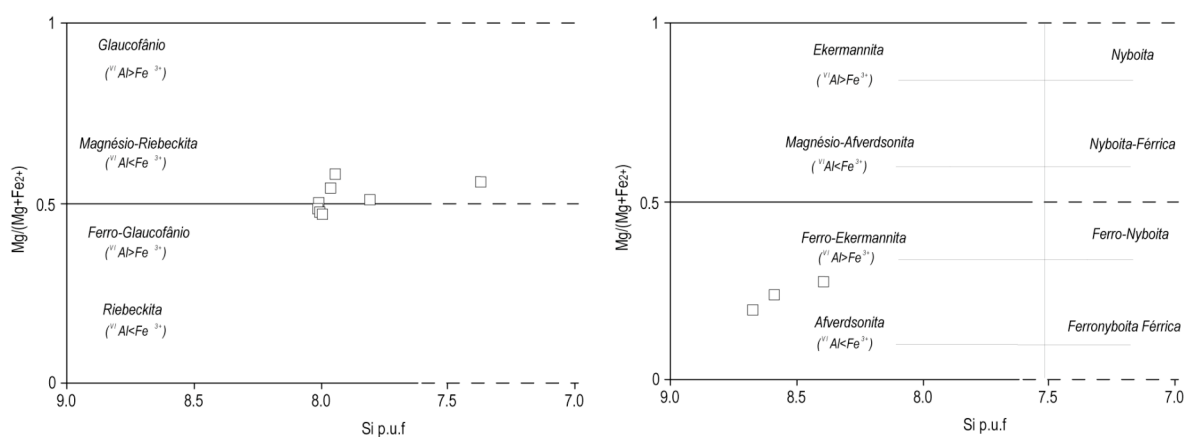


Figura 18. Diagrama de classificação para anfibólios sódicos do sub-enxame Princesa Isabel, com: $Na_B \geq 1,50$; $(Mg+Fe^{2+}+Mn^{2+}) > 2,5$; $(^{VI}Al \text{ ou } Fe^{3+}) > Mn^{3+}$; $Li < 0,5$; $(Mg \text{ ou } Fe^{2+}) > Mn^{2+}$. A proporção de álcalis no sítio A é variável, sendo $[(Na+K)_A < 0,5]$ em **(a)** e $[(Na+K)_A \geq 0,5]$ em **(b)**.

3.3.3 SUB-ENXAME TAVARES

Compreende rochas com textura tipicamente subvulcânica, definida por cristais tabulares bem formados de feldspato alcalino imersos em uma matriz fanerítica fina predominantemente constituída por ripas de feldspato e, menos comumente, anfibólio. Piroxênio e anfibólio também ocorrem como microfenocristais.

Os microfenocristais de feldspato são tabulares euedrais a subeuedrais, equidimensionais, com dimensões variando entre 0,5-2 mm. Geminação polissintética está pervasivamente presente. Sua composição química (centro: $Ab_{48,7}An_{1,2}Or_{30,4}$ a $Ab_{65,9}An_{3,2}Or_{47,8}$ e borda: $Ab_{55,0}An_{1,6}Or_{35,8}$ a $Ab_{60,5}An_{3,7}Or_{42,8}$) aponta para feldspato potássico. Constitui também a matriz, todavia apresentando-se como cristais ripiformes, subeuedrais, com grau incipiente de sericitização.

Anfibólio é a fase máfica mais importante, com hábito e composições variáveis (Fig. 19a). O tipo dominante ocorre como cristais euedrais a subeuedrais, com dimensões entre 1-2,5 mm, e pleocroísmo variando entre azul violáceo-azul escuro (Prancha 2; Foto 1). Também ocorre como agregados aciculares, radiais, por vezes com alteração para óxido de ferro (Prancha 2; Foto 2). Sua composição é de um anfibólio sódico, com $[(Na+K)_A < 0,5]$ e $Na_B \geq 1,5$, e #Mg $[Mg/(Mg+Fe^{2+})]$ em torno de 0,5. A proporção variável de ^{VI}Al em relação a Fe^{3+} classifica-o como magnésio-riebeckita a ferro-glaucofânio (Fig. 19b). Um tipo subordinado de anfibólio, com pleocroísmo em tons de verde aparece esporadicamente,

isolado ou formando mantos em torno do anfibólio azul (Prancha 2; Foto 3). Sua composição é sódico-cálcica, tipo winchita (Fig. 20).

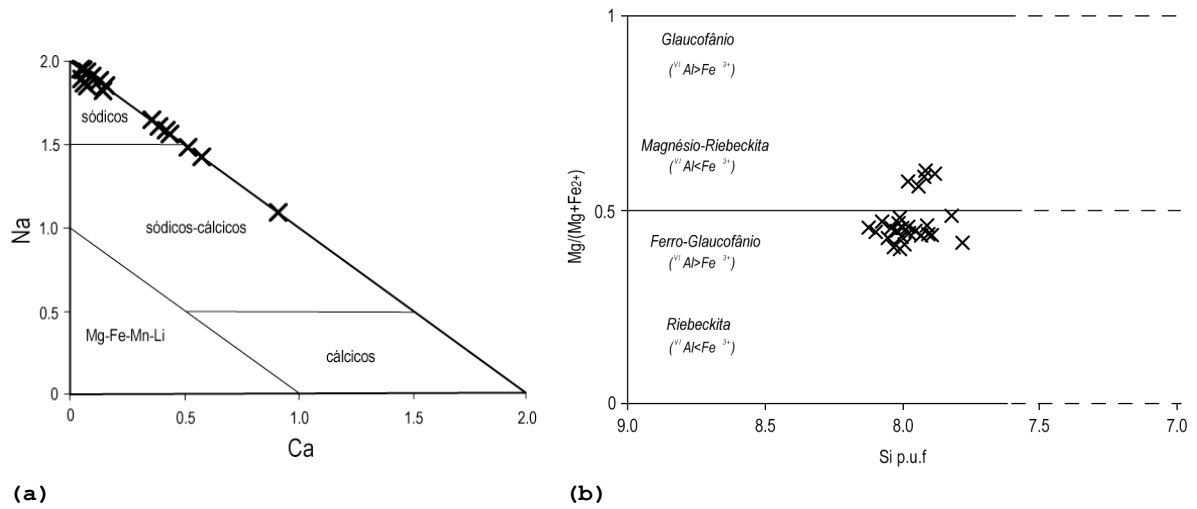


Figura 19. Diagrama de classificação (a) Na-Ca e (b) Mg/(Mg+Fe²⁺)-Si para anfibólios do sub-enxame Tavares. Em (b): Na_B ≥ 1,50; (Mg+Fe²⁺+Mn²⁺) > 2,5; (VI Al ou Fe³⁺) > Mn³⁺; Li < 0,5; (Mg ou Fe²⁺) > Mn²⁺; a proporção de álcalis no sítio A equivale a [(Na+K)_A < 0,5].

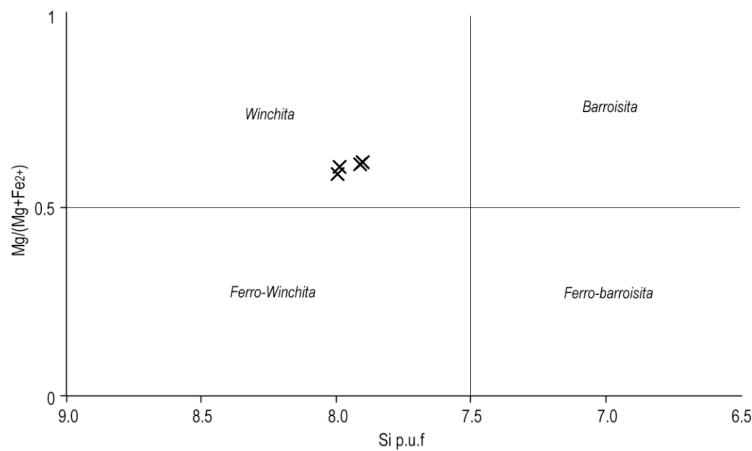
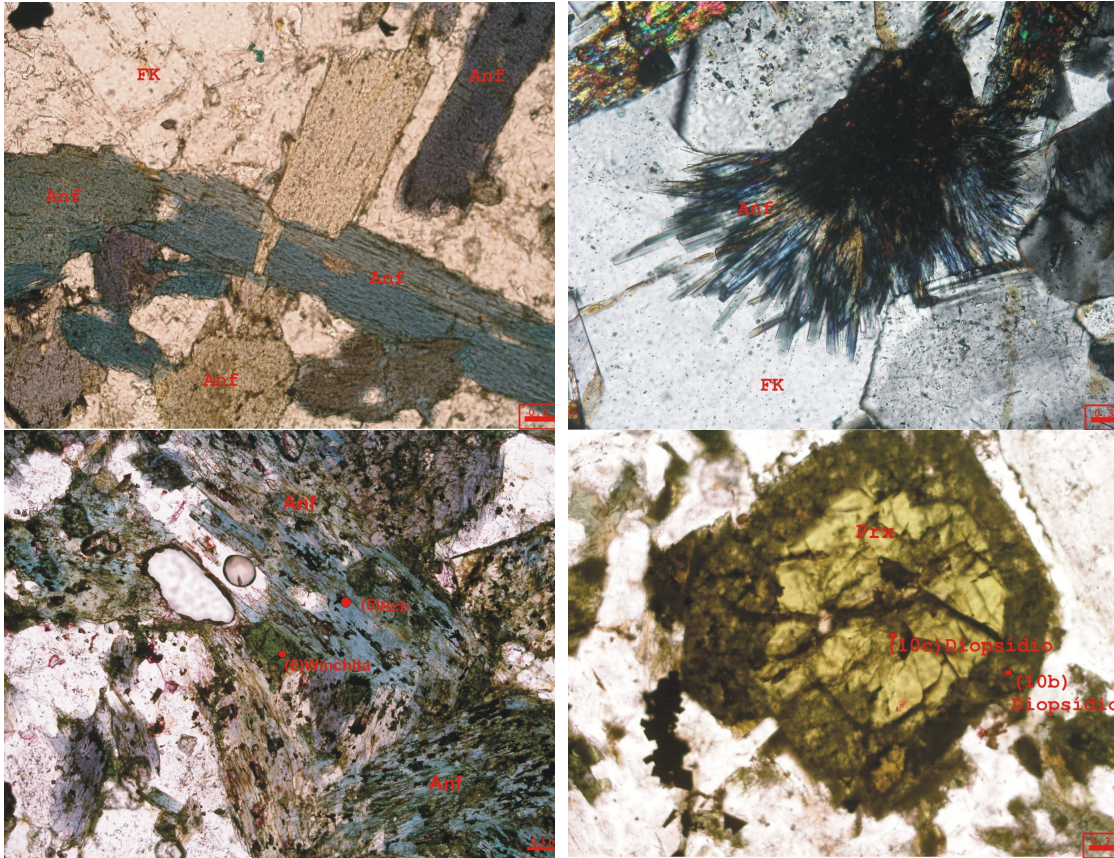


Figura 20. Diagrama de classificação para anfibólios sódico-cálcicos do sub-enxame Tavares, com: (Na+K)_A < 0,5; (Ca+Na_B) ≥ 1; 0,5 < Na_B < 1,5.

O piroxênio ocorre como cristais isolados subeudrais a eudrais e formando agregados, alguns cristais apresentando bordas corroídas e textura reliquiar. São geralmente homogêneos, por vezes exibindo leve zonamento definido por discretas variações pleocróicas, em tons de verde. Apresentam significativa variação em sua composição, desde tipos sódicos a cálcicos (Fig. 21). O tipo sódico é egirina-augita, e está presente em todas as aostras estudadas. O piroxênio cálcico é diopsídio, apresentando pleocroísmo fraco em tons de verde claro e zonamentos composicionais discretos a ausentes (Prancha 2; Foto 4). Augita ocorre menos comumente, tendo sido identificada apenas na amostra DKTV-04.



Prancha 2.

Fotomicrografia 1. Cristais de anfibólio (Anf) com pleocroísmo variando entre azul violáceo-azul escuro. Amostra DKTV-2A, polarizadores paralelos.

Fotomicrografia 2. Agregados de anfibólio (Anf) aciculares, radiais, com alteração para óxido de ferro. Amostra DKTV-05, polarizadores paralelos.

Fotomicrografia 3. Cristal de anfibólio (Anf) azul, de composição magnésio-riebeckita (MRb). Mantos de winchita em torno da MRb. Amostra DKTV-05, polarizadores paralelos.

Fotomicrografia 4. Cristal eudral de piroxênio (Prx), de composição cálcica - diopsídio, Análise 10 microssonda. Amostra DKTV-04, polarizadores paralelos.

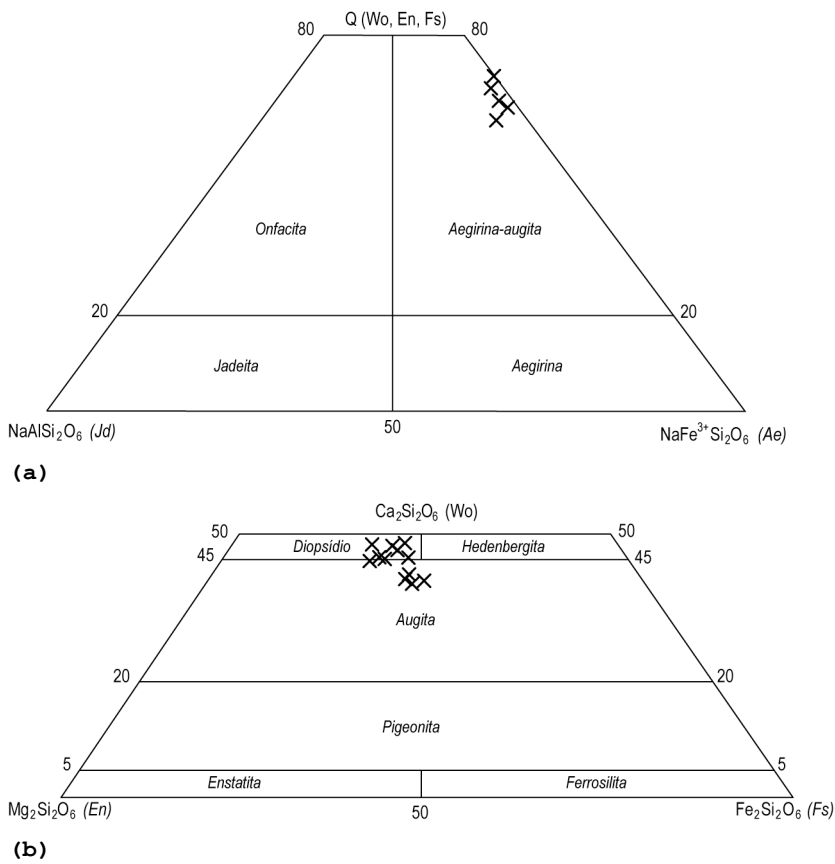


Figura 21. Diagramas de classificação para piroxênios sódicos (a) e cálcicos (b) do sub-enxame Tavares. Não há necessariamente uma relação entre as composições sódicas (egirina-augita) e cálcicas (augita) nos cristais analisados; em apenas um deles esta relação foi observada. As demais composições augíticas e egirina-augíticas representam núcleos e/ou bordas de mesmos cristais.

3.3.4 SUB-ENXAME SERRA TALHADA

Ao microscópio, a textura geral é fanerítica fina, representada principalmente por cristais xenomórficos de feldspato alcalino microclina, com granulometria bastante homogênea. Sericita aparece significativamente como produto de alteração tardia, especialmente presente ao longo dos planos de macla polissintética. Dentro dos cristais maiores a sericita acompanha o zonamento concêntrico dos feldspatos.

A fase máfica dominante é a biotita (Fig. 22). Ocorre preferencialmente como placas isoladas, de até 0,8 mm em seu eixo maior, mas também formando pequenos agregados entre feldspatos. Em geral apresenta pleocroísmo em tons de castanho-castanho avermelhado; alteração para clorita é determinada por variações pleocróicas em tons esverdeados e pequenas inclusões de óxidos ao longo dos planos de clivagem.

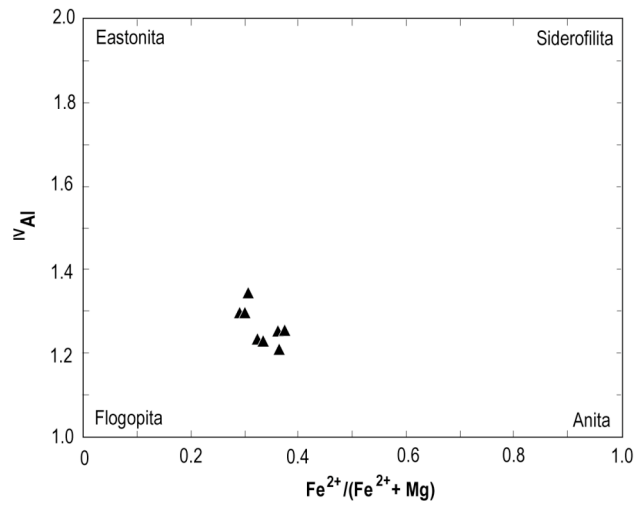


Figura 22. Diagrama de classificação de biotitas para o sub-enxame Serra Talhada.

CAPÍTULO 4 - LITOQUÍMICA E GEOQUÍMICA ISOTÓPICA

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão discutidos os resultados de análises geoquímicas e isotópicas realizadas em um conjunto de 18 amostras representativas dos diques ácidos de Manaíra-Princesa Isabel, tendo sido amostrados: 6 diques do sub-enxame de Manaíra, 2 de Princesa Isabel, 4 de Serra Talhada e 5 de Tavares. Foram determinados os teores dos elementos maiores Si, Ti, Al, Fe, Mg, Mn, Ca, Na, K e P, menores/traços Ba, Be, Co, Cs, Ga, Hf, Nb, Rb, Sn, Sr, Ta, Th, U, W, Zr, Y, Mo, Cu, Pb, Zn, Ni, As, Cd, Sb, Bi, Ag, Au, Hg, Tl, Se, e terras-raras La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu. Os resultados são expressos em termos de % em peso para os óxidos, e em ppm/ppb para os demais, todos listados nas Tabelas 3, 4 e 5, ao final do capítulo. A concentração dos óxidos foi dosada por fluorescência de raios-X, em laboratório específico do Depto GMG/IGc-USP. A preparação das amostras envolveu a fusão de 1 (um) grama de material pulverizado (<300 mesh) com 5 (cinco) gramas de uma mistura de material fundente de metaborato de lítio:tetraborato de lítio na proporção 4:1, para formar uma pastilha de vidro. As condições analíticas incluíram (i) voltagem de aceleração entre 22 kV (para Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, P, Si) e 40 kV (para Mn, Ti), (ii) intensidade do feixe de raio-X de 50 mA, (iii) tempo médio de contagem entre 30 segundos (para Al, Ca, Fe, K, Si) e 60 segundos (para Mg, Na, P), e (iv) correções de matriz Alpha. Maiores detalhes sobre o procedimento analítico e condições instrumentais estão descritos em Mori *et al.* (1999).

As concentrações de elementos menores/traços e terras-raras foram dosadas por espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS), no Acme Analytical Laboratories Ltda, Canadá.

