



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 459

**MAGMATISMO BIMODAL DA ÁREA DE TUCUMÃ, PROVÍNCIA
CARAJÁS: GEOCRONOLOGIA U-Pb, CLASSIFICAÇÃO E
PROCESSOS**

Dissertação apresentada por:

FERNANDO FERNANDES DA SILVA

Orientador: Prof. Davis Carvalho de Oliveira (UFPA)

**BELÉM
2015**

Dados Internacionais de Catalogação de Publicação (CIP)
Biblioteca do Instituto de Geociências/SIBI/UFPA

Silva, Fernando Fernandes da, 1988-

Magmatismo bimodal da área de Tucumã, Província Carajás:
geocronologia U-Pb, classificação e processos / Fernando Fernandes
da Silva. – 2015.

xiv, 61 f. : il. ; 30 cm

Inclui bibliografias

Orientador: Davis Carvalho de Oliveira

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará,
Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia
e Geoquímica, Belém, 2015.

1. Diques (Geologia) – Carajás, Serra dos (PA). 2.
Magmatismo – Carajás, Serra dos (PA). 3. Geologia estratigráfica -
Proterozóico. 4. Magmatismo. I. Título.

CDD 22. ed. 551.88098115



Universidade Federal do Pará
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica

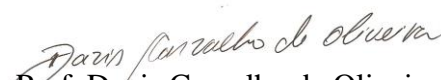
**MAGMATISMO BIMODAL DA ÁREA DE TUCUMÃ,
PROVÍNCIA, CARAJÁS: GEOCRONOLOGIA U-Pb,
CLASSIFICAÇÃO E PROCESSOS**


DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR
FERNANDO FERNANDES DA SILVA


**Como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de
GEOQUÍMICA E PETROLOGIA.**

Data de Aprovação: 06 / 08 / 2015

Banca Examinadora:


Prof. Davis Carvalho de Oliveira
(Orientador-UFPA)


Prof. Roberto Dall' Agnoll
(Membro-UFPA)


Prof. Sérgio Castro Valente
(Membro-UFRJ)

*A todos que contribuíram para a realização deste trabalho,
Muito obrigado!*

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer primeiramente a minha família em nome dos meus pais Gerson Marreiros e Maria José pelo apoio nos momentos de dificuldades e pelo grande incentivo na minha vida pessoal e profissional, os quais sem estes não obteria êxito, além disso, um agradecimento especial a minha irmã Ana Carolina e meu cunhado Ricardo Magon pela grande hospitalidade e acolhimento, além da pequena Isabela que, apesar da pouca idade, já nos trouxe muitas alegrias.

Ao CNPq (2013-2015), pela concessão de bolsa de mestrado; Aos projetos de pesquisa Vale/FAPESPA (ICAAF 053-2011), CNPq/UNIVERSAL (Processo), GEOCIAM Processo no 573733/2008-2) pelo apoio financeiro nas diversas etapas deste trabalho;

Ao meu orientador professor Davis Carvalho de Oliveira por me dar essa oportunidade e voto de confiança na realização deste trabalho. O meu muito obrigado por sua grande generosidade e paciência em dividir a sua experiência e sabedoria, além das diversas discussões, conselhos e até broncas que ajudaram de alguma forma o engrandecimento deste trabalho.

Aos professores e técnicos do IG da UFPa pelos conhecimentos repassados e tempo gasto que, de alguma forma, foram úteis para o desenvolvimento deste trabalho. Neste sentido, também agradecemos ao laboratório de geocronologia de alta resolução em nome do professor Kei Sato e sua equipe pela ajuda e paciência na obtenção dos dados geocronológicos, além do professor Manoel D`Agrella pela ajuda financeira para realização das análises em SHRIMP.