Para tratamento dos dados e elaboração de diagramas de variação química e discriminantes geoquímicos, foram utilizados os softwares MINPET e Excel. A caracterização geoquímica foi fundamentada em diagramas específicos para discriminação de séries magmáticas (R1R2, TAS, e outros), enquanto que comentários acerca de mecanismos petrogenéticos foram embasados em diagramas (i) de variação entre óxidos e razões elementares, (ii) incompatibilidade geoquímica (*spidergrams*) e (iii) terras-raras. A discussão sobre tipo(s) de fonte(s) envolvida(s) na gênese desse importante magmatismo fissural foi essencialmente ilustrada pelo comportamento conjunto de isótopos de Sr, Nd e Pb.

Razões isotópicas $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ($= \epsilon\text{Nd}$) e $^{206,207,208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ foram determinadas para o mesmo conjunto (18 amostras) analisado para geoquímica de rocha total. As determinações foram feitas no Centro de Pesquisas Geocronológicas do IGc/USP. O procedimento para extração de Sr e elementos terras-raras incluiu inicialmente a pesagem de cerca de 100 mg de material pulverizado (< 300 mesh) e adição de *spike* $^{149}\text{Sm}/^{150}\text{Nd}$, em proporção adequada à concentração desses elementos no material (rocha). A dissolução ácida, em saviilex®, foi feita com 4 ml de HF:HNO₃ na proporção 3:1, em chapa aquecida a $\sim 60^{\circ}\text{C}$, por cerca de 5 dias. Após evaporação, foram adicionados 4-5 ml de 6N HCl à amostra, mantendo em chapa aquecida por 12 horas. O resíduo-amostra foi tomado em 1 ml de 2,62N HCl para separação de Sr e ETR em colunas de troca iônica empacotadas com resina BioRad-AG1X 200-400 mesh, na forma de cloreto (Cl^{-}). A alíquota contendo elementos terras-raras é evaporada e tomada em 0,2 ml de 0,26N HCl para separação de Sm e Nd por cromatografia de fase reversa, em colunas empacotadas com resina LN-Spec (pó de teflon impregnado com ácido fosfórico di-2-etil).

Para Pb, o procedimento analítico é semelhante àquele descrito acima para Sr e terras-raras. Todavia, após o ataque ácido com HCl, o resíduo-amostra foi tomado em 2 ml de HBr 0,6N para posterior concentração/eluição de Pb em colunas cromatográficas de troca iônica (BioRad-AG1X 200-400 mesh). A separação química de Pb da solução-amostra seguiu o procedimento descrito em Babinski *et al.* (1999).

As medidas isotópicas foram realizadas por espectrometria de massa de ionização termal (TIMS), em espectrômetros de massa modelo VG-254 (para as composições isotópicas Sr, Sm e Pb) e Finnigan MAT 262 (composições isotópicas de Nd). Os resultados comentados e graficamente representados referem-se todos a razões isotópicas iniciais, ou seja, calculadas para idade de 600 Ma. As razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ iniciais foram calculadas a partir da determinação das razões pai-filho $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ que, por sua vez, foram estimadas com base nas concentrações de Rb e Sr obtidas por ICP-MS. As razões $^{206,207,208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ iniciais foram calculadas com base nos valores das razões $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ e $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$, as quais são estreitamente dependentes das concentrações de U e Th em cada amostra. Por fim, as razões $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ iniciais, ou $\epsilon\text{Nd}(t=600)$, foram determinadas a partir das razões $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ e idade de formação. Todo o conjunto de dados está listado na Tabela 6 e 7, ao final do capítulo.

4.2 RESULTADOS

4.2.1 ELEMENTOS MAIORES

Em termos de conteúdo de sílica as amostras definem um espectro de saturação que varia de c. 59-69%, combinado a teores total de álcalis entre c. 9-16%. Esses valores permitem classificar geoquimicamente os diques desde nefelina sienitos (sub-enxame Tavares) e sienitos (sub-enxames Manaira e Princesa Isabel) até álcali-granitos (sub-enxame Serra Talhada) (Fig. 23), supersaturados em sílica. Com respeito à saturação em alumina, os diques de Tavares, Manaira e Princesa Isabel definem afinidade peralcalina a sub-metaluminosa (ou fracamente metaluminosa) (Fig. 24a), com tendência potássica a ultrapotássica (K_2O entre c. 7-13%; $K_2O/Na_2O > 2$). A afinidade alcalina é igualmente comprovada pelos valores do índice agpaítico (Fig. 24b), o qual varia entre: 0,88-0,99 nos tipos metaluminosos e 1,02-1,21 nos tipos peralcalinos. Por sua vez, os diques da região de Serra Talhada apresentam altas razões $Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$ e valores para o índice agpaítico entre 0,56-0,62, tipicamente de rochas peraluminosas.

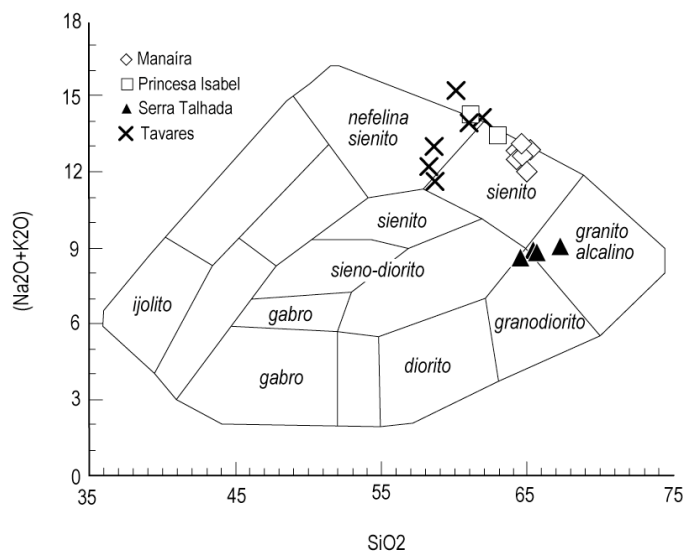


Figura 23. Diagrama de classificação geoquímica relacionando o teor de álcalis (Na_2O+K_2O) versus a percentagem de sílica (segundo Cox et al., 1979).

O comportamento diferenciado dos elementos maiores nos quatro sub-enxames estudados é graficamente demonstrado em diagramas de variação tipo Harker (Fig. 25). A distribuição das amostras dos quatro sub-enxames não permite definir um *trend* único de cristalização fracionada. Analisados isoladamente, os sub-enxames de Manaira e Tavares mostram comportamentos semelhantes quanto a Al_2O_3 , MgO , CaO , TiO_2 e P_2O_5 . O teor

de alumina nos dois conjuntos aumenta proporcionalmente com a diferenciação, acompanhado em Manaíra pelo aumento combinado de Na e, em Tavares, de K. Esse padrão sugere cristalização de K-feldspato e anfibólio como fases tardias. Anfibólio sódico em Manaíra é claramente tardio, produto de desestabilização de piroxênio que, por sua vez, apresenta zonamento cálcico-sódico, com maiores teores de Na (egirina) nas bordas. MgO, FeO e CaO apresentam comportamento decrescente com relação à diferenciação, sugerindo retirada preferencial devido cristalização de egirina-augita. Em Tavares o comportamento de Na é aleatório, não indicando qualquer tendência de fracionamento preferencial dada a dispersão das amostras. O comportamento de K parece sugerir uma tendência compatível com aumento de sílica, comportamento este corroborado quando considerado o diagrama de álcalis total (Na+K). Ca diminui progressivamente com aumento de sílica sugerindo controle pela cristalização de fases cálcicas de piroxênio.

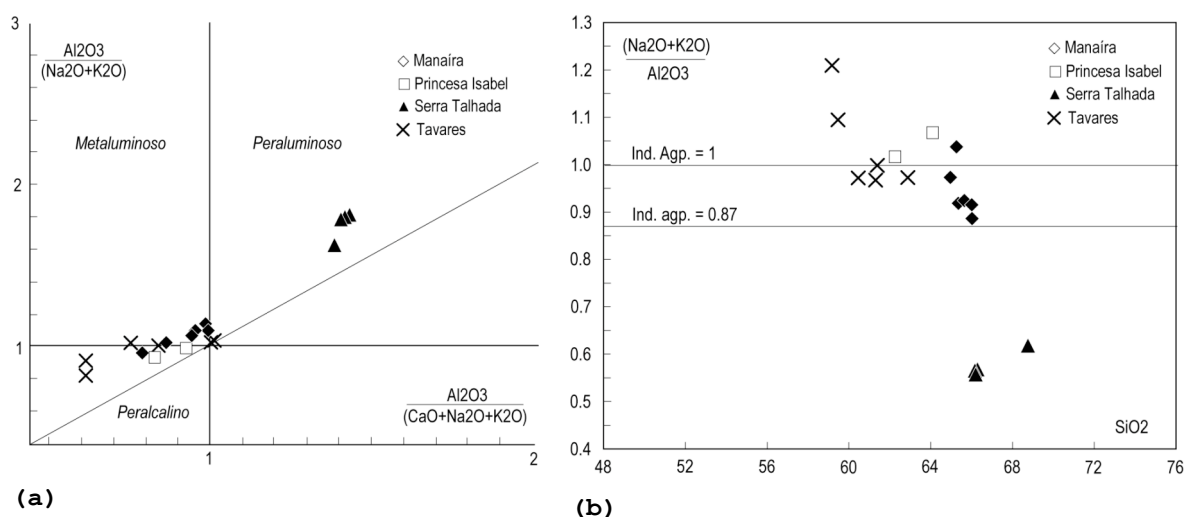


Figura 24. Diagramas de correlação alumina e álcalis. Em **(a)** saturação em alumina (Índice de Shand) e em **(b)** sílica versus índice apatítico (Ind. Agp.). Rochas peralcalinas têm Ind. Agp. > 1, enquanto outras rochas alcalinas têm valores acima de 0.87 (Liégeois e Black, 1987).

Em Manaíra, o decréscimo de MgO (também Fe) e Ca com respeito à sílica reflete a cristalização de piroxênio (egirina-augita) e, subordinadamente, anfibólio (Mg-riebeckita). Padrão semelhante é observado para as amostras de Tavares. O comportamento de Ti e P nos dois sub-enxames indica o forte controle pelo fracionamento de titanita e apatita, respectivamente.

Com respeito ao sub-enxame Princesa Isabel, o número reduzido de análises (apenas duas) não permite comentários detalhados sobre a importância de cristalização fracionada como mecanismo petrogenético. No

caso do sub-enxame Serra Talhada, a significativa homogeneidade composicional das amostras também inviabiliza discussões mais elaboradas a respeito.

4.2.2 ELEMENTOS TRAÇOS/TERRAS RARAS

O comportamento dos elementos menores nas amostras dos diques estudados é ilustrado na Figura 26. O padrão de variação de elementos incompatíveis é, de forma geral, semelhante em todos os quatro sub-enxames, sendo caracterizado por:

(i) forte enriquecimento nos elementos mais incompatíveis (Rb, Ba, Th, U e K) com, todavia, teores significativamente mais elevados em Ba e K em comparação a Rb, Th e U, induzindo à falsas anomalias negativas nestes últimos elementos. As discretas variações de Rb, Ba e K não necessariamente se correlacionam positivamente com aumento de sílica (Fig. 27). Para Rb e K as amostras mais evoluídas dos sub-enxames Manaíra e Tavares têm, de fato, valores mais elevados nestes elementos, muito embora a correlação não seja exatamente linear. A homogeneidade composicional do sub-enxame Serra Talhada e o reduzido número de amostras de Princesa Isabel não permitem a definição de qualquer tendência. Nenhum padrão de correlação é observado para Ba em qualquer dos sub-enxames.

(ii) o grau de enriquecimento diminui progressivamente para direita do diagrama, até teores cerca de 10 vezes maiores que o condrito para Y. Flutuações são observadas especialmente nos valores normalizados de Th, U, Nb, Sr, P (e Zr).

(iii) é notória, nos espectros individuais de todas as amostras, a presença de forte depleção em Nb, sem ter qualquer correlação com o grau de diferenciação em sílica.

(iv) depleções em Sr (e mais restritamente, em P) são observadas nas amostras dos sub-enxames Manaíra e Tavares, e em apenas uma das amostras do sub-enxame Princesa Isabel.

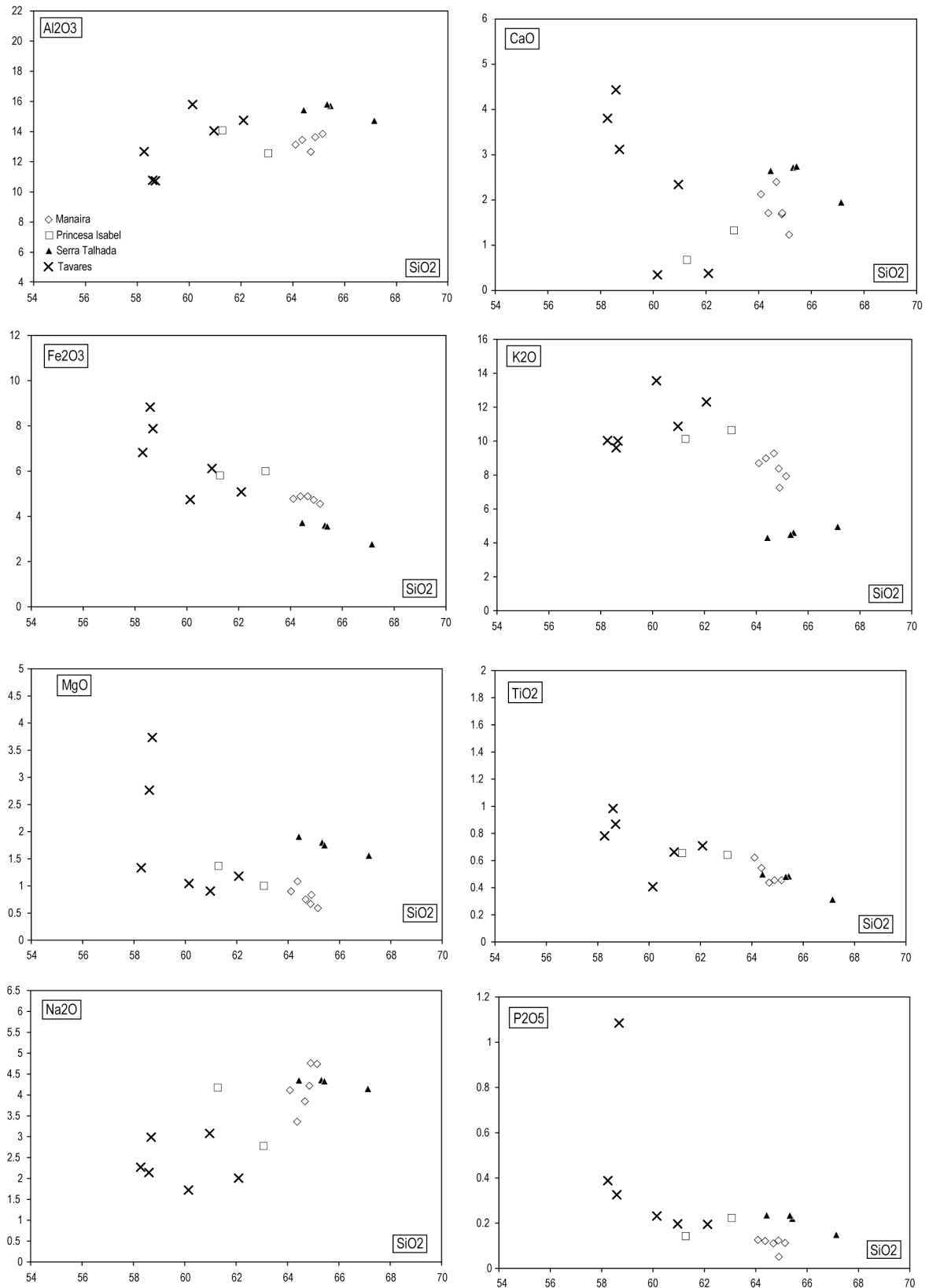


Figura 25. Diagramas de variação entre óxidos (tipo Harker) para as amostras dos sub-enxames Manaira, Princesa Isabel, Serra Talhada e Tavares.

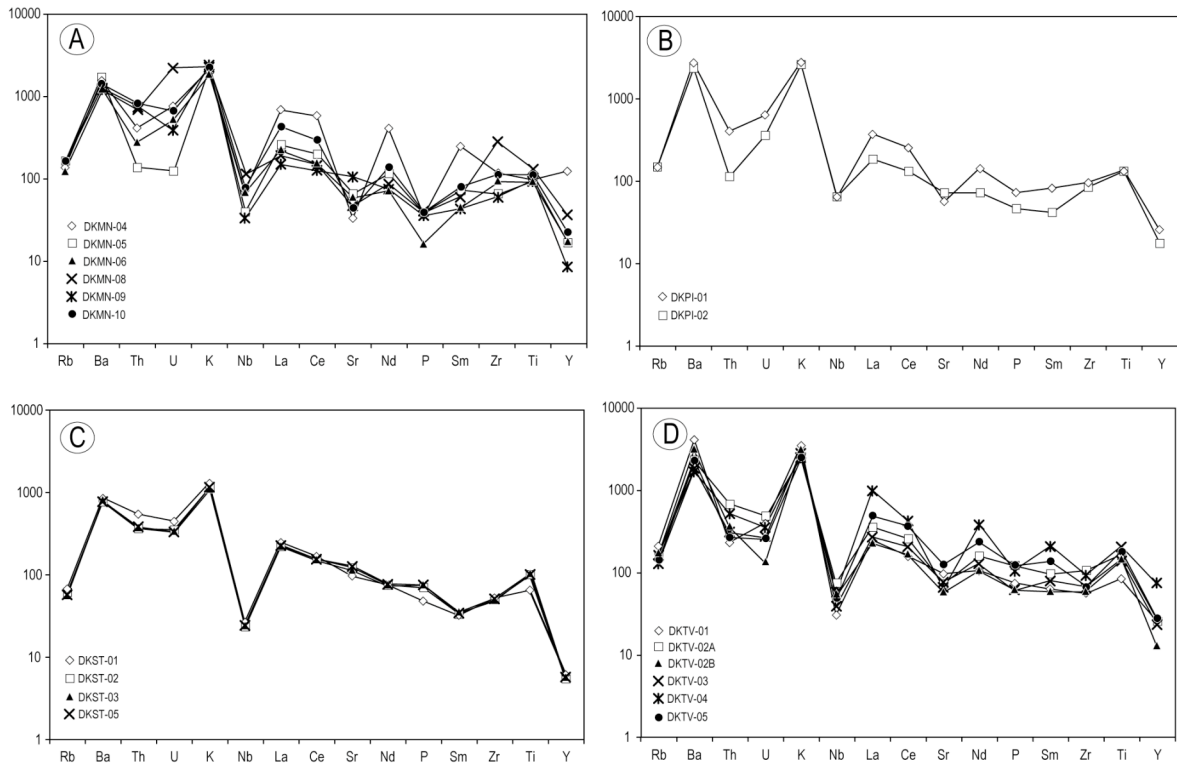


Figura 26. Espectros de comportamento de elementos incompatíveis (*spidergrams*) para as amostras dos sub-enxames Manaira (a), Princesa Isabel (b), Serra Talhada (c) e Tavares (d). Fatores de normalização são aqueles do condrito de Sun e McDonough (1989).

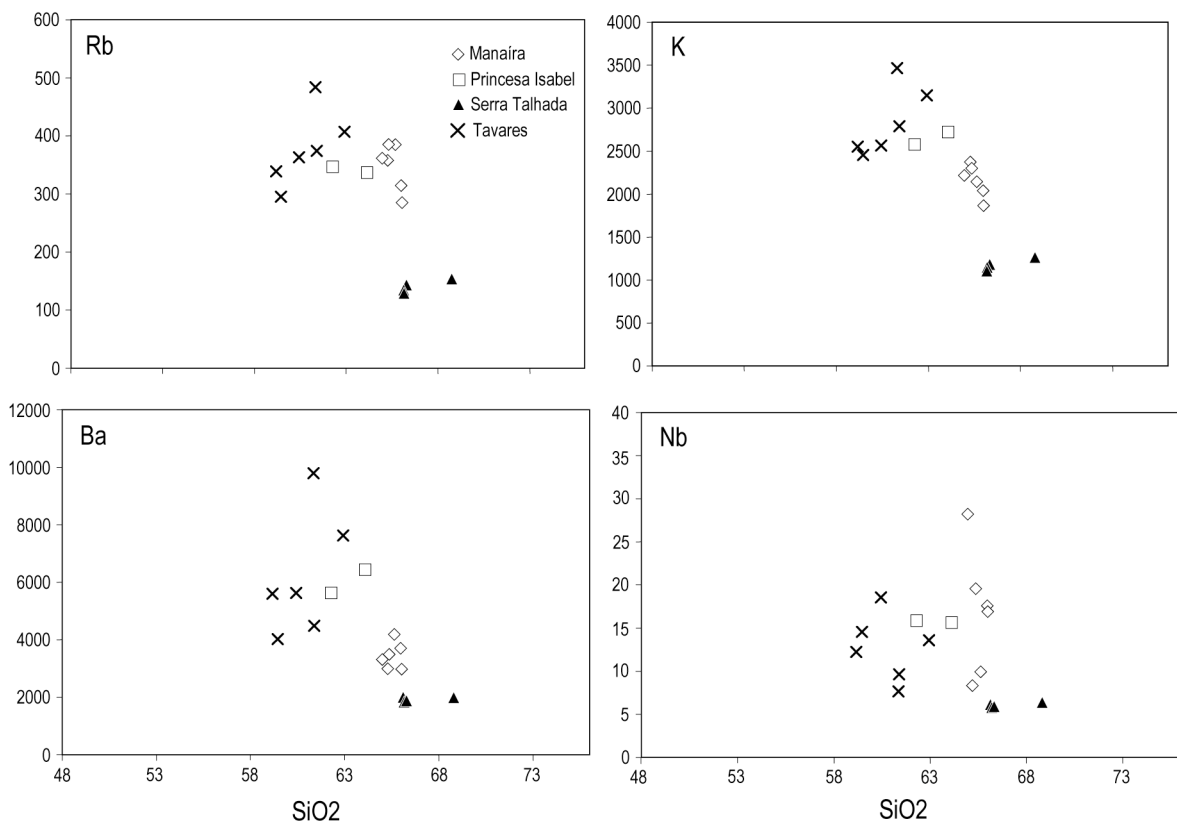


Figura 27. Gráficos de correlação (a) Rb, (b) K, (c) Ba, (d) Nb versus SiO₂.

Com respeito à geoquímica de elementos terras-raras (ETR), as razões $(La/Yb)_N$ são amplamente variáveis quando as amostras são analisadas em conjunto (Fig. 28). Os sub-enxames Manaíra e Tavares e uma das amostras de Princesa Isabel (DKPI-01) têm razões $(La/Yb)_N$ similares, com valores médios entre 17-23. Três amostras do sub-enxame Manaíra (DKMN-04, -06, -08) e a amostra DKPI-02 apresentam valores menores para essas razões, entre *c.* 4-15. As amostras do sub-enxame Serra Talhada são significativamente mais fracionadas, apresentando os valores mais elevados para $(La/Yb)_N$, entre *c.* 46-56. A forte depleção em ETR pesados em relação aos leves é sugestiva de granada residual na fonte.

Além do padrão comum de fracionamento, os espectros ETR dos diques mostram moderado grau de empobrecimento em Eu, indicado pelos valores calculados da razão Eu/Eu^* . Esses valores concentram-se preferencialmente entre *c.* 0,67-0,84 para os diques dos sub-enxames Manaíra, Princesa Isabel e Tavares, e valores mais próximos a 1 para os diques do sub-enxame Serra Talhada (0,88-0,99). A variação no grau da anomalia de Eu é em parte correlacionada ao grau de diferenciação; em Manaíra apenas 4 amostras definem uma tendência a valores mais elevados de Eu/Eu^* com aumento de sílica, enquanto comportamento inverso é observado para o conjunto de amostras do sub-enxame Tavares (Fig. 29).

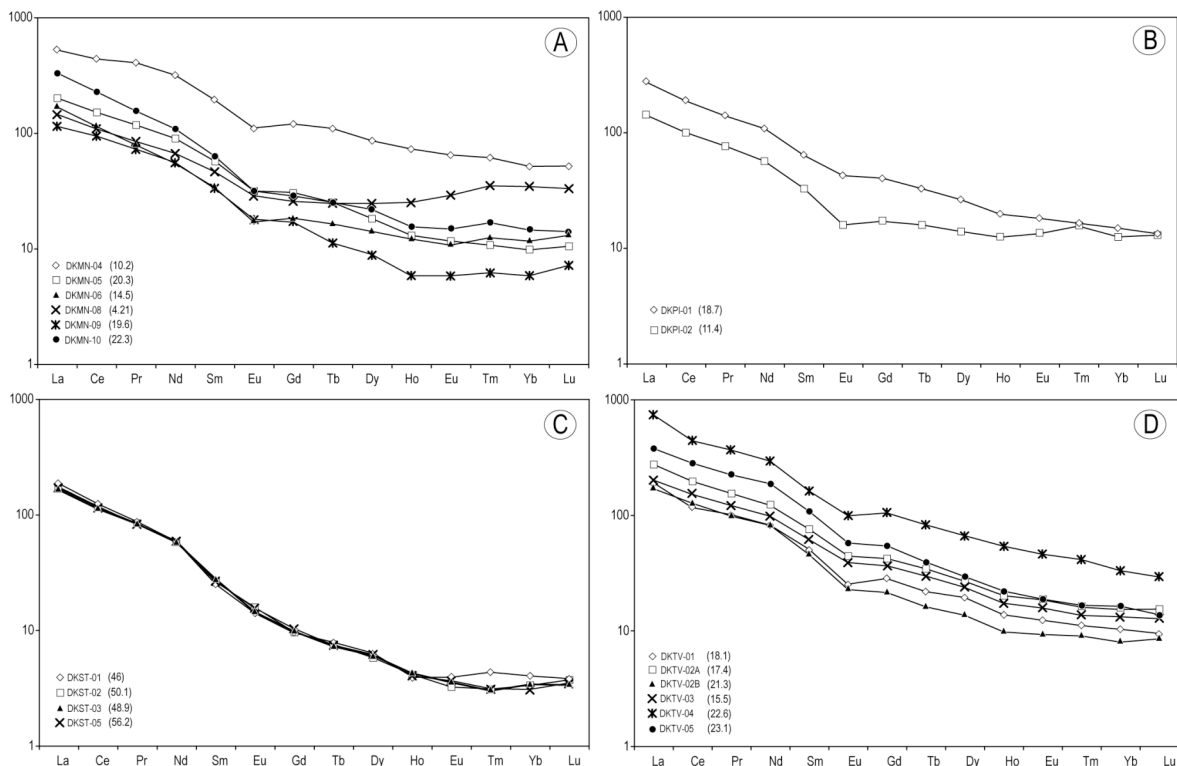


Figura 28. Espectro das concentrações de elementos terras-raras para os sub-enxames Manaíra (a), Princesa Isabel (b), Serra Talhada (c) e Tavares (d). Os valores das razões $(La/Yb)_N$ são indicados em parênteses. Fatores de normalização são aqueles do condrito de Boynton (1984).

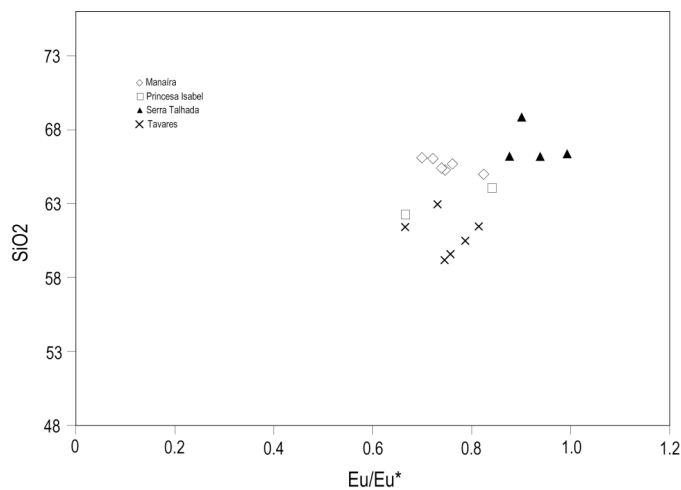


Figura 29. Diagrama de correlação sílica versus Eu/Eu^* para os sub-enxames Manáira e Tavares. As amostras dos demais sub-enxames Princesa Isabel e Serra Talhada são colocadas apenas como ilustração, tendo em vista que o reduzido número de amostras e homogeneidade composicional não permitem a definição de tendências.

4.2.3 GEOQUÍMICA ISOTÓPICA

4.2.3.1 Composição isotópica de Sr

Analisados em conjunto, as razões isotópicas $^{87}Sr/^{86}Sr$ iniciais dos diques sieníticos apresentam significativa heterogeneidade composicional, variando predominantemente entre 0,70718-0,70875, e incluindo ainda composições menos e mais radiogênicas que 0,700 e 0,709, respectivamente. Essas variações parecem sugerir prioritariamente diferenças na fonte, tendo em vista serem superiores aos erros inerentes à análise propriamente dita, menores que 0,0001. Quando avaliados isoladamente, nota-se que as razões $^{87}Sr/^{86}Sr$ (bem como $^{87}Rb/^{86}Sr$) das amostras dos sub-enxames Manáira e Tavares são mais heterogêneas comparativamente àsquelas dos sub-enxames Princesa Isabel e Serra Talhada. Como um todo, as razões $^{87}Rb/^{86}Sr$ e $^{87}Sr/^{86}Sr$ dos grupos referentes a cada sub-enxame não se correlacionam (Fig. 30a). Apenas em Tavares essas razões parecem se correlacionar, se excluídas as amostras DKTV-01 e -03, respectivamente a menos e mais radiogênica do conjunto. O arranjo mostra uma tendência a discreto decréscimo das razões $^{87}Sr/^{86}Sr$ em relação a um aumento significativo das razões $^{87}Rb/^{86}Sr$.

Composições bastante diferentes são fornecidas por uma amostra de cada um dos sub-enxames Manáira (DKMN-04) e Tavares (DKTV-01), cujos valores para as razões $^{87}Sr/^{86}Sr$ iniciais são inferiores a 0,700. Apesar da semelhança, essas composições menos radiogênicas parecem estar relacionadas a fatores distintos. Para a amostra DKMN-04, a razão $^{87}Sr/^{86}Sr$ atual é estreitamente similar às demais do grupo e mesmo dos

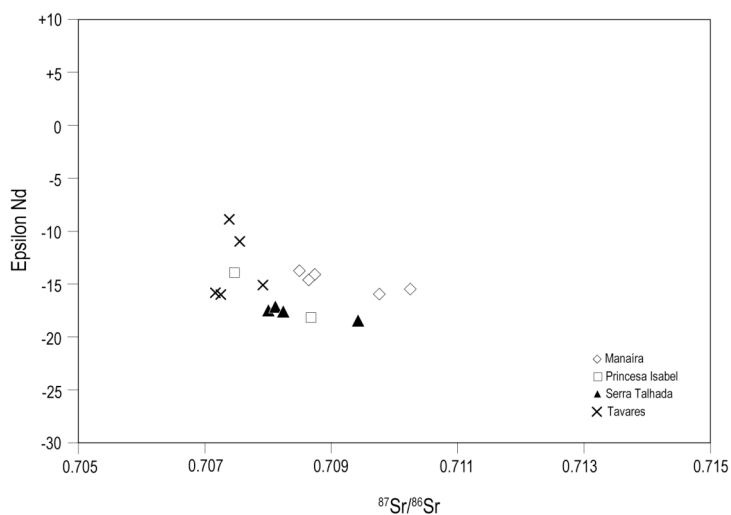
sub-enxames Princesa Isabel e Tavares; todavia, a concentração muito baixa de Sr influencia fortemente no valor mais alto da razão $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$, calculada em c. 1,4. Já para a amostra DKTV-01 a razão $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ se compara àquelas das demais amostras do conjunto, sendo o valor mais baixo da razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ provavelmente reflexo de heterogeneidades na fonte.

4.2.3.2 Composição isotópica de Nd

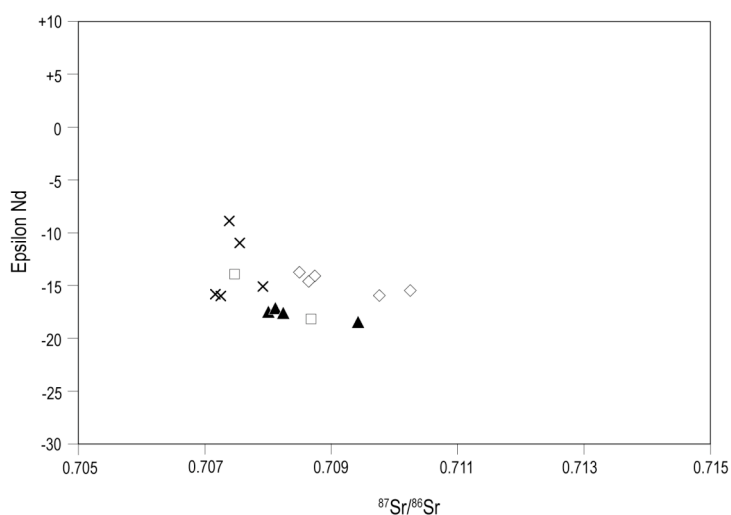
À semelhança das composições isotópicas de Sr, as razões $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (ou ϵNd) iniciais são igualmente heterogêneas, quando avaliados todos os dados em conjunto. Os sub-enxames Manaíra, Tavares e as duas amostras de Princesa Isabel apresentam valores de ϵNd variando principalmente entre -13,8 e -16, enquanto que as amostras do sub-enxame Serra Talhada são discretamente mais radiogênicas, com pequenas variações dos valores de ϵNd em torno de -17,5. Apesar da significativa variação composicional, não é observada uma tendência exatamente linear de correlação entre as razões isotópicas de Sr e Nd. Os dados do sub-enxame Manaíra, no entanto, parecem definir três grupos, representados respectivamente: (i) pela amostra DKMN-04, menos radiogênica (0,695 e -12), (ii) pelas amostras DKMN-05, -06 e -08, com valores de ϵNd e $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ intermediários (c. 0,7085 e -14), e (iii) pelas amostras DKMN-09 e -10, com valores mais radiogênicos ($> 0,7097$ e < -15).

As amostras com ϵNd mais negativos dos sub-enxames Princesa Isabel (DKPI-01) e Serra Talhada (DKST-01) são as mesmas que apresentam as razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ mais elevadas de cada grupo (Fig. 30b). Coincidentemente, correspondem às amostras mais evoluídas (maior $\% \text{SiO}_2$ e Q) e com maiores concentrações em elementos incompatíveis ou litófilos (Rb, Ba, Th, U, ETR leves). Sendo assim, a possibilidade de contaminação restrita com material (encaixante ?) mais radiogênico não deve ser totalmente excluída.

Como conjunto, as razões $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ se concentram entre 0,10 e 0,12, à exceção das amostras do sub-enxame Serra Talhada cujos valores são bastante homogêneos em torno de 0,085. A combinação das razões $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ e $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ fornecem valores de idades-modelo Sm-Nd paleoproterozóicas, entre 1,8-2,2 Ga. Idades TDM maiores que 2,4 foram calculadas para três amostras do conjunto (DKMN-08, DKPI-01, DKTV-02a) refletindo fracionamento mais significativo entre Sm e Nd, demonstrado pelos valores mais elevados das razões $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ nessas amostras.



(a)



(b)

Figura 30. Diagramas de correlação entre razões $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ versus $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (a) e $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e ϵNd (b) para as amostras dos sub-enxames Manáira, Princesa Isabel, Serra Talhada e Tavares. Em (b) as composições isotópicas das amostras DKMN-04 E DKTV-01 não estão plotadas, tendo em vista os valores relativamente mais baixos das razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ em comparação às demais.

4.2.3.3 Composição isotópica de Pb

A exemplo das razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, as razões $^{206,207,208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ iniciais foram obtidas em rocha total. Sabendo que as fases minerais constituintes dos diques são essencialmente potássicas, é razoável admitir que as composições isotópicas medidas para a rocha (incluindo toda a assembléia mineral) seria próxima àquelas do feldspato alcalino. Isso implica em interpretar os valores das razões isotópicas Pb/Pb obtidas como composições máximas dos magmas parentais.

Os valores das razões $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ e $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ iniciais de todo o conjunto de amostras refletem composições menos radiogênicas quando comparadas à média dos valores crustais segundo Stacey e Kramers (1975) (Fig. 31a). Significativa homogeneidade é observada especificamente entre as razões $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, as quais concentram-se em um intervalo estreito de valores, entre 16,01 e 16,56. Apenas duas amostras,

ambas do sub-enxame Manaira, apresentam valores discretamente mais elevados, em c. 17. As razões torogênicas $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ são igualmente homogêneas. Contrariamente, as razões $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ iniciais distribuem-se em uma faixa mais ampla de valores, entre 15,34 e 15,5, sugerindo contaminação (em proporções variáveis) com material antigo.

A representação gráfica dos dados isotópicos Pb/Pb está ilustrada na Figura 31, no modelo plumbotectônica de Doe e Zartmann (1979). A distribuição das amostras em ambos os gráficos correlacionando as razões $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ e $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ com $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ mostram clara similaridade com os valores definidos para um reservatório misto - o orógeno, cuja assinatura isotópica reflete a contribuição (em proporções não exatamente bem definidas) de manto e crostas, superior e inferior na gênese desses magmas.