Aos colegas do PPGG pelo apoio e incentivo durante essa etapa, em especial ao pessoal da Sala 3, Nattânia, Pablo, Eleilson, Bhrenno, Marcela, Rodrigo, Luciano e Diwhemerson, pelo grande apoio, ajuda nas etapas de campo e amostragem, além das diversas discussões que ajudaram a enriquecer este trabalho, sem esquecer dos momentos de descontração e lazer que ajudaram a amenizar a pressão e *stress* do dia a dia.

Um agradecimento para Maria Nattânia e Raquel Cruz que foram minhas companheiras nessa jornada desde o início. Grandes momentos, sejam eles difíceis ou prazerosos, foram compartilhados durante esses dois anos. Deixo meu muito obrigado pelo grande aprendizado e lições vividas além das inúmeras e grandiosas contribuições dadas a este trabalho.

Aos meus amigos de longa data Iann, Mileyde, Lucimara e Rodrigo que, mesmo de longe, sempre mantêm contato e me dão força e incentivo, além dos diversos momentos hilários vividos, mesmo que a distância! Um agradecimento aos meus amigos e companheiros de todas as férias Marcela, Kempson e Iasmim. Vocês fazem minhas idas à Marabá muito divertidas e

imprevisíveis! A todos vocês, meus verdadeiros amigos, o meu muito obrigado pelo suporte, companheirismo e incentivo.

A Lubyanka minha companheira que nas últimas etapas deste trabalho me acompanhou de perto e me incentivou em todos os momentos o meu muito obrigado.

RESUMO

No contexto geológico da Província Carajás, diques constituem um mecanismo importante para o transporte de magma e representam o início de um rifteamento, ou, no mínimo, manifestações de extensão crustal que permitiram colocar através da crosta quantidades expressivas de magma granítico. Na área do município de Tucumã, sudeste do Estado Pará, são identificadas através de imagens de sensores remotos, diversas estruturas retilíneas que podem atingir até 60 km de extensão. O mapeamento geológico realizado nesta área revelou que tais estruturas correspondem às diversas ocorrências de um conjunto de rochas hipoabissais (diques), que seccionam o embasamento arqueano de orientação coincidente com a estruturação regional NW-SE pré-existente. Foi possível a partir de dados petrográficos e geoquímicos, individualizar tais rochas em três grupos: (i) tipos félsicos (SiO_2 entre 69,1% e 78,5%), que são classificados neste trabalho como riolitos pórfiros e são amplamente predominantes (70% dos corpos identificados), sendo estes marcados pela presença de fenocristais de quartzo, k-feldspato e plagioclásio imersos em uma matriz felsítica e afírica, e por vezes, pela ocorrência de textura rapakivi; (ii) tipos intermediários (SiO_2 entre 56,7% e 66,6%), que possuem ocorrência restrita, representando cerca de 10% dos corpos estudados, e são classificados como dacitos e andesitos; e (iii) tipos máficos (SiO_2 entre 49,1% e 53,7%) são igualmente restritos e são formados por basaltos e basalto andesitos, contendo plagioclásio, clino- e ortopiroxênios e mais restritamente olivina, onde geralmente configuram uma textura ofítica. As relações de campo evidenciam através de intensidades variáveis de *enclaves* máficos presentes nos riolitos, diversos níveis de interação entre os magmas félsico e máfico. Neste sentido, a coexistência destes magmas é dada pelas frequentes relações de magma *mingling*, onde fenocristais de quartzo e feldspatos são frequentemente encontrados no interior destes *enclaves*. Tais processos resultariam em rochas de composição híbrida e que estariam representadas neste trabalho por aquelas classificadas como dacito (mistura heterogênea) e, em um estágio mais avançado de contaminação/assimilação, o produto seria composições mais primitivas que a anterior, e corresponderia aos andesitos descritos na área (mistura homogênea ou magma *mixing*). É comum nestas variedades, frequentes texturas decorrentes de mistura de magma (desequilíbrio), como aquelas provenientes da corrosão de fenocristais de quartzo (embaiamento). A datação pelo método U-Pb em zircão em SHRIMP para os diques félsicos forneceu a idade de $1888 \pm 3.3\text{Ma}$ que é interpretada como idade de cristalização dos mesmos, e por extensão, também considerada como a de formação daqueles de caráter máfico a intermediário. Os diques félsicos são peraluminosos a levemente metaluminosos, devido principal-mente ao