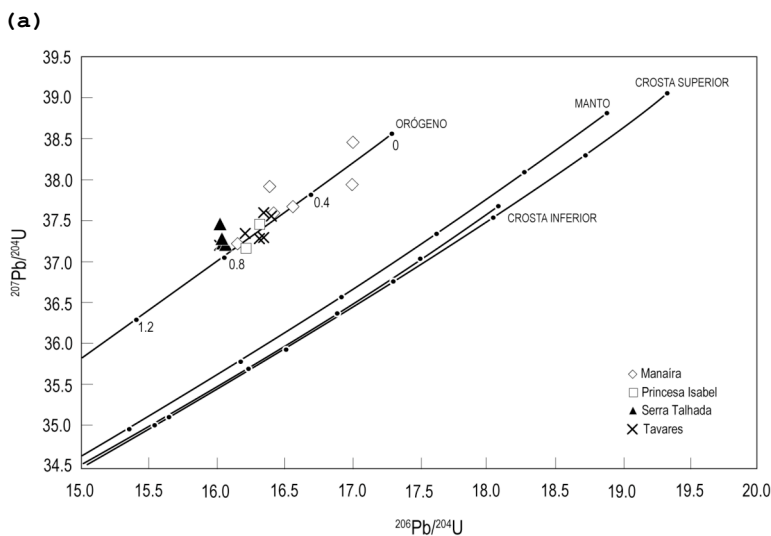
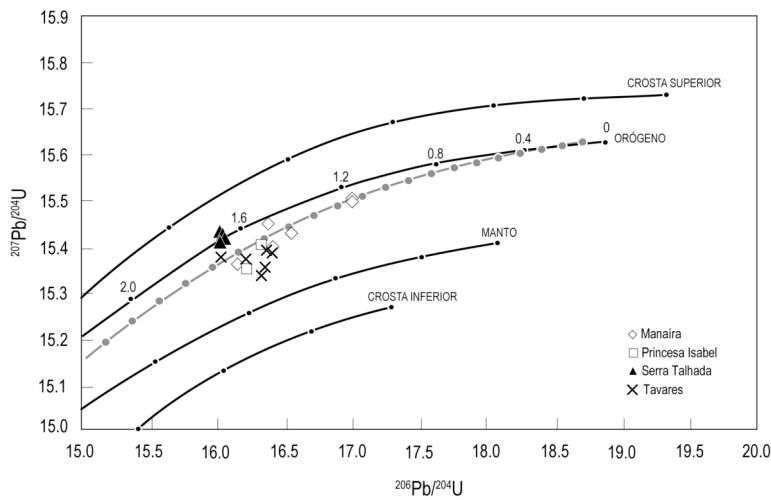


Figura 31. Diagramas de correlação entre razões $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ **(a)** e $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ **(b)** com razões $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ para as amostras dos sub-enxames Manaira, Princesa Isabel, Serra Talhada e Tavares - modelo plumbotectônica. Em (a): a curva em cinza representa a média dos valores crustais de Stacey e Kramers (1975), indicados para cada 100 Ma (de 0 a 2000 Ma). Os intervalos demarcados nas curvas da plumbotectônica (orógeno, manto e crostas) são de 400 Ma.

Tabela 3. Composição química de elementos maiores (% em peso) das rochas dos sub-enxames Manaíra, Princesa Isabel, Serra Talhada e Tavares.

Amostra	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃
DKMN-04	65.17	13.85	0.092	0.58	1.22	4.74	7.92	0.455	0.112	4.57
DKMN-05	64.89	13.62	0.100	0.66	1.68	4.21	8.36	0.456	0.121	4.72
DKMN-06	64.92	13.56	0.120	0.83	1.70	4.75	7.23	0.450	0.050	4.67
DKMN-08	64.12	13.14	0.093	0.89	2.13	4.10	8.67	0.621	0.0123	4.76
DKMN-09	64.70	12.63	0.104	0.75	2.39	3.84	9.24	0.438	0.109	4.89
DKMN-10	64.39	13.43	0.090	1.07	1.70	3.35	8.96	0.540	0.120	4.85
DKPI-01	63.06	12.56	0.174	1.00	1.34	2.78	10.65	0.641	0.223	6.00
DKPI-02	61.28	14.06	0.127	1.37	0.68	4.17	10.14	0.654	0.144	5.80
DKST-01	67.15	14.66	0.040	1.55	11.93	4.12	4.93	0.306	0.146	2.74
DKST-02	65.45	15.65	0.043	1.73	2.72	4.30	4.56	0.479	0.216	3.52
DKST-03	64.45	15.37	0.044	1.89	2.65	4.33	4.27	0.494	0.233	3.68
DKST-05	65.34	15.78	0.042	1.79	2.71	4.33	4.44	0.478	0.230	3.57
DKTV-01	60.16	15.78	0.079	1.04	0.36	1.71	13.56	0.403	0.229	4.75
DKTV-2A	58.29	12.62	0.131	1.32	3.81	2.26	10.00	0.782	0.383	6.81
DKTV-2B	62.11	14.70	0.070	1.17	0.37	1.99	12.29	0.704	0.193	5.09
DKTV-03	60.99	14.01	0.118	0.89	2.33	3.06	10.89	0.660	0.192	6.12
DKTV-04	52.62	10.73	0.174	2.75	4.43	2.13	9.61	0.979	0.321	8.82
DKTV-05	58.72	10.71	0.174	3.73	3.12	2.98	9.96	0.868	1.083	7.87

DKMN-04	66.02	14.03	0.093	0.59	1.24	4.80	8.02	0.46	0.113	4.63
DKMN-05	65.67	13.78	0.101	0.67	1.70	4.26	8.46	0.46	0.122	4.78
DKMN-06	66.06	13.80	0.122	0.84	1.73	4.83	7.36	0.46	0.051	4.75
DKMN-08	65.00	13.32	0.094	0.90	2.16	4.16	8.79	0.63	0.125	4.83
DKMN-09	65.29	12.75	0.105	0.76	2.41	3.88	9.32	0.44	0.110	4.93
DKMN-10	65.37	13.63	0.091	1.09	1.73	3.40	9.10	0.55	0.122	4.92
DKPI-01	64.07	12.76	0.177	1.02	1.36	2.82	10.82	0.65	0.227	6.10
DKPI-02	62.26	14.28	0.129	1.39	0.69	4.24	10.30	0.66	0.146	5.89
DKST-01	68.82	15.02	0.041	1.59	1.98	4.22	5.05	0.31	0.150	2.81
DKST-02	66.33	15.86	0.044	1.75	2.76	4.36	4.62	0.49	0.219	3.57
DKST-03	66.16	15.78	0.045	1.94	2.72	4.45	4.38	0.51	0.239	3.78
DKST-05	66.19	15.99	0.043	1.81	2.75	4.39	4.50	0.48	0.233	3.62
DKTV-01	61.34	16.09	0.081	1.06	0.37	1.74	13.83	0.41	0.234	4.84
DKTV-2A	60.46	13.09	0.136	1.37	3.95	2.34	10.37	0.81	0.397	7.06
DKTV-2B	62.94	14.90	0.071	1.19	0.37	2.02	12.45	0.71	0.196	5.16
DKTV-03	61.44	14.11	0.119	0.90	2.35	3.08	10.97	0.66	0.193	6.17
DKTV-04	59.47	10.89	0.177	2.79	4.49	2.16	9.075	0.99	0.326	8.95
DKTV-05	59.18	10.79	0.175	3.76	3.14	3.00	10.04	0.87	1.092	7.93

1. Os dados representam valores recalculados para uma base livre de LOI.

Tabela 5. Composição química de elementos traços (ppm) das amostras dos sub-exames Manaíra, Princesa Isabel, Serra Talhada e Tavares.

Amostra	Ba	Be	Cs	Ga	Hf	Nb	Rb	Sr	Ta	Th	U	V	Zr	Y	La	Ce	Pr
DKMN-04	3695	7	5.4	21.6	11.9	17.4	313	239	0.9	11.8	6.0	67	450	192.0	162.2	353.1	49.48
DKMN-05	4140	5	4.2	19.7	9.8	9.8	384	480	0.8	4.0	1.0	112	256	26.4	61.9	122.6	14.35
DKMN-06	2976	6	5.6	20.1	17.0	17.0	284	436	0.9	8.2	4.2	72	365	27.0	53.9	95.1	9.86
DKMN-08	3299	7	5.6	19.8	28.1	28.1	361	338	1.9	18.9	17.4	76	1086	57.1	44.8	87.9	10.37
DKMN-09	2994	8	5.0	19.0	8.2	8.2	356	757	0.6	20.3	3.2	87	230	13.3	35.4	76.5	8.84
DKMN-10	3458	8	4.3	20.2	19.5	19.5	384	326	1.0	24.0	5.4	72	439	35.4	102.4	183.9	19.19
DKPI-01	6456	10	1.8	19.7	15.6	15.6	337	404	0.7	11.6	5.0	140	363	39.8	85.8	152.7	17.09
DKPI-02	5643	6	3.1	20.5	15.9	15.9	347	525	0.9	3.3	2.9	99	327	27.7	44.6	81.6	9.42
DKST-01	1984	2	4.5	18.1	6.3	6.3	154	692	0.5	15.5	3.5	36	198	9.4	57.3	100.4	10.44
DKST-02	1840	2	3.8	20.2	5.7	5.7	142	884	0.4	10.5	2.8	51	192	8.5	52.0	94.5	10.33
DKST-03	1952	2	2.6	20.0	5.9	5.9	129	824	0.4	10.8	2.7	57	188	8.9	52.2	92.8	10.33
DKST-05	1832	2	2.7	20.3	5.9	5.9	130	901	0.4	11.0	2.6	52	195	8.9	52.5	93.1	10.21
DKTV-01	9769	5	6.9	14.2	7.4	7.4	482	700	0.4	6.6	3.1	65	220	41.3	57.7	95.6	12.18
DKTV-2A	5621	2	2.5	18.1	18.4	18.4	362	531	0.8	19.7	3.9	104	418	40.6	86.0	158.5	18.92
DKTV-2B	7606	4	2.6	15.5	13.5	13.5	405	427	0.9	10.6	1.1	73	230	20.5	54.4	103.7	12.17
DKTV-03	4427	5	3.5	19.3	9.5	9.5	374	558	0.7	9.0	2.2	98	252	36.4	63.2	125.7	14.82
DKTV-04	4040	7	3.6	14.8	14.2	14.2	294	476	1.0	14.8	2.8	129	353	117.2	229.8	255.3	44.61
DKTV-05	5612	5	2.8	14.0	12.2	12.2	337	920	0.8	7.9	2.1	107	263	44.6	117.9	228.1	27.55

Tabela 5. Continuação

Amostra	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Mo	Cu	Pb	Zn	Ni
DKMN-04	189.5	37.6	8.00	30.88	5.15	27.51	5.19	13.46	1.96	10.72	1.65	0.3	4.3	54.1	26	1.9
DKMN-05	54.1	11.1	2.33	7.89	1.19	5.92	0.94	2.46	0.35	2.06	0.34	0.1	33.2	55.7	25	4.8
DKMN-06	33.6	6.9	1.32	4.81	0.79	4.64	0.89	2.32	0.41	2.50	0.43	0.7	5.2	89.9	33	1.5
DKMN-08	40.2	9.0	2.09	6.65	1.17	7.90	1.80	6.07	1.14	7.17	1.06	2.6	11.4	73.2	39	1.9
DKMN-09	34.6	6.5	1.31	4.41	0.53	2.83	0.42	1.22	0.20	1.22	0.23	0.1	4.0	47.6	6	1.5
DKMN-10	65.7	12.4	2.34	7.51	1.21	7.08	1.12	3.18	0.55	3.10	0.45	0.1	4.7	38.4	25	1.6
DKPI-01	65.0	12.4	3.11	10.33	1.54	8.42	1.42	3.80	0.53	3.10	0.43	1.0	2.3	88.4	107	3.8
DKPI-02	34.1	6.4	1.17	4.51	0.76	4.52	0.91	2.88	0.51	2.63	0.42	1.5	18.3	70.5	67	8.5
DKST-01	34.8	4.9	1.03	2.49	0.37	2.02	0.28	0.83	0.14	0.84	0.12	<.1	2.1	49.2	49	42.1
DKST-02	34.8	5.1	1.16	2.50	0.36	1.88	0.30	0.69	0.10	0.70	0.12	0.1	18.7	29.4	50	28.4
DKST-03	35.0	5.4	1.08	2.61	0.35	1.94	0.31	0.76	0.10	0.72	0.11	1.8	13.6	21.7	45	32.5
DKST-05	35.3	5.2	1.14	2.65	0.35	1.99	0.29	0.76	0.10	0.63	0.11	0.2	16.9	22.5	46	31.3
DKTV-01	48.8	9.6	1.83	7.31	1.03	6.20	0.98	2.58	0.36	2.15	0.30	<.1	3.0	28.2	16	2.5
DKTV-2A	74.7	14.9	3.29	10.93	1.64	8.62	1.45	3.97	0.53	3.34	0.50	<.1	19.6	55.5	18	2.5
DKTV-2B	49.9	9.1	1.72	5.67	0.78	4.50	0.72	1.99	0.30	1.72	0.28	<.1	4.0	18.5	7	1.4
DKTV-03	58.7	12.0	2.82	9.34	1.39	7.62	1.24	3.31	0.44	2.75	0.41	<.1	5.8	33.1	28	4.5
DKTV-04	175.0	31.4	7.22	27.00	3.91	21.22	3.84	9.55	1.33	6.87	0.94	0.1	25.8	18.5	41	10.2
DKTV-05	112.0	21.2	4.23	14.16	1.86	9.55	1.58	3.93	0.54	3.44	0.44	0.1	3.2	27.2	29	2.3

Tabela 6. Dados isotópicos Rb-Sr e Sm-Nd das amostras dos sub-enxames Manaíra, Princesa Isabel, Serra Talhada e Tavares.

Amostra	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (atual)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$R_1\text{Sr}$	$\Sigma_{\text{Sr}}(0)$	$\Sigma_{\text{Sr}}(\tau)$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$R_1\text{Nd}$	$\Sigma_{\text{Nd}}(0)$	$\Sigma_{\text{Nd}}(\tau)$	TDM (Ga)
DKMN-04	0.727938	3.7966	0.69545	332.69	-118.5	0.511693	0.1137	0.511246	-18.43	-12.09	1.99
DKMN-05	0.728518	2.3194	0.70867	340.92	69.343	0.511581	0.1191	0.511113	-20.62	-14.69	2.26
DKMN-06	0.724666	1.8877	0.70851	286.25	67.084	0.511595	0.1110	0.511159	-20.35	-13.79	2.08
DKMN-08	0.735260	3.0985	0.70875	436.62	70.41	0.511655	0.1313	0.511139	-19.18	-14.18	2.44
DKMN-09	0.722250	1.3626	0.71059	251.95	96.603	0.511513	0.1129	0.511069	-2195	-15.54	2.23
DKMN-10	0.739028	3.4185	0.70978	490.11	85.044	0.511465	0.1067	0.511045	-22.88	-16.00	2.17
DKPI-01	0.729314	2.4186	0.70862	352.22	68.59	0.511434	0.1264	0.510937	-23.49	-18.12	2.66
DKPI-02	0.723857	1.9153	0.70747	274.76	52.233	0.511591	0.1115	0.511153	-20.42	-13.91	2.09
DKST-01	0.714951	0.6443	0.70944	148.35	80.215	0.511242	0.0815	0.510922	-27.33	-18.42	2.02
DKST-02	0.712011	0.4650	0.70803	106.61	60.25	0.511301	0.0851	0.510966	-26.08	-17.55	2.01
DKST-03	0.712006	0.4531	0.70813	106.54	61.614	0.511323	0.0851	0.510988	-25.65	-17.12	1.99
DKST-05	0.711811	0.4176	0.70824	103.78	63.162	0.511294	0.0845	0.510962	-26.22	-17.64	2.01
DKTV-01	0.707987	1.9923	0.69094	49.496	-182.6	0.511637	0.1212	0.511160	-19.53	-13.76	2.22
DKTV-2A	0.724190	1.9756	0.70729	279.49	49.636	0.511613	0.1442	0.511046	-19.99	-15.99	2.92
DKTV-2B	0.730716	2.7504	0.70718	372.12	48.168	0.511481	0.1095	0.511050	-22.57	-15.91	2.2
DKTV-03	0.724539	1.9424	0.70792	284.44	58.632	0.511560	0.1205	0.511086	-21.03	-15.21	2.32
DKTV-04	0.722765	1.7934	0.70742	259.26	51.54	0.511875	0.1196	0.511405	-14.88	-8.98	1.84
DKTV-05	0.716640	1.0607	0.70756	172.32	53.588	0.511716	0.1057	0.511300	-17.99	-11.02	1.83

Tabela 7. Dados isotópicos U-Th-Pb das amostras dos sub-enxames Manaíra, Princesa Isabel, Serra Talhada e Tavares.

Amostra	^{238}U	^{232}Th	$^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
DKMN-04	4.921E-08	4.31E-09	7.76	0.0875691	16.5552	15.4307	37.6755
DKMN-05	1.668E-08	3.879E-09	7.33	0.232496	16.1541	15.3632	37.2177
DKMN-06	3.42E-08	3.448E-09	7.60	0.1008113	16.4113	15.3986	37.5859
DKMN-08	7.883E-08	3.879E-09	8.24	0.0492055	17.0025	15.4999	37.9388
DKMN-09	8.466E-08	8.188E-09	7.58	0.0967143	16.3859	15.4497	37.9039
DKMN-10	1.001E-07	2.586E-09	8.24	0.0258329	17.0043	15.4949	37.4526
DKPI-01	4.838E-08	3.879E-09	7.50	0.080171	16.3153	15.4062	37.4749
DKPI-02	1.376E-08	2.155E-09	7.39	0.156563	16.2112	15.3538	37.1661
DKST-01	6.465E-08	1.724E-09	7.19	0.0266662	16.0246	15.428	37.4332
DKST-02	4.379E-08	1.724E-09	7.22	0.0393644	16.0509	15.4118	37.1964
DKST-03	4.504E-08	1.724E-09	7.20	0.038271	16.0364	15.4219	37.2377
DKST-05	4.588E-08	1.724E-09	7.19	0.0375751	16.0283	15.407	37.2069
DKTV-01	2.753E-08	3.879E-09	7.52	0.1409067	16.3316	15.3961	37.3101
DKTV-2A	8.216E-08	3.017E-09	7.37	0.0367168	16.1939	15.3769	37.3518
DKTV-2B	4.421E-08	3.017E-09	7.17	0.0682378	16.0056	15.3791	37.2283
DKTV-03	3.754E-08	3.448E-09	7.57	0.0918503	16.3832	15.3897	37.557
DKTV-04	6.173E-08	3.448E-09	7.52	0.05558549	16.3343	15.3571	37.6003
DKTV-05	3.295E-08	4.31E-09	7.49	0.1307995	16.3017	15.3393	37.2935

CAPÍTULO 5 - DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

5.1 NATUREZA DA FONTE

As composições geoquímica e isotópica de rochas com afinidade alcalina são controladas por seu ambiente tectônico, mais precisamente pelas características químicas do manto litosférico (e astenosférico) e da crosta continental a partir e através dos quais os magmas parentais se originaram e deslocaram. Suas composições isotópicas (Sr, Nd, Pb, e outros) são tipicamente heterogêneas, sugerindo a participação de fontes francamente empobrecidas (tipo-DM) a crustais, ou enriquecidas (Bonin, 2007).

Processos subseqüentes à fusão parcial na fonte podem modificar fortemente a assinatura geoquímica-isotópica final de magmas impossibilitando a definição precisa da natureza da fonte. Um dos processos que podem influenciar a composição de magmas é a assimilação durante ascensão na crosta. A depender da extensão da contaminação, as características geoquímica-isotópicas de magmas manto-derivados, por exemplo, poderão refletir assinaturas tipicamente crustais. Em se tratando de magmas originados a partir de fusão de manto anormalmente enriquecido, a questão é ainda mais problemática tendo em vista as similaridades entre este reservatório e a crosta (principalmente superior). Ferramentas geoquímicas e isotópicas (tais como aquelas aqui utilizadas) podem fornecer apenas resultados ambíguos, onde não é possível definir com clareza a tipologia da fonte.

Magmas com afinidade alcalina têm sido interpretados como derivados de fusão parcial, em pequenas proporções, de: manto litosférico enriquecido (p.ex., Dawson, 1987), manto astenosférico não-metassomatizado (depletado) (p.ex., Fitton, 1987) ou interação de líquidos astenosféricos com a litosfera sobrejacente (p.ex., Menzies, 1987). Origem a partir de "manto metassomatizado" é uma interpretação freqüente em trabalhos sobre magmas alcalinos a peralcalinos, tendo sido um termo introduzido explicitamente por Bailey (1972, e trabalhos subseqüentes) para explicar características químicas específicas desse tipo de magmatismo, associado a ambientes continentais. O enriquecimento em elementos traços incompatíveis [K, Rb, Sr, Ba, Th, U, ETR leves (e menos freqüentemente Nb, Zr, Ti, P)] relativo às abundâncias primitivas/condríticas é particularmente diagnóstico desse tipo de reservatório. Sendo assim, metassomatismo pode ser reconhecido (i) por

mudanças mineralógicas/texturais visíveis, com neo-formação de fases hidratadas (anfíbólio, flogopita) ricas em naqueles elementos - dito 'patente' (Dawson 1984; Nielson e Noller 1987; Wilshire 1987) ou simplesmente por (ii) enriquecimento anômalo em elementos incompatíveis sem necessariamente estar acompanhado de evidências petrográficas. As abundâncias anômalas nesses elementos estariam vinculadas à participação de um agente metassomático, o qual poderia ser representado por fusões silicáticas ou fluidos aquosos(/carbonatados) interagindo com o manto peridotítico originalmente depletado, mas fértil (Roden e Murthy, 1985; Tatsumi e Eggins, 1995). Zonas de subducção representariam, portanto, um cenário geodinâmico típico para esse processo.

Reconhecer magmas gerados a partir de fusão de manto metassomatizado implica em observar nestes características geoquímicas e isotópicas indicativas de enriquecimento anômalo. Esse padrão geoquímico é largamente reconhecido na composição dos diques da região de Manaíra-Princesa Isabel. Em conjunto, o padrão geral dos espectros de elementos incompatíveis (Fig. 26) e terras raras leves (Fig. 28) de todas as amostras, dos quatro sub-enxames, são semelhantes entre si, mostrando teores na ordem de 100 a 1000 vezes as proporções condriticas, e sugerindo uma fonte comum. Além do típico enriquecimento em Rb, Ba, Th, U e K, e ETR leves, a anomalia negativa em Nb é uma feição marcante. A combinação de padrões fortemente fracionados em ETR leves com relação aos pesados e anomalias negativas em Nb é compatível com fusão (em pequenas proporções) de uma fonte tipo granada-peridotito. A presença de granada como fase residual na fonte implicaria na retenção de ETR pesados e Nb, explicando as depleções relativas nestes elementos.

O envolvimento de um manto tipo granada-peridotito anormalmente enriquecido vem sendo sugerido como fonte comum para o magmatismo máfico shoshonítico (Jardim de Sá, 1994; Ferreira *et al.*, 1998; Hollanda *et al.*, 2002) e alcalino-peralcalino ultrapotássico (Ferreira *et al.*, 1994; Ferreira *et al.*, 1998; Guimarães *et al.*, 2005) neoproterozóico na Província Borborema oriental. Aliados às características geoquímicas comentadas, somam-se as informações trazidas pelas assinaturas isotópicas Sr-Nd desses magmas. As altas razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ iniciais ($> 0,707$) e valores fortemente negativos de $\epsilon\text{Nd}(600)$ (em geral < -12) obtidos para os diques estudados endossam a interpretação de uma fonte originalmente enriquecida. Dados $\delta^{18}\text{O}$ c. +8% a +10% (Sial e Ferreira, 1990; Ferreira *et al.*, 1998) confirmam derivação a partir do manto. Por causa do rápido transporte e resfriamento inerente a diques, é razoável supor que contaminação crustal não tenha sido um processo pervasivo. A relativa

homogeneidade composicional e ausência de correlação entre elementos altamente incompatíveis com variação em sílica (Fig. 27) sugere que a assimilação não foi determinante em modificar a assinatura geoquímica-isotópica original.

Uma consequência do enriquecimento metassomático é o fracionamento de Sm em relação a Nd, ou seja, as razões Sm/Nd na fonte tendem a decrescer durante o processo. O comportamento consistente entre esses elementos faz com que o sistema Sm-Nd seja útil na determinação da mais possível idade do evento metassomático. Por exemplo, altas razões $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (= ϵNd positivos) sugerem que a fonte tenha razões Sm/Nd maiores que (ou similares a) os valores condríticos. Esse comportamento combinado com enriquecimento em elementos incompatíveis indicam que o intervalo de tempo decorrido entre enriquecimento e fusão parcial da fonte foi relativamente curto; ao contrário, razões Sm/Nd baixas ($< 0,12$) associadas a baixas razões $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ indicam que o evento metassomático foi antigo (Cohen *et al.*, 1984; Roden e Murthy, 1985). De fato, os valores de ϵNd muito negativos combinados a razões $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ baixas determinados nas amostras estudadas permitiram calcular idades TDM paleoproterozóicas, entre 1,8-2,2 Ga. Isso é fortemente sugestivo de que o evento metassomático capaz de imprimir uma assinatura enriquecida ao manto litosférico regional pode estar relacionado a processos de acreção crustal (em um cenário de margem convergente) paleoproterozóicos, como já discutido amplamente na literatura. Esse manto enriquecido teria permanecido preservado até o Neoproterozóico, quando então teria sido gradativamente fundido para gerar os magmas parentais dos inúmeros como granitóides e sieníticos que intrudem a região.

5.2 IMPLICAÇÕES REGIONAIS

Os dados campo e as observações microtexturais indicam que o alojamento dos diques ocorreu em crosta relativamente rasa. Bordas resfriadas foram observadas nos diques intrusivos em metasedimentos de baixo grau a oeste da cidade de Manaíra e no sub-enxame Tavares. Neste último, são comuns texturas sub-vulcânicas caracterizadas por fenocristais euhédricos a sub-euhédricos de K-feldspato imersos em uma matriz homogênea, muito fina. No sub-enxame Manaíra são comuns a presença de apófises e corpos satélites ao dique principal cortando em alto ângulo a foliação metamórfica regional. É importante salientar que os diques não

estão deformados pela tectônica regional e nem estão afetados pelo metamorfismo de baixo grau.

O enxame de diques estudado corta todas as estruturas do embasamento regional entre a Zona de Cisalhamento Juru-Belém e o sienito de Triunfo, o qual é representado por rochas eo-neoproterozóicas do domínio Alto Pajeú, Complexo Riacho Gravatá e os granitóides brasileiros de Tavares e Princesa Isabel (cf. Fig. 2). Assim, o magmatismo alcalino fissural foi uma feição tardia neste setor da Zona Transversal. Não existem dados geocronológicos disponíveis para o granito de Princesa Isabel, porém idades U/Pb em zircão no batólito de Tavares mostraram idades de cristalização em torno de 630 Ma (Brito Neves *et al.*, 2003). Esta idade seria, portanto, a idade máxima para o alojamento do enxame de diques de Manaíra - Princesa Isabel. As idades U/Pb (SHRIMP) em zircão de um dique do sub-enxame Manaíra e idades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ em anfibólio de um dique do sub-enxame Tavares são consistentes com as observações de campo, mostrando que o enxame resfriou rapidamente na crosta rasa, entre 600-605 Ma. Esses resultados indicam que o bloco crustal compreendido entre a Zona de Cisalhamento Juru-Belém e o sienito de Triunfo possui idades de resfriamento bastante precoces quando comparadas a outros setores da Zona Transversal, em geral entre 540 e 490 Ma (Monié *et al.* 1997; Corsini *et al.*, 1998; M.H.B.M. Hollanda, dados inéditos).

Em grande parte da porção setentrional da Província Borborema, entre o Lineamento Patos e a Zona de Cisalhamento Senador Pompeu (Fig. 1), o pico do magmatismo granítico acompanhando de metamorfismo de alto grau está datado entre 575 e 585 Ma (Souza *et al.*, 2006). Ou seja, parte substancial da província estaria sendo invadida por granitos e deformando em alta temperatura na crosta intermediária. Um número restrito de plútons graníticos com idades similares também são encontrados na Zona Transversal - Itaporanga (585 Ma, Brito Neves *et al.*, 2003), Campina Grande, Serra Redonda e Serra Branca (580-575 Ma, Guimarães *et al.*, 2004, Archanjo *et al.*, 2008). Como a idade do enxame de diques de Manaíra-Princesa Isabel é c. 600 Ma, significa que parte da Zona Transversal poderia estar sendo exumada, preservada do forte evento tectono-magmático que afetou o domínio Seridó-Jaguaribe, em torno de 580 Ma. Ou ainda, que a anomalia térmica regional relacionada ao alojamento desses plútons brasileiros não foi suficiente para "re-equilibrar" o sistema isotópico $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ do anfibólio nos diques, cuja temperatura de fechamento é estimada em c. 500-550°C.

5.3 CONCLUSÕES

A partir dos dados obtidos, pode-se concluir:

1. Os diques dos sub-enxames Manaíra, Princesa Isabel e Tavares constituem nefelina sienitos (sub-enxame Tavares) e sienitos (sub-enxames Manaíra e Princesa Isabel) supersaturados em sílica, com afinidade peralcalina a sub-metaluminosa (ou fracamente metaluminosa), potássica a ultrapotássica (K_2O entre c. 7-13%; $K_2O/Na_2O > 2$). Por sua vez, o sub-enxame Serra Talhada é representado por álcali-granitos, com afinidade peraluminosa.
2. O forte enriquecimento em elementos incompatíveis aliado à razões $^{87}Sr/^{86}Sr$ e $^{143}Nd/^{144}Nd$ (= ϵNd negativos) muito radiogênicas, comuns a todos os sub-enxames, sugere uma fonte comum, provavelmente o manto litosférico enriquecido. Anomalias negativas em Nb apontam para um componente de subducção como responsável pela modificação metassomática desse manto.
3. Razões $^{206,207,208}Pb/^{204}Pb$ baixas sugerem a participação de um componente não-radiogênico interagindo com o manto litosférico enriquecido. A definição desse componente não é crítica e carece de estudos mais refinados e abrangentes.
4. Idades modelo Sm-Nd entre 1,8-2,2 Ga (somados à razões $^{207}Pb/^{206}Pb$ variáveis) indicam que o evento metassomático deve ter sido antigo, provavelmente relacionado à geração de crosta (em ambiente de arco) paleoproterozóica na região.
5. Dados U/Pb SHRIMP em zircão e $^{40}Ar/^{39}Ar$ em anfibólio indicam idade c. 600 Ma para o magmatismo alcalino fissural na região de Manaíra-Princesa Isabel. Esse resultado é importante para definir o cenário geodinâmico contrastante de partes da porção oriental da Província Borborema durante o Neoproterozóico, entre 630-580 Ma.

REFERÊNCIAS

- Accioly, A.C. 2000. Geologia, geoquímica e significado tectônico do Complexo Metanortosítico de Passira - Província Borborema - Nordeste Brasileiro. *Tese de Doutorado*. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, 168 pp.
- Almeida, C.N.; Guimarães, I.P.; Silva Filho, A.F. 2002. A-Type Post-Collisional Granites in the Borborema Province - NE Brazil: The Queimadas Pluton. *Gondwana Research*, **5** (3): 667-681.
- Almeida, F.F.M.; Hasui, Y.; Brito Neves, B.B.; Fuck, R.A. 1981. Brazilian structural provinces: An introduction. *Earth-Science Reviews*, **17** (1-2): 1-29
- Archanjo, C.J.; Fetter A. 2004. Emplacement setting of the granite sheeted pluton of Esperança (Brasiliano orogen, northeastern Brazil). *Precambrian Research*, **135** (3): 193-215.
- Archanjo, C.J.; Hollanda, M.H.B.M.; Macedo, J.W.P.; Armstrong, R.; Nutman, A.P.; Vasconcelos, P.M.. 2007. Geocronologia (U/Pb) SHRIMP, Ar/Ar) do Batólito de Teixeira-PB, Província Borborema. In XI Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos. Natal-RN. *Anais* p. 347.
- Archanjo, C.J.; Hollanda, M.H.B.M.; Rodrigues, S.W.O.; Brito Neves, B.B.; Armstrong, R. 2008. Abrics of pré- and syntectonic granite plutons and chronology of shear zones in the Eastern Borborema Province, NE Brazil. *Journal of Structural Geology*, **30**: 310-326.
- Babinsky, M.; Van Schums.; W.R., Chemale Jr., F. 1999. Pb-Pb dating and Pb isotope geochemistry of Neoproterozoic carbonate rocks from the São Francisco Basin, Brazil: implications for the mobility of Pb isotopes during tectonism and metamorphism. *Chemical Geology*, **160**: 177-199.
- Bittar, S.M.B.; 1998. Faixa Piancó-Alto Brigida: Terrenos tectono-estratigráficos sob regimes metamórficos e deformacionais contrastantes. *Tese (Doutorado)- Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo*. 126p.
- Bonin, B. 2007. A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems and prospects. *Lithos*, **97**: 1-29.
- Brito Neves, B.B.; Campos Neto, M.C.; Van Schmus, W.R.; Fernandes, T.M.G.; Souza, S.L. 2001. O Terreno Alto Moxotó no leste da Paraíba ("Maciço Caldas Brandão"). *Revista Brasileira de Geociências*, **31** (2): 185-194.
- Brito Neves, B.B.; Passarelli, C.R.; Basei, M.A.S.; Santos, E.J. 2003. Idades U-Pb em zircão de alguns granitos clássicos da província Borborema. *Geologia USP*, **3** (1): 25-38.
- Brito Neves, B.B.; Santos, E.J.; Van Schmus, W.R. 2000. Tectonic history of the Borborema Province, northeastern Brazil. Em: U.G. Cordani, E.J. Milani, A. Thomaz Filho, D.a. Campos (eds). *Tectonic Evolution of South América*. 31^o International Geological Congress, Rio de Janeiro. 151-182.
- Brito Neves, B.B.; Van Schmus, W.R.; Kozuch, M.; Santos, E.J.; Petronilho, L. 2005. A zona tectônica Teixeira-Terra Nova - ZTTTN, fundamentos da geologia regional e isotópica. *Geologia USP: Série Científica*, **5** (1): 57-80.
- Cohen, R.S.; O'Nions, R.K.; Dawson, J.B. 1984. Isotope geochemistry of xenoliths from East Africa: implication for development of mantle reservoirs and their interaction. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **68**: 209-220.
- Compston, W.; Williams, I.S.; Kirshhvk, J.L.; Zang, Z.; Ma, G. 1992. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time scale. *Journal of Geological Society, London*. **149**: 171-184.
- Corsino, M.; Lambert-Figuereido, L.; Caby, R.; Feraud, G.; Ruffett, G.; Vauchez, A. 1998. Thermal history of the Pan-African/Brasiliano Borborema Province of northeast Brazil deduced from ³⁹Ar/⁴⁰Ar analysis. *Tectonophysics*, **285**: 103-117.

- Cox, K.G.; Bell, J.D., Pankhurst, R.J. 1979. *The interpretation of igneous rocks*. George, Allen & Unwin, London, 449pp.
- Dawson, J.B. 1984. Contrasting types of upper-mantle metasomatism? In: *Kimberlites II: The mantle and Crust-Mantle Relationships*, ed. J. Kornprobst, pp. 289-294. Amsterdam: Elsevier, 393pp.
- Dawson, J.B. 1987. The kimberlite clan: relationship with olivine and leucite lamproites, and inferences on upper mantle metasomatism. In: Fitton, J.G., and Upton, B.G., eds. *Alkaline igneous rocks. Geol. Soc. Am. Spec. Publ.*, **30**: 95-1001.
- Deer, W.A.; Howie, R.A.; Zussman, J. 1992. *An Introduction to the Rock-Forming Minerals*. Second edition. Longman, London, 668pp.
- Deino, a.; Potts, R. 1990. Single-crystal $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the Ologuesailie Formation, southern Kenya rift. *J Geophys Res.* **95**: 8453-8470.
- Droop, G.T.R. 1987. A general equation for estimating Fe^{3+} concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria. *Mineralogical Magazine*, **51**: 431-435.
- Ferrerira, M.A.F.; Ferreira, V.P.; Sial, A.N.; Pimentel, M.M. 2002. Origin and intensive parameters in the crystallization of ultrapotassic syenites: The Serra do Man ploton, northeastern Brazil. *Gondwana Research*, **5** (2): 275-285.
- Ferreira, V.P.; Sial, A.N. 1994. The peralkalic magmatism in the Precambrian Cachoeirinha-Salgueiro foldbelt, Northeast Brazil: Geochemical aspects. *Rev. Bras. Geoc.*, **16** (1): 78-85.
- Ferreira, V.P.; Sial, A.N.; Jardim de Sá, E.F. 1998. Geochemical and isotopic signatures of Proterozoic granitoids in terranes of the Borborema structural province, northeastern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **11**: 439-455.
- Ferrerira, V.P.; Sial, A.C.; Pimentel, M.M.; Moura, C.A.V. 2004. Intermediate to acid magmatism and crustal evolution in the Transversal Zone, northeastern Brazil. *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. 189-201.
- Ferreira, V.P.; Sial, A.N.; Whitney, J.A. 1994. Large-scale silicate liquid immiscibility: a possible example from northeastern Brazil. *Lithos*, **33** (4): 285-302.
- Fetter, A.H.; Saraiva dos Santos, T.J.; Van Schmus, W.R.; Hackspacher, P.C.; Brito Neves, B.B.; Arthaud, M.H.; Nogueira, J.A.; Wernick, E. 2003. Evidence for Neoproterozoic Continental Arc Magmatism in the Santa Quitéria Batholith of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: Implications for the Assembly of West Gondwana. *Gondwana Research*, **6** (2): 265-273.
- Fitton, J.G. 1987. The Cameron Line, West Africa: a comparison between oceanic and alkaline volcanism. In: Fitton, J.G., Upton, B.G. (Eds), *Alkaline Igneous rocks. Geol. Soc. Am. Spec. Publ.*, **30**: 273-291.
- Guimarães, I.P.; Da Silva Filho, A.F.; Almeida, C.N.; Van Schmus, W.R.; Araújo, J.M.M.; Melo, S.C.; Melo, E.B. 2004. Brasiliano (Pan-African) granitic magmatism in the Pajeú-Paraíba belt, Northeast Brazil: an isotopic and geochronological approach. *Precambrian Research*, **135** (1-2): 23-53.
- Guimarães, I.P.; Da Silva Filho, A.f.; Melo, S.c.; Macambira, M.B. 2005. Petrogenesis of A-Type Granitoids from the Alto Moxoto and alto Pajeú Terranes of the Borborema Province, NE Brazil: Constraints from Geochemistry and Isotopic Compositions. *Gondwana Research*, **8** (3): 347-362.
- Hollanda, M.H.B.M.; Archanjo, C.J.; De Souza, L.C.; Liu, D.; Armstrong, R. 2007. U/Pb Shrimp Geochronology of the Augén Gneisses from the Seridó Belt

- (Borborema Province): Geodynamic Significance. In XI Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos. Natal-RN. *Anais* p. 347.
- Jardim de Sá, E.F. 1994. A FSe (Província Borborema, NE do Brasil) e o seu significado geodinâmico. In SBG, Cong. Brás. Geol., 39, Salvador, *Anais*, **6**: 57-59.
- Kozuch, M. 2003. Isotopic and trace elements geochemistry of Early Neoproterozoic gneissic and metavolcanic rocks in the Cariris Velhos Orogen of the Borborema Province, Brazil, and their bearing on tectonic setting. *Tese de Doutorado*, University of Kansas, 199 pp.
- Leake, B.E. (Chairman). 1997. Nomenclature of amphiboles: report of the Subcommittee on Amphiboles of The International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names. *Eur. J. Mineral.*, **9**: 623-651.
- Liégeois, J.P.; Black, R. 1987. Alkaline magmatism subsequent to collision in the Pan-African belt of the Adrar des Iforas. In: Fitton, J.G., Upton, B.G. (Eds), Alkaline Igneous rocks. *The Geological Society, Blackwell, Oxford*(**30**): 381-401
- Ludwig, K.R. 2003. Isoplot 3.00: a geochronological toolkit for Microsoft Excel® (revised version). Berkeley Geochronological Center, Special Publ. 4, Berkeley, California, 70p.
- Ludwig, K.R. 2000. SQUID 1.00. A user manual. Berkeley Geochronology Center Spec. Publ., vol. 2. Berkeley, CA, 17p.
- McDougall, I.; Harrison, T.M. 1999. Geochronology and Thermochronology by the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Method, 2nd ed., Oxford: Oxford University Press, 269p.
- Menzies, M. 1987. Alkaline rocks and their inclusions: a window on the earth's interior. In: Fitton, J.G., Upton, B.G. (Eds), Alkaline Igneous rocks. *Geol. Soc. Spec. Publ.*, (**30**): 15-27.
- Monié,).; Caby, R.; Arthaud, M.N. 1997. The Neoproterozoic Brasiliano orogeny in Northern Brazil: $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ and ptostructural data from Ceará. *Precambrian Research*, **81**: 241-264.
- Mori, P.E.; Reeves, S.; Correia, C.T.; Hauka, M. 1999. Development of a fused glass disc xrf facilitate and comparison with the pressed powder pellet technique al Instituto de Geociências, São Paulo University. *Revista Brasileira de Geociências*, **29** (3): 441-446.
- Morimoto, N. 1990. Nomenclatura de piroxênios. Tradução do original em inglês "nomenclature of pyroxenes" realizada com a permissão da IMA por GARDA, M.G. e ATENCIO, D. *Revista Brasileira de Geociências*, **20** (1-4): 318-328.
- Neves, S.P.; Bruguier, O.; Vauchez, A.; Bosch, D.; Rangel da Silva, J.M.; Mariano, G. 2006. Timing of crust formation, deposition of supracrustal sequences, and Transamazonian and Brasiliano metamorphism in the East Pernambuco belt (Borborema Province, NE Brazil): Implications for western Gondwana assembly. *Precambrian Research*, **149** (3-4): 197-216.
- Rieder, M. 1999. Nomenclature of the micas. *Mineral. Mg.*, **63**: 267-279.
- Reynolds, P.H.; Mueke.; G.K. 1978. Age studies on slates: Applicability of the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ step-wise outgassing method. *Earth Planet Science Letters*, **40**: 11-118.
- Roden, M.f.; Murthy, V.R. 1985. Mantle metasomatism. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **13**: 269-296.
- Sá, J.M.; Bertrand, J.M.; Leterrier, J.; Macedo, M. H. F. 2002. Geochemistry and geochronology of pre-Brasiliano rocks from the Transversal Zone, Borborema Province, Northeast Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **14** (8): 851-866.

- Santos, E.J. 1996 Ensaio preliminar sobre terrenos e tectônica acrescionária na Província Borborema In SBG, Congresso Brasileiro de Geologia , 39, Salvador. *Anais* **6**: 47-50.
- Sial, A.N. 1986. Granite types of northeast Brazil: current knowledge. *Revista Brasileira de Geociências*, **16**: 54-72.
- Sial, A.N.; Ferreira, V.P. 1988. Brasiliano age peralkaline plutonic rocks of the Central structural domain, NE Brazil. *Redic. Soc. Italiana Miner. Petrol.*, **43**: 103-112.
- Sial, A.N.; Ferreira, V.P. 1990. Granitoids in northeastern Brazil: oxygen and sulfure isotope compositions and depth of emplacement. *J.S. Am. Earth Sci.*, **3** (2-3): 103-112.
- Souza, Z.S.; Montel, J.M.; Giogia, S.M.L.C.; Hollamna, M.H.B.M.; Nascimento, M.A.L.; Jardim de Sá, E.F.; Amaro, V.E.; Pimentel, M.; Laurdeaux, J.M.; Veschambre, M. 2006. Electron microprobe dating monazite from high-T shear zones in the São José de Campestre massif, NE Brazil. *Gondwana research*, **9**: 441-455.
- Stacey, J.S.; Krammers, J.D. 1995. Aproximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth Planet. Sci. Lett.* **26**: 207-21.
- Streckeisen, A. 1976. To each plutonic rocks its proper name. *Earth Sci. Rev.*, **12**: 1-33.
- Turner, G. 1969. Thermal histories of meteorites by the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ method. In: MILLMAN PM (ed), *Meteorite Research*, Reidel: Dordrecht, p. 407-419.
- 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 Sciences*, **8**: 267-288.
- Vasconcelos, P.M.; Onoe, A.T.; Kawashita, K.; Soares, A.J.; Teixeira W. 2002. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geocronology at the Instituto de Geociências, USP: instrumentation, analytical procedures, and calibration. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **74** (2): 297-342.
- Vasconcelos, P.M. 1999a. K-Ar and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geocroology of weathering processes. *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences*, **27**: 183-229.
- Williams, I.S.; Claesson, S. 1987. Isotopic evidence for the Precambrian provenance and Caledonian metamorphism of high grade paragneisses from Seve Nappes, Scandinavian Caledonides. II. Ion microprobe zircon U-Th-Pb. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, **97**: 205-217.
- Wilshire, H.G. 1984. Mantle metasomatism: The REE story. *Geology*, **(12)**: 395-398.

ANEXO I

TABELAS DE DADOS GEOCRONOLOGICOS $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$

TABELAS DE ANÁLISES QUÍMICAS DE MINERAIS

TABELA 1. Dados Ar-Ar para anfibólio do subexame de Tavares

Run_ID	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar	Erro	³⁸ Ar/ ³⁹ Ar	Erro	³⁷ Ar/ ³⁹ Ar	Erro	³⁶ Ar/ ³⁹ Ar	Erro	⁴⁰ Ar*/ ³⁹ Ar	Erro	% Rad	Erro	⁴⁰ Ar (mols)	Edade (Ma)	Erro (Ma)
A1/7Ar-760					1547.910	39.0497	3.1999	0.9960							
4499-01a	357.00	13.00	0.1427	0.0092	4.590	0.7500	0.7520	0.0320	139.90	7.70	37.9	1.4	6.54E-15	733.0	34.0
4499-01B	111.10	2.50	0.0080	0.0034	0.500	0.4000	0.0044	0.0055	109.80	3.00	98.9	1.5	3.29E-15	613.0	14.0
4499-01C	109.40	1.60	0.0146	0.0017	1.120	0.2000	0.0023	0.0025	108.90	1.80	99.5	0.7	6.72E-15	608.6	8.6
4499-01D	105.50	1.10	0.0116	0.0013	1.200	0.1200	-0.0009	0.0015	105.90	1.20	100.3	0.5	9.89E-15	594.7	5.9
4499-01E	103.30	1.80	0.0076	0.0024	1.200	0.2800	0.0000	0.0035	103.50	2.10	100.1	1.0	4.53E-15	583.0	10.0
4499-01F	102.50	5.60	-0.0018	0.0078	4.990	0.9500	0.0000	0.0110	103.30	6.50	100.4	3.2	1.34E-15	582.0	32.0
4499-01G	106.00	10.00	0.0010	0.0140	10.200	1.9000	-0.0960	0.0230	136.00	15.00	127.4	6.2	7.18E-16	734.0	67.0
4499-01H	107.40	3.40	0.173	0.0044	2.510	0.5000	-0.0063	0.0057	109.70	3.90	101.9	1.6	2.45E-15	613.0	19.0
4499-01I	65.20	8.40	0.0130	0.0170	1.7000	2.1000	-0.0400	0.0310	77.00	14.00	118.0	14.0	3.46E-16	452.0	71.0
A1/7Ar-761					1533.504	31.9882	2.9533	1.0071							
4499-02A	228.40	6.50	0.0669	0.0061	8.100	0.6400	0.2690	0.0120	150.60	5.40	65.5	1.3	5.17E-15	797.0	23.0
4499-02B	113.30	1.40	0.0082	0.0017	1.390	0.2000	0.0083	0.0032	111.00	1.17	97.9	0.9	7.42E-15	618.9	8.2
4499-02C	107.50	1.20	0.139	0.0013	1.240	0.1500	0.0008	0.0018	107.50	1.30	99.9	0.5	8.69E-15	602.1	6.2
4499-02D	105.70	1.60	0.0145	0.0023	1.370	0.2700	-0.0017	0.0026	106.40	1.80	100.6	0.8	5.61E-15	597.0	8.5
4499-02E	99.10	3.90	0.0054	0.0066	10.010	0.8300	-0.0380	0.0100	111.90	5.40	112.1	3.1	1.61E-15	623.0	25.0
4499-02F	95.70	3.50	0.0136	0.0060	11.920	0.8700	-0.0019	0.0086	98.00	4.50	101.5	2.8	1.70E-15	556.0	22.0
4499-02G	92.30	4.90	0.0172	0.0083	3.550	0.9800	-0.0250	0.0120	100.10	6.50	108.3	4.0	1.13E-15	567.0	31.0
A1/7Ar-762					11647.897	31.5262	3.0019	1.0054							
4500-01A	98.90	1.30	0.0173	0.0021	15.200	0.3300	0.0606	0.0036	83.10	1.60	83.1	1.1	5.93E-15	482.1	8.1
4500-01B	76.10	1.10	0.0098	0.0019	14.360	0.3900	0.0092	0.0027	75.30	1.40	97.9	1.1	4.18E-15	441.7	7.2
4500-01C	85.60	1.00	0.0123	0.0017	5.560	0.2200	0.0014	0.0020	86.00	1.20	100.0	0.7	5.83E-15	496.6	6.1
4500-01D	102.07	0.65	0.0125	0.0008	1.699	0.0850	0.0026	0.0011	101.51	0.74	99.4	0.4	1.77E-14	573.6	3.6
4500-01E	99.74	0.58	0.0127	0.0005	1.219	0.0630	0.0002	0.0007	99.87	0.62	100.1	0.3	2.26E-14	565.5	3.0
4500-01F	90.70	1.00	0.0105	0.0013	1.320	0.1600	-0.0020	0.0016	91.40	1.10	100.8	0.6	7.92E-15	524.0	5.7
4500-01G	87.10	1.10	0.0106	0.0016	0.450	0.1500	-0.0010	0.0023	87.40	1.30	100.4	0.8	6.48E-15	503.9	6.6
4500-01H	88.69	0.57	0.0106	0.0006	0.378	0.0540	-0.0011	0.0006	89.08	0.60	100.4	0.3	2.23E-14	512.2	3.0
4500-01I	90.37	0.92	0.0088	0.0012	0.470	0.1300	-0.0011	0.0018	90.80	1.10	100.4	0.6	8.93E-15	520.7	5.4
A1/7Ar-763					115017.50	27.4684	2.9311	1.0081							
4500-02A	207.00	17.00	0.0870	0.0140	94.200	7.9000	0.4110	0.0420	99.00	12.00	44.8	3.8	1.55E-15	563.0	60.0
4500-02B	96.60	5.80	0.0258	0.0098	7.400	1.3000	-0.0320	0.0170	107.20	8.30	110.4	5.3	9.58E-16	601.0	40.0
4500-02C	118.60	4.40	0.0269	0.0056	1.810	0.7900	-0.0177	0.0083	124.20	5.20	104.5	2.1	2.00E-15	680.0	24.0
4500-02D	109.30	1.20	0.0159	0.0013	1.620	0.1700	0.0031	0.0023	108.60	1.40	99.3	0.7	8.84E-15	607.5	6.4
4500-02E	108.00	1.60	0.0160	0.0022	1.610	0.2900	0.0017	0.0035	107.80	1.90	99.7	1.0	5.33E-15	603.4	9.2
4500-02F	99.50	8.50	0.0180	0.0120	5.200	2.2000	-0.0070	0.0210	102.00	11.00	102.6	6.3	6.99E-16	578.0	53.0
4500-02G	93.20	7.70	0.0230	0.0120	19.700	2.7000	-0.0080	0.0180	98.40	9.90	104.0	5.8	7.16E-16	558.0	48.0
4500-02H	96.00	12.00	0.0390	0.0180	31.400	5.0000	0.0050	0.0290	99.00	15.00	100.9	9.1	4.71E-16	561.0	75.0
4500-02I	138.00	41.00	0.0640	0.0480	7.100	8.0000	-0.0270	0.0640	148.00	48.00	106.0	14.0	2.90E-16	780.0	210.0

TABELA 3. Composição química, em porcentagem de peso, de piroxênios das rochas do subenxame de Manaíra.

Amostra	DKMN-04								DKMN-08								DKMN-09		DKMN-11	
	1	2		3	4	5		1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	1		
Análise	b	c	b	b	b	c	b	c	b	c	c	c	c	c	c	c	b	c	b	
Localização	b	c	b	b	b	c	b	c	b	c	c	c	c	c	c	c	b	c	b	
SiO ₂	52,269	51,723	52,39	51,483	51,782	52,027	51,883	52,658	52,83	52,489	52,387	52,941	52,184	52,18	52,444	52,002	51,983	53,869	53,336	52,428
TiO ₂	1,339	0,766	0,994	1,368	1,306	0,472	1,479	0,596	2,445	0,474	0,552	0,62	0,719	0,394	0,594	0,554	0,446	1,954	0,215	2,886
Al ₂ O ₃	0,516	0,413	0,498	4,117	0,508	0,811	1,121	0,571	0,366	1,38	0,797	0,646	0,711	0,882	0,958	0,53	1,233	0,347	0,291	1,487
FeO	28,313	23,196	25,082	26,673	27,405	19,021	27,092	18,591	27,029	17,899	16,351	16,128	16,945	16,921	18,652	17,325	14,645	19,408	16,921	25,275
MnO	0,206	0,532	0,519	0,258	0,296	0,407	0,317	0,411	0,333	0,359	0,372	0,367	0,343	0,381	0,405	0,399	0,353	0,594	0,471	0,154
MgO	1,168	4,066	2,659	1,228	2,002	6,663	1,538	7,112	1,567	7,404	8,197	8,161	7,802	8,386	6,522	7,964	9,254	4,819	7,761	1,741
CaO	2,445	9,105	4,159	2,764	4,739	13,387	3,63	13,908	3,089	14,34	15,693	15,181	14,783	16,374	12,341	15,094	17,443	9,973	16,97	2,14
K ₂ O	0	0,026	0,013	0,008	0	0,047	0	0,012	0,006	0	0,033	0,008	0,001	0,001	0,019	0	0,001	0,011	0,012	0,011
Na ₂ O	11,984	8,095	11,09	11,387	11,208	5,818	11,377	5,699	12,014	5,381	4,815	4,952	4,979	4,272	6,406	5,007	3,345	7,814	3,961	12,116
Total	98,24	97,922	97,404	99,286	99,246	98,653	98,437	99,558	99,679	99,726	99,197	99,004	98,467	99,791	98,341	98,875	98,703	98,789	99,938	98,238
Fórmula estrutural calculada na base de 6 oxigênios																				
Si	1,985	1,986	1,994	1,929	1,948	1,978	1,967	1,983	1,976	1,970	1,974	1,998	1,985	1,963	1,991	1,969	1,975	2,042	2,016	1,978
Al (T)	0,015	0,014	0,006	0,071	0,023	0,022	0,033	0,017	0,016	0,030	0,026	0,002	0,015	0,037	0,009	0,024	0,025	0,000	0,000	0,022
Fe ³⁺ (T)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,029	0,000	0,000	0,000	0,008	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,007	0,000	0,000	0,000	0,000
SOMA (T)	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,042	2,016	2,000
Al	0,008	0,005	0,017	0,111	0,000	0,014	0,018	0,008	0,000	0,031	0,010	0,026	0,017	0,002	0,034	0,000	0,030	0,016	0,013	0,044
Ti	0,038	0,022	0,028	0,039	0,037	0,013	0,042	0,017	0,069	0,013	0,016	0,018	0,021	0,011	0,017	0,016	0,013	0,056	0,006	0,082
Fe ³⁺	0,813	0,569	0,751	0,711	0,796	0,412	0,767	0,392	0,758	0,364	0,338	0,304	0,324	0,324	0,413	0,367	0,216	0,364	0,234	0,701
Fe ²⁺	0,086	0,176	0,047	0,125	0,037	0,193	0,092	0,193	0,080	0,198	0,177	0,205	0,215	0,208	0,179	0,175	0,249	0,252	0,301	0,097
Mn	0,007	0,017	0,017	0,008	0,009	0,013	0,010	0,013	0,011	0,011	0,012	0,012	0,011	0,012	0,013	0,013	0,011	0,019	0,015	0,005
Mg	0,066	0,233	0,151	0,069	0,112	0,378	0,087	0,399	0,087	0,414	0,461	0,459	0,442	0,470	0,369	0,450	0,524	0,272	0,437	0,098
Ca	0,099	0,375	0,170	0,111	0,191	0,545	0,147	0,561	0,124	0,577	0,634	0,614	0,603	0,660	0,502	0,612	0,710	0,405	0,687	0,087
K	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,002	0,000	0,001	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001
Na	0,882	0,603	0,819	0,827	0,818	0,429	0,836	0,416	0,871	0,392	0,352	0,362	0,367	0,312	0,472	0,368	0,246	0,574	0,290	0,886
SOMA	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	1,958	1,984	2,000
Total cátions	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000
Componentes moleculares																				
En	-----																			
Fs	-----																			
Wo	-----																			
Jd	0,85	0,49	1,77	11,36	0,00	1,47	1,87	0,82	0,00	3,12	0,98	2,89	1,84	0,22	3,60	0,00	3,05	2,26	1,52	5,13
Ae	86,66	60,14	79,89	73,11	82,76	41,98	81,80	41,09	85,68	36,60	34,65	33,29	34,99	31,54	43,71	37,28	21,89	53,03	27,43	81,17
Quad	12,49	39,38	18,34	15,53	17,24	56,54	16,33	58,09	14,32	60,29	64,37	63,82	63,18	68,24	52,68	62,72	75,06	44,71	71,06	13,70
Grupo	Na	Ca-Na	Na	Na	Na	Ca-Na	Na	Ca-Na	Na	Ca-Na	Ca-Na	Ca-Na	Ca-Na	Ca-Na	Ca-Na	Ca-Na	Ca-Na	Ca-Na	Ca-Na	Na
Nomenclatura	Eg	Eg-Au	Eg	Eg	Eg	Eg-Au	Eg	Eg-Au	Eg	Eg-Au	Eg-Au	Eg-Au	Eg-Au	Eg-Au	Eg-Au	Eg-Au	Eg-Au	Eg-Au	Eg-Au	Eg
(Morimoto, 1990)	com Mg		com Mg																	

Legenda: n, núcleo; b, borda; Eg, Egirina; Eg-Au, Egirina-Augita; (T), proporção do cátion no sítio T.

TABELA 3. Continuação.

Amostra Análise Localização	DKMN-11								DKMN-13									
	2		3		4		5	6	7	8	1		2		3		4	
	c	b	c	b	c	b	c	c	b	b	c	b	c	b	c	b	c	b
SiO ₂	52,247	52,465	51,655	51,332	52,241	52,367	51,806	52,784	52,802	52,631	53,398	52,708	53,319	53,256	52,663	52,946	53,15	52,766
TiO ₂	0,223	0,218	0,199	1,825	0,209	0,229	0,205	0,274	2,957	3,119	0,316	0,251	0,299	0,383	0,416	0,296	0,286	0,265
Al ₂ O ₃	0,341	0,382	0,717	2,01	0,382	0,399	0,412	0,272	0,403	0,356	0,306	0,29	0,232	0,304	0,269	0,422	0,298	0,254
FeO	17,626	17,762	17,241	24,482	17,691	17,12	16,952	14,271	24,717	24,359	16,25	18,15	14,812	17,252	17,833	17,669	17,432	19,481
MnO	0,504	0,501	0,444	0,202	0,507	0,487	0,434	0,352	0,254	0,295	0,316	0,421	0,257	0,438	0,354	0,432	0,484	0,509
MgO	7,327	7,287	7,349	1,052	7,383	7,421	7,57	9,678	1,964	1,539	8,072	7,005	8,995	7,458	7,355	7,362	7,252	6,408
CaO	16,599	16,497	16,66	4,363	16,718	16,525	17,05	17,631	2,531	1,852	15,552	14,978	16,37	14,864	14,823	14,98	15,197	14,135
K ₂ O	0	0,014	0	0,02	0	0,006	0,025	0	0,013	0	0,015	0,005	0	0	0	0	0,015	0
Na ₂ O	3,817	3,835	3,832	10,859	3,874	3,788	3,572	3,23	11,755	12,145	4,593	4,999	4,069	4,929	5,174	4,857	4,805	5,415
Total	98,684	98,961	98,097	96,145	99,005	98,342	98,026	98,492	97,396	96,296	98,818	98,807	98,353	98,884	98,887	98,964	98,919	99,233
Fórmula estrutural calculada na base de 6 oxigênios																		
Si	2,008	2,011	1,993	1,993	2,000	2,017	2,002	2,008	2,015	2,027	2,025	2,009	2,026	2,023	1,999	2,012	2,022	2,007
Al (T)	0,000	0,000	0,007	0,007	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000
Fe ³⁺ (T)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
SOMA (T)	2,008	2,011	2,000	2,000	2,000	2,017	2,002	2,008	2,015	2,027	2,025	2,009	2,026	2,023	2,000	2,012	2,022	2,007
Al	0,015	0,017	0,025	0,085	0,017	0,018	0,019	0,012	0,018	0,016	0,014	0,013	0,010	0,014	0,011	0,019	0,013	0,011
Ti	0,006	0,006	0,006	0,053	0,006	0,007	0,006	0,008	0,085	0,090	0,009	0,007	0,009	0,011	0,012	0,008	0,008	0,008
Fe ³⁺	0,241	0,234	0,257	0,634	0,259	0,218	0,234	0,194	0,653	0,656	0,257	0,325	0,220	0,282	0,347	0,298	0,281	0,359
Fe ²⁺	0,326	0,336	0,300	0,160	0,307	0,333	0,314	0,261	0,136	0,129	0,259	0,253	0,251	0,267	0,219	0,264	0,274	0,260
Mn	0,016	0,016	0,015	0,007	0,016	0,016	0,014	0,011	0,008	0,010	0,010	0,014	0,008	0,014	0,011	0,014	0,016	0,016
Mg	0,420	0,416	0,423	0,061	0,421	0,426	0,436	0,549	0,112	0,088	0,456	0,398	0,510	0,422	0,416	0,417	0,411	0,363
Ca	0,683	0,678	0,689	0,181	0,686	0,682	0,706	0,719	0,103	0,076	0,632	0,612	0,667	0,605	0,603	0,610	0,619	0,576
K	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000
Na	0,284	0,285	0,287	0,817	0,288	0,283	0,268	0,238	0,870	0,907	0,338	0,369	0,300	0,363	0,381	0,358	0,354	0,399
SOMA	1,992	1,989	2,000	2,000	2,000	1,983	1,998	1,992	1,985	1,973	1,975	1,991	1,974	1,977	2,000	1,988	1,978	1,993
Total cátions	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000
Componentes moleculares																		
En	-----																	
Fs	-----																	
Wo	-----																	
Jd	1,72	1,96	2,61	9,44	1,76	2,16	2,00	1,41	2,25	2,07	1,69	1,42	1,33	1,66	1,16	2,13	1,60	1,23
Ae	26,75	26,55	26,29	70,79	27,14	26,03	24,88	22,36	80,97	83,99	31,71	35,48	28,25	34,29	36,93	33,54	33,61	38,74
Quad	71,53	71,49	71,11	19,77	71,09	71,81	73,12	76,23	16,78	13,94	66,60	63,10	70,41	64,05	61,91	64,33	64,79	60,03
Grupo	Ca-Na	Ca-Na	Ca-Na	Na	Ca-Na	Ca-Na	Ca-Na	Ca-Na Na	Na	Ca-Na	Ca-Na	Ca-Na	Ca-Na	Ca-Na	Ca-Na	Ca-Na	Ca-Na	Ca-Na
Nomenclatura	Eg-Au	Eg-Au	Eg-Au	Eg	Eg	Eg-Au	Eg-Au	Eg-Au	Eg	Eg	Eg-Au	Eg-Au	Eg-Au	Eg-Au	Eg-Au	Eg-Au	Eg-Au	Eg-Au
(Morimoto, 1990)	Augita com Mg																	

Legenda: c, centro; b, borda; Eg, Egirina; Eg-Au, Egirina-Augita; (T), proporção do cátion no sítio T.

TABELA 4. Composição química, em porcentagem de peso, de piroxênios das rochas do subexame de Tavares.

Amostra	DKTV-04																	
	1		2		3		4	5		6		7	8		9		10	
Análise	c	c	b	c	b	b	c	b	c	b	c	c	b	c	b	c	b	
Localização	c	c	b	c	b	b	c	b	c	b	c	c	b	c	b	c	b	
SiO ₂	52,081	52,088	51,755	51,296	51,621	51,457	51,39	52,563	52,452	52,042	51,876	51,327	51,512	52,565	51,434	53,416	53,363	
TiO ₂	0,841	0,186	0,108	0,705	0,539	0,506	0,256	0,199	0,134	0,174	0,693	0,527	0,724	0,212	0,648	0,045	0,099	
Al ₂ O ₃	0,408	0,388	0,346	0,833	0,833	0,799	0,513	0,587	0,727	0,807	0,415	0,702	0,814	0,508	1,025	0,688	0,778	
FeO	15,687	15,522	14,96	15,592	15,975	14,94	13,463	8,938	9,684	8,953	14,559	14,449	15,9	11,743	11,709	6,585	6,711	
MnO	0,271	0,399	0,334	0,314	0,301	0,299	0,269	0,228	0,187	0,189	0,238	0,249	0,347	0,279	0,271	0,132	0,176	
MgO	8,617	9,403	9,236	8,292	8,373	9,316	9,889	13,073	12,599	12,618	9,236	9,013	8,106	11,03	10,335	14,039	13,755	
CaO	16,682	19,5	18,896	16,352	17,504	18,856	20,916	23,587	23,532	23,436	17,752	18,043	17,01	21,726	20,085	22,305	21,831	
K ₂ O	0,009	0	0	0,02	0,016	0,05	0,002	0,457	0	0	0	0,015	3,625	0	0,147	0	0	
Na ₂ O	4,051	2,036	2,078	3,77	3,527	2,621	1,329	0	0,319	0,325	3,535	3,433	0,008	1,075	1,567	1,252	1,348	
Total	98,647	99,522	97,713	97,174	98,689	98,844	98,027	99,632	99,634	98,544	98,304	97,758	98,046	99,138	97,221	98,462	98,061	
Fórmula estrutural calculada na base de 6 oxigênios																		
Si	1,982	1,987	2,008	1,986	1,972	1,965	1,988	1,976	1,974	1,976	1,978	1,969	2,029	1,999	1,992	1,994	2,002	
Al (T)	0,018	0,013	0,000	0,014	0,028	0,035	0,012	0,024	0,026	0,024	0,019	0,031	0,000	0,001	0,008	0,006	0,000	
Fe ³⁺ (T)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
SOMA (T)	2,000	2,000	2,008	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,029	2,000	2,000	2,000	2,002	
Al	0,000	0,004	0,016	0,024	0,009	0,001	0,011	0,002	0,006	0,013	0,000	0,000	0,038	0,022	0,038	0,025	0,034	
Ti	0,024	0,005	0,003	0,021	0,015	0,015	0,007	0,006	0,004	0,005	0,020	0,015	0,021	0,006	0,019	0,001	0,003	
Fe ³⁺	0,270	0,149	0,118	0,233	0,250	0,202	0,086	0,033	0,035	0,025	0,244	0,257	0,044	0,046	0,057	0,069	0,054	
Fe ²⁺	0,230	0,347	0,368	0,271	0,260	0,275	0,350	0,248	0,270	0,259	0,217	0,207	0,479	0,327	0,322	0,137	0,156	
Mn	0,009	0,013	0,011	0,010	0,010	0,010	0,009	0,007	0,006	0,006	0,008	0,008	0,012	0,009	0,009	0,004	0,006	
Mg	0,489	0,535	0,534	0,479	0,477	0,530	0,570	0,733	0,707	0,714	0,525	0,515	0,476	0,625	0,597	0,781	0,769	
Ca	0,680	0,797	0,786	0,678	0,716	0,771	0,867	0,950	0,949	0,954	0,725	0,741	0,718	0,885	0,833	0,892	0,877	
K	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,002	0,000	0,022	0,000	0,000	0,000	0,001	0,182	0,000	0,007	0,000	0,000	
Na	0,299	0,151	0,156	0,283	0,261	0,194	0,100	0,000	0,023	0,024	0,261	0,255	0,001	0,079	0,118	0,091	0,098	
SOMA	2,000	2,000	1,992	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	1,971	2,000	2,000	2,000	1,998	
Total cátions	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	
Componentes moleculares																		
En	-----	29,06	29,42	-----	-----	29,65	30,31	37,17	35,95	36,48	-----	-----	27,53	33,03	32,82	41,49	41,29	
Fs	-----	27,62	27,33	-----	-----	27,22	23,62	14,63	15,80	14,83	-----	-----	30,96	20,20	21,35	11,14	11,60	
Wo	-----	43,32	43,25	-----	-----	43,13	46,07	48,20	48,25	48,69	-----	-----	41,51	46,76	45,84	47,37	47,10	
Jd	0,00	-----	-----	2,62	0,95	-----	-----	-----	-----	-----	0,00	0,04	-----	-----	-----	-----	-----	
Ae	29,94	-----	-----	25,76	25,49	-----	-----	-----	-----	-----	26,26	25,82	-----	-----	-----	-----	-----	
Quad	70,06	-----	-----	71,62	73,56	-----	-----	-----	-----	-----	73,74	74,14	-----	-----	-----	-----	-----	
Grupo	Ca-Na	Quad	Quad	Ca-Na	Ca-Na	Quad	Quad	Quad	Quad	Quad	Ca-Na	Ca-Na	Quad	Quad	Quad	Quad	Quad	
Nomenclatura	Eg-Au	Au com	Au com	Eg-Au	Eg-Au	Au com	Diop	Diop	Diop	Diop	Eg-Au	Eg-Au	Au	Diop	Diop	Diop	Diop	
(Morimoto, 1990)		Fe e Na	Fe e Na			Fe e Na									com Na			

Legenda: c, centro; b, borda; Au, Augita; Eg-Au, Egirina-Augita; Diop, Diopsídio; (T), proporção do cátion no sítio T.

TABELA 5. Composição química, em porcentagem de peso, de anfibólios das rochas do subenxame de Manaíra.

Amostra	DKMN-09		
Análise	1	2	3
Localização	c	b	c
SiO ₂	54,544	55,773	55,226
TiO ₂	0,086	0,143	0,096
Al ₂ O ₃	0,598	0,656	0,663
MnO	0,194	0,184	0,200
FeO	20,154	20,249	19,183
MgO	11,549	11,251	11,714
CaO	2,312	1,768	1,817
Na ₂ O	6,165	6,502	6,521
K ₂ O	0,650	0,747	0,746
F	0,245	0,476	0,685
Cl	0,000	0,018	0,005
Total	96,497	97,767	96,856

Fórmula estrutural calculada na base de 23 oxigênios

Si (T)	7,918	8,000	7,999
Al (T)	0,082	0,000	0,001
Ti (T)	0,000	0,000	0,000
SOMA (T)	8,000	8,000	8,000
Al (C)	0,021	0,111	0,112
Ti (C)	0,009	0,015	0,010
Fe+3 (C)	1,424	1,313	1,305
Mg (C)	2,500	2,409	2,529
Fe+2 (C)	1,022	1,119	1,018
Mn (C)	0,024	0,022	0,025
SOMA (C)	5,000	4,990	5,000
Mn (B)	0,000	0,000	0,000
Ca (B)	0,360	0,272	0,282
Na (B)	1,640	1,728	1,718
SOMA (B)	2,000	2,000	2,000
Na (A)	0,095	0,082	0,113
K (A)	0,120	0,137	0,138
SOMA (A)	0,215	0,219	0,251

Nomenclatura MRb MRb MRb
(Leake, 1997) com Fl

Legenda: c: centro; b: borda; MRb: Magnésio Riebeckita;

(T): proporção do cátion no sítio T; (C): proporção do cátion no sítio C; (B): proporção do cátion no sítio B; (A): proporção do cátion no sítio A.

TABELA 6. Composição química, em porcentagem de peso, de anfibólios das rochas do subexame de Princesa Isabel.

Amostra Análise Localização	DKPI-03					DKPI-01													
	1		2	3		1	2	3	4	5	6	7		8		9		10	
	c	b	c	c	b	b	c	c	b	b	c	c	b	c	b	c	b	c	b
SiO ₂	54,564	55,110	54,607	54,041	55,328	52,037	52,865	53,641	51,142	52,057	52,810	54,135	52,605	54,062	51,933	52,112	52,938	56,019	53,799
TiO ₂	0,211	0,086	0,134	0,222	0,157	0,276	2,867	0,511	0,237	0,212	0,286	0,130	0,352	0,460	0,319	0,043	0,324	0,125	0,349
Al ₂ O ₃	0,510	0,589	0,628	0,698	0,609	0,329	0,551	0,378	2,894	0,310	0,376	2,645	0,422	0,428	2,445	6,461	0,354	0,355	0,413
MnO	0,233	0,187	0,193	0,180	0,279	0,499	0,265	0,121	0,182	0,176	0,118	0,385	0,132	0,196	0,136	0,453	0,147	0,433	0,114
FeO	20,031	20,623	20,946	20,916	18,587	29,028	27,323	24,585	23,599	25,647	26,464	18,120	27,301	23,786	27,341	17,422	26,767	17,701	25,682
MgO	10,948	10,844	10,464	10,216	12,340	0,837	0,728	4,124	4,112	2,834	2,027	11,850	1,727	4,866	1,511	11,972	2,545	12,930	2,632
CaO	1,478	1,645	1,769	2,018	2,325	2,041	1,940	4,623	3,910	4,637	3,310	1,814	2,993	4,458	2,681	2,219	3,546	2,199	4,408
Na ₂ O	6,502	6,499	6,481	7,098	6,399	12,303	12,419	10,405	10,178	10,923	11,449	6,143	11,961	9,739	11,747	5,804	11,286	6,385	11,143
K ₂ O	0,969	0,790	0,788	0,638	0,671	0,000	0,002	0,100	0,182	0,013	0,024	1,333	0,016	0,221	0,006	1,400	0,035	1,290	0,049
F	0,575	0,483	0,545	0,823	0,991	0,002	0,000	0,000	0,134	0,000	0,071	0,595	0,000	0,165	0,127	0,518	0,000	0,943	0,000
Cl	0,000	0,000	0,021	0,029	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,028	0,018	0,000	0,000	0,008	0,023	0,010	0,018	0,000	0,000
Total	96,021	96,856	96,576	96,879	97,691	97,352	98,96	98,488	96,57	96,837	96,953	97,15	97,509	98,389	98,269	98,414	97,96	98,38	98,589
Fórmula estrutural calculada na base de 23 oxigênios																			
Si (T)	8,007	8,010	8,001	7,992	7,962	8,609	8,609	8,579	8,234	8,632	8,721	7,777	8,669	8,548	8,409	7,319	8,613	8,005	8,738
Al (T)	0,000	0,000	0,000	0,008	0,038	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,223	0,000	0,000	0,000	0,681	0,000	0,000	0,000
Ti (T)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
SOMA (T)	8,007	8,010	8,001	8,000	8,000	8,609	8,609	8,579	8,234	8,632	8,721	8,000	8,669	8,548	8,409	8,000	8,613	8,005	8,738
Al (C)	0,088	0,101	0,108	0,114	0,065	0,064	0,106	0,071	0,549	0,061	0,073	0,225	0,082	0,080	0,467	0,389	0,068	0,060	0,079
Ti (C)	0,023	0,009	0,015	0,025	0,017	0,034	0,351	0,061	0,029	0,026	0,036	0,014	0,044	0,055	0,039	0,005	0,040	0,013	0,043
Fe+3 (C)	1,324	1,335	1,286	1,035	1,289	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,419	0,000	0,000	0,000	1,724	0,000	1,205	0,000
Mg (C)	2,395	2,350	2,286	2,252	2,647	0,206	0,177	0,983	0,987	0,701	0,499	2,538	0,424	1,147	0,365	2,507	0,617	2,754	0,637
Fe+2 (C)	1,134	1,171	1,280	1,552	0,947	4,016	3,721	3,288	3,177	3,556	3,654	0,757	3,762	3,145	3,702	0,322	3,642	0,910	3,488
Mn (C)	0,029	0,023	0,024	0,023	0,034	0,070	0,037	0,016	0,025	0,025	0,017	0,047	0,018	0,026	0,019	0,054	0,020	0,052	0,016
SOMA (C)	4,993	4,990	4,999	5,000	5,000	4,391	4,391	4,421	4,766	4,368	4,279	5,000	4,331	4,452	4,591	5,000	4,387	4,995	4,262
Mn (B)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ca (B)	0,232	0,256	0,278	0,320	0,358	0,362	0,338	0,792	0,674	0,824	0,586	0,279	0,528	0,755	0,465	0,334	0,618	0,337	0,767
Na (B)	1,768	1,744	1,722	1,680	1,642	1,638	1,662	1,208	1,326	1,176	1,414	1,711	1,472	1,245	1,535	1,580	1,382	1,663	1,233
SOMA (B)	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	1,990	2,000	2,000	2,000	1,914	2,000	2,000	2,000
Na (A)	0,082	0,088	0,119	0,355	0,144	2,308	2,259	2,019	1,851	2,335	2,251	0,000	2,350	1,740	2,153	0,000	2,178	0,105	2,276
K (A)	0,181	0,146	0,147	0,120	0,123	0,000	0,000	0,020	0,037	0,003	0,005	0,244	0,003	0,045	0,001	0,251	0,007	0,235	0,010
SOMA (A)	0,263	0,234	0,266	0,475	0,267	2,308	2,260	2,039	1,888	2,338	2,256	0,244	2,353	1,785	2,154	0,251	2,185	0,341	2,286
Nomenclatura (Leake, 1997)	MRb com Fl	MRb	MRb com Fl	MRb com Fl	MRb com Fl	FEk	FEk com Ti	Frich	Frich	Frich	Frich	MRb com Fl	Frich	Frich	Fek	MRb com K	Frich	MRb com Fl	Frich

Legenda: c: centro; b: borda; MRb: Magnésio Riebeckita; FEk: Ferro-Eckermanita; Frich: Ferro-Richterita

(T): proporção do cátion no sítio T; (C): proporção do cátion no sítio C; (B): proporção do cátion no sítio B; (A): proporção do cátion no sítio A.

TABELA 7. Composição química, em porcentagem peso, de anfibólios das rochas do subexame de Tavares.

Amostra	DKTV-2A														DKTV-2B				
	Análise	1	2	3	4	5	6		7	8	9	10		11	12	1	2	3	4
Localização	c	c	b	c	b	b	c	b	c	c	c	c	b	c	b	b	b	c	c
SiO2	54,951	55,250	55,319	55,150	54,131	54,992	54,847	55,681	55,677	55,228	56,321	55,666	55,316	55,217	55,802	54,444	56,470	56,264	56,744
TiO2	0,009	0,009	0,067	0,152	0,114	0,086	0,104	0,114	0,143	0,038	0,138	0,033	0,217	0,123	0,114	0,383	0,076	0,105	0,162
Al2O3	0,568	0,585	0,537	0,555	0,545	0,507	0,548	0,557	0,491	0,535	0,483	0,553	0,560	0,551	0,507	0,501	0,541	0,562	0,546
MnO	0,191	0,173	0,137	0,132	0,151	0,090	0,139	0,145	0,159	0,145	0,183	0,150	0,160	0,169	0,180	0,171	0,172	0,131	0,129
FeO	21,184	22,872	22,566	21,933	23,107	22,008	22,615	21,772	22,413	23,338	22,326	22,202	23,192	21,845	22,928	21,452	21,361	21,191	21,686
MgO	10,465	9,747	10,207	10,061	9,966	10,341	9,943	10,253	10,337	10,216	10,413	10,471	10,071	10,239	10,313	11,457	11,044	10,563	10,101
CaO	0,859	0,494	0,358	0,376	0,268	0,413	0,251	0,461	0,433	0,394	0,402	0,421	0,299	0,432	0,354	0,905	0,461	0,317	0,402
Na2O	6,607	6,762	6,873	6,731	6,837	6,554	6,748	6,771	7,005	6,803	6,954	6,908	7,021	6,740	6,852	6,481	6,673	6,771	6,835
K2O	0,136	0,110	0,174	0,174	0,132	0,160	0,109	0,107	0,121	0,128	0,167	0,180	0,172	0,146	0,135	0,574	0,232	0,197	0,182
F	0,136	0,037	0,231	0,063	0,171	0,000	0,066	0,132	0,202	0,164	0,098	0,304	0,129	0,169	0,168	0,414	0,273	0,204	0,004
Cl	0,016	0,003	0,000	0,000	0,008	0,029	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,008	0,110	0,000	0,000	0,032	0,000
Total	95,122	96,042	96,469	95,327	95,430	95,180	95,370	95,993	96,981	96,989	97,488	96,888	97,137	95,639	97,463	96,782	97,303	96,337	96,791
Fórmula estrutural calculada na base de 23 oxigênios																			
Si (T)	8,017	8,003	7,972	8,022	7,892	7,983	7,974	8,040	7,985	7,911	8,016	7,983	7,930	8,008	7,956	7,822	8,011	8,075	8,123
Al (T)	0,000	0,000	0,028	0,000	0,094	0,017	0,026	0,000	0,015	0,089	0,000	0,017	0,070	0,000	0,044	0,085	0,000	0,000	0,000
Ti (T)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,013	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,041	0,000	0,000	0,000
SOMA (T)	8,017	8,003	8,000	8,022	7,999	8,000	8,000	8,040	8,000	8,000	8,016	8,000	8,000	8,008	8,000	7,948	8,011	8,075	8,123
Al (C)	0,098	0,100	0,064	0,095	0,000	0,070	0,067	0,095	0,068	0,001	0,081	0,077	0,025	0,094	0,041	0,000	0,090	0,095	0,092
Ti (C)	0,001	0,001	0,007	0,017	0,000	0,009	0,011	0,012	0,015	0,004	0,015	0,004	0,023	0,013	0,012	0,000	0,008	0,011	0,017
Fe+3 (C)	1,643	1,749	1,814	1,712	1,968	1,845	1,856	1,680	1,746	1,958	1,719	1,781	1,846	1,738	1,874	1,921	1,784	1,655	1,519
Mg (C)	2,276	2,105	2,193	2,182	2,166	2,238	2,155	2,207	2,210	2,182	2,209	2,239	2,152	2,214	2,192	2,454	2,336	2,260	2,156
Fe+2 (C)	0,942	1,022	0,906	0,956	0,849	0,826	0,893	0,949	0,941	0,837	0,938	0,882	0,934	0,911	0,859	0,625	0,750	0,888	1,076
Mn (C)	0,024	0,021	0,017	0,016	0,017	0,011	0,017	0,018	0,019	0,018	0,022	0,018	0,019	0,021	0,022	0,000	0,021	0,016	0,016
SOMA (C)	4,983	4,997	5,000	4,978	5,000	5,000	5,000	4,960	5,000	5,000	4,984	5,000	5,000	4,992	5,000	5,000	4,989	4,925	4,877
Mn (B)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,021	0,000	0,000	0,000
Ca (B)	0,134	0,077	0,055	0,059	0,042	0,064	0,039	0,071	0,067	0,060	0,061	0,065	0,046	0,067	0,054	0,139	0,070	0,049	0,062
Na (B)	1,866	1,899	1,920	1,898	1,932	1,845	1,902	1,895	1,933	1,889	1,919	1,921	1,951	1,895	1,894	1,805	1,835	1,884	1,897
SOMA (B)	2,000	1,976	1,976	1,957	1,976	1,909	1,941	1,967	2,000	1,950	1,980	1,985	1,997	1,962	1,948	1,965	1,905	1,933	1,959
Na (A)	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,014	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K (A)	0,025	0,020	0,032	0,032	0,025	0,030	0,020	0,020	0,022	0,023	0,030	0,033	0,031	0,027	0,025	0,105	0,042	0,036	0,033
SOMA (A)	0,028	0,020	0,032	0,032	0,025	0,030	0,020	0,020	0,036	0,023	0,030	0,033	0,031	0,027	0,025	0,105	0,042	0,036	0,033
Nomenclatura	MRb	MRb	MRb	MRb	MRb	MRb	MRb	MRb	MRb	MRb	MRb	MRb	MRb	MRb	MRb	MRb	MRb	MRb	MRb
(Leake, 1997)																			

Legenda: c: centro; b: borda; MRb: Magnésio Riebeckita;

(T): proporção do cátion no sítio T; (C): proporção do cátion no sítio C; (B): proporção do cátion no sítio B; (A): proporção do cátion no sítio A.

TABELA 7. Continuação.

Amostra	DKTV-05						DKTV-01						DKTV-04			
	1		2		3		4		5		6		1		2	
	c	b	c	b	c	b	c	b	c	b	c	b	c	b	c	b
SiO ₂	55,569	54,695	56,303	55,122	55,243	55,783	55,895	55,213	54,761	54,513	53,912	54,709	53,367	55,093	54,621	54,889
TiO ₂	0,038	0,523	0,250	0,309	0,144	0,217	0,178	0,052	0,062	0,043	0,105	0,020	0,033	0,022	0,011	0,010
Al ₂ O ₃	0,551	0,536	0,177	0,626	0,767	0,267	0,350	0,686	0,822	0,599	1,119	2,553	3,602	0,759	0,518	0,486
MnO	0,293	0,334	0,282	0,357	0,363	0,287	0,314	0,219	0,240	0,221	0,221	0,246	0,244	0,323	0,451	0,532
FeO	18,007	16,214	17,801	16,850	16,893	16,303	16,142	23,658	23,674	21,325	21,600	20,755	21,852	23,523	16,518	15,869
MgO	12,995	13,597	13,336	13,698	13,405	14,429	14,612	9,237	8,798	9,573	9,034	9,825	8,752	8,868	13,047	13,528
CaO	2,336	2,711	2,537	2,764	2,872	3,720	3,349	0,824	0,521	0,970	0,538	0,856	0,434	0,611	5,805	5,819
Na ₂ O	6,073	5,806	6,095	5,790	5,848	5,574	5,783	6,789	6,987	6,971	6,876	6,882	6,775	7,070	4,003	4,138
K ₂ O	0,549	2,277	0,861	2,143	1,344	0,752	0,811	0,253	0,295	0,269	0,314	0,267	0,167	0,259	0,911	1,089
F	0,214	0,671	0,454	0,675	0,324	0,326	0,258	0,532	0,468	0,342	0,641	0,470	0,167	0,131	0,791	0,621
Cl	0,013	0,013	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,018	0,000	0,000	0,000	0,000	0,008	0,000	0,000	0,000
Total	96,638	97,377	98,099	98,334	97,203	97,658	97,692	97,481	96,628	94,826	94,360	96,583	95,401	96,659	96,676	96,981
Fórmula estrutural calculada na base de 23 oxigênios																
Si (T)	7,945	7,915	7,981	7,883	7,920	7,913	7,899	7,993	8,009	8,095	8,053	7,907	7,781	8,032	7,989	7,985
Al (T)	0,055	0,085	0,019	0,106	0,080	0,045	0,058	0,007	0,000	0,000	0,000	0,093	0,219	0,000	0,011	0,015
Ti (T)	0,000	0,000	0,000	0,012	0,000	0,023	0,019	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
SOMA (T)	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	7,980	7,976	8,000	8,009	8,095	8,053	8,000	8,000	8,032	8,000	8,000
Al (C)	0,038	0,007	0,011	0,000	0,050	0,000	0,000	0,110	0,142	0,105	0,197	0,342	0,400	0,130	0,078	0,069
Ti (C)	0,004	0,057	0,027	0,021	0,016	0,000	0,000	0,006	0,007	0,005	0,012	0,002	0,004	0,002	0,001	0,001
Fe+3 (C)	1,464	1,057	1,319	1,195	1,215	1,252	1,324	1,626	1,578	1,295	1,413	1,461	1,668	1,512	0,799	0,753
Mg (C)	2,770	2,933	2,818	2,920	2,865	3,051	3,079	1,994	1,918	2,119	2,012	2,117	1,902	1,927	2,845	2,934
Fe+2 (C)	0,689	0,905	0,791	0,820	0,810	0,681	0,584	1,238	1,317	1,353	1,285	1,047	0,996	1,356	1,221	1,178
Mn (C)	0,035	0,041	0,034	0,043	0,044	0,015	0,014	0,027	0,030	0,028	0,028	0,030	0,030	0,040	0,056	0,066
SOMA (C)	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	4,991	4,905	4,947	5,000	5,000	4,968	5,000	5,000
Mn (B)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,020	0,024	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ca (B)	0,358	0,420	0,385	0,423	0,441	0,565	0,507	0,128	0,082	0,154	0,086	0,133	0,068	0,095	0,910	0,907
Na (B)	1,642	1,580	1,615	1,577	1,559	1,415	1,469	1,872	1,918	1,846	1,914	1,867	1,915	1,905	1,090	1,093
SOMA (B)	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	1,983	2,000	2,000
Na (A)	0,041	0,049	0,060	0,029	0,067	0,118	0,115	0,033	0,063	0,161	0,077	0,061	0,000	0,094	0,045	0,074
K (A)	0,100	0,420	0,156	0,391	0,246	0,136	0,146	0,047	0,055	0,051	0,060	0,049	0,031	0,048	0,170	0,202
SOMA (A)	0,141	0,470	0,216	0,420	0,312	0,254	0,261	0,080	0,118	0,212	0,137	0,110	0,031	0,142	0,215	0,276
Nomenclatura	MRb	MRb	MRb	MRb	MRb	Winch	Winch	MRb	MRb	MRb	MRb	MRb	MRb	MRb	Winch	Winch
(Leake, 1997)	com Fl		com Fl,K		Ferrica Ferrica		com Fl									

Legenda: c: centro; b: borda; MRb: Magnésio Riebeckita; Winch: Winchita;

(T): proporção do cátion no sítio T; (C): proporção do cátion no sítio C; (B): proporção do cátion no sítio B; (A): proporção do cátion no sítio A.

TABELA 8. Composição química, em porcentagem de peso, de feldspatos das rochas do subexame de Tavares.

Amostra Análise Localização	DKTV 2A									
	1		2		3		4		5	
	c	b	c	b	c	b	c	b	c	b
SiO ₂	64,08	66,57	66,40	66,11	65,97	66,75	66,65	65,53	65,98	66,57
TiO ₂	0,08	0,00	0,00	0,04	0,00	0,08	0,09	0,04	0,04	0,04
Al ₂ O ₃	18,52	19,27	19,31	19,66	19,03	19,02	19,57	19,86	19,43	19,27
Fe ₂ O ₃	0,48	0,13	0,14	0,13	0,12	0,06	0,12	0,08	0,13	0,13
CaO	0,84	0,69	0,34	0,77	0,26	0,34	0,68	0,67	0,45	0,42
BaO	0,14	0,23	0,15	0,11	0,33	0,36	0,27	0,76	0,50	0,28
Na ₂ O	2,92	7,02	6,40	6,92	6,06	6,28	7,78	6,71	6,10	6,94
K ₂ O	12,11	6,32	7,45	6,38	7,90	7,42	5,46	6,41	7,54	6,64
Total	99,17	100,21	100,19	100,12	99,67	99,28	100,63	100,05	100,16	100,28
Fórmula estrutural calculada na base de 32 oxigênios										
Si	11,848	11,900	11,905	11,830	11,922	11,909	11,846	11,785	11,865	11,905
Al	4,103	4,056	4,077	4,142	4,050	4,059	4,096	4,207	4,115	4,059
Fe ³⁺	0,018	0,017	0,019	0,018	0,016	0,008	0,016	0,010	0,017	0,017
Ti	0,003	0,000	0,000	0,006	0,000	0,011	0,012	0,005	0,005	0,005
Suma (T)	15,984	15,973	16,001	15,996	15,988	15,987	15,970	16,007	16,002	15,986
Ca	0,023	0,016	0,011	0,008	0,024	0,026	0,019	0,053	0,035	0,019
Ba	0,118	0,131	0,064	0,147	0,050	0,066	0,130	0,130	0,087	0,080
Na	1,961	2,433	2,226	2,401	2,124	2,206	2,682	2,340	2,128	2,405
K	1,922	1,441	1,703	1,457	1,822	1,716	1,238	1,471	1,729	1,515
Suma (M)	4,024	4,021	4,004	4,013	4,020	4,014	4,069	3,994	3,979	4,019
Total cations	20,008	19,994	20,005	20,009	20,008	20,001	20,039	20,001	19,981	20,005
Componentes Moleculares										
Ab	48,7	60,5	55,6	59,8	52,8	55,0	65,9	58,6	53,5	59,8
An	2,9	3,3	1,6	3,7	1,2	1,6	3,2	3,3	2,2	2,0
Or	47,8	35,8	42,5	36,3	45,3	42,8	30,4	36,8	43,5	37,7

OBSERVAÇÕES: Fe total calculado como Fe³⁺. Legenda: c:centro; b: borda.

TABELA 9. Composição química, em porcentagem de peso, de biotitas das rochas do subexame de Serra Talhada.

Amostra	DKST-01							
Análise	1	2	3	4	5	6	7	8
Localização	c	c	b	c	b	c	b	b
SiO ₂	36,05	35,82	36,02	36,22	35,77	35,58	36,98	35,03
TiO ₂	5,90	7,46	7,89	7,60	7,58	6,81	6,04	8,79
Al ₂ O ₃	15,19	15,86	15,76	15,87	16,88	16,27	16,16	14,44
FeO	14,81	11,92	13,49	14,13	11,21	13,85	11,26	16,41
MnO	0,23	0,05	0,07	0,12	0,07	0,13	0,06	0,14
MgO	14,26	15,57	14,69	14,14	15,40	14,80	16,77	11,77
CaO	0,04	0,00	0,04	0,00	0,01	0,00	0,03	0,00
BaO	0,00	0,91	0,75	0,06	0,76	1,19	0,00	2,55
Na ₂ O	0,38	0,40	0,54	0,43	0,21	0,44	0,15	0,10
K ₂ O	9,70	9,50	9,00	9,57	9,69	9,26	10,22	8,88
F	0,32	0,28	0,21	0,50	0,55	0,42	0,61	0,51
Cl	0,03	0,06	0,06	0,03	0,04	0,10	0,08	0,05
Cr ₂ O ₃	0,13	0,00	0,03	0,00	0,03	0,01 n.a		0,00
O-F, Cl	96,91	97,82	98,52	98,65	98,16	98,84	98,37	98,67
Total	0,14	0,13	0,10	0,22	0,24	0,20	0,27	0,22
Total	96,77	97,69	98,42	98,43	97,92	98,64	98,10	98,45
Fórmula estrutural calculada na base de 22 oxigênios								
Si	5,343	5,221	5,226	5,261	5,181	5,193	5,325	5,244
Al ^{IV}	2,652	2,722	2,692	2,714	2,819	2,769	2,675	2,545
Fe ³⁺	0,005	0,057	0,082	0,025	0,000	0,011	0,000	0,211
Suma Tetraédrica	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000
Al ^{IV}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,061	0,000	0,066	0,000
Ti	0,658	0,818	0,861	0,830	0,825	0,748	0,654	0,989
Fe ²⁺	1,831	1,396	1,554	1,691	1,357	1,680	1,356	1,843
Cr	0,015	0,000	0,004	0,000	0,003	0,001	0,000	0,000
Mn	0,028	0,006	0,008	0,015	0,009	0,016	0,008	0,018
Mg	3,152	3,384	3,176	3,061	3,326	3,220	3,599	2,627
Suma Octaédrica	5,684	5,604	5,603	5,597	5,581	5,665	5,683	5,477
Ba	0,000	0,052	0,042	0,003	0,043	0,068	0,000	0,150
Ca	0,007	0,000	0,007	0,000	0,001	0,000	0,005	0,000
Na	0,108	0,113	0,152	0,120	0,060	0,123	0,042	0,029
K	1,834	1,766	1,665	1,774	1,790	1,724	1,877	1,695
Suma Intercamada	1,949	1,931	1,866	1,897	1,894	1,915	1,924	1,874
Total Cátions	15,633	15,535	15,469	15,494	15,475	15,580	15,607	15,351
F	0,299	0,257	0,195	0,459	0,500	0,387	0,554	0,483
Cl	0,016	0,032	0,031	0,015	0,018	0,049	0,039	0,023

OBSERVAÇÕES: Fe total calculado como Fe²⁺.Fe³⁺ necessário para preencher o Sítio T. Legenda: c: centro ; b: borda.