fracionamento de K-Feldspato e plagioclásio com uma contribuição menor de anfibólio. Apresentam afinidades geoquímicas com os magmas formadores dos granitos do tipo A2, ferrosos e reduzidos. Já os tipos máficos pertencem à série toleítica e apresentam um acentuado fracionamento de piroxênio e plagioclásio. É possível notar um decréscimo nos teores de CaO, FeO, MgO, TiO₂, Sr, Cr e P nas rochas máficas em direção aquelas de composição riolítica, que são mais enriquecidas em sílica, ao passo que K₂O/Na₂O, Al₂O₃ e Na₂O, Rb, Ba e Y aumentam neste mesmo sentido. Nos riolitos, os padrões de ETR são caracterizados pelo enriquecimento de ETRL em relação aos ERTP (altas razões La/Yb), e pela significativa anomalia negativa de Eu. O mesmo comportamento é observado nas rochas intermediárias (andesitos e dacitos), todavia, de uma maneira mais discreta. Já as rochas máficas apresentam padrões de ETR mais horizontalizados (baixa razão La/Yb) com pouca ou nenhuma anomalia de Eu. As diferenças significativas observadas nestas rochas, principalmente no que se refere aos seus padrões de ETR e ao comportamento de Rb, Ba e Sr, sugerem que as mesmas não estejam ligadas por um único processo evolutivo. Dados obtidos a partir da modelagem geoquímica e de vetores de cristalização sugerem que a evolução dos diques máficos se deu pelo fracionamento de piroxênio e plagioclásio, ao passo que o K-feldspato e biotita são as fases fracionantes no magma félsico. Para a discussão dos processos de geração das rochas intermediárias foi gerado um modelo de mistura binária simples onde os componentes primários seriam os basaltos andesitos (iniciais) e riolitos (finais), onde ficou evidenciado que através da mistura de 60% de magma riolítico com contaminação de 40% de líquidos basálticos, originou-se o líquido dacítico. Já para a origem dos andesitos, seria necessária uma contribuição maior de magma basáltico na mistura (em torno de 60%). Desta forma, estima-se que os diques de composição andesítica são provavelmente gerados por uma mistura homogênea em baixas profundidades da crosta continental (*mixing*), ao contrário dos dacitos que, provavelmente, são geradas na crosta superior, a uma temperatura mais baixa, proporcionando assim um processo de mistura menos eficiente (*mingling*). As afinidades observadas entre os diques félsicos estudados e os granitos do tipo-A das regiões de Rio Maria e São Felix do Xingu, demonstram que o magmatismo bimodal da área de Tucumã seja uma clara evidência de que o magmatismo paleoproterozóico da Província Carajás teria sido formado a partir de processos envolvendo a fusão do manto superior e *underplating*, associado à transtensão da crosta.

Palavras-Chave: Diques, Magmatismo bimodal, Proterozoico, Província Carajás.

ABSTRACT

In the geological context of the Carajás Province, dikes are an important mechanism for magma transport and represent the beginning of a rifting, which allow the emplacement through the crust significant amounts of magma. The geological mapping of the Tucumã area has enabled the identification of dike swarms, which are intruded in an Archean basement. The disposition of these dikes is consistent with the regional, NW-SE trending, and can reach up to 20 kilometeric lengths. They were individualized in three main groups: (i) felsic dikes (70% of the dikes), composed exclusively of pink to dark purple porphyritic rhyolites with euhedral phenocrysts of quartz, K-feldspar and plagioclase immersed in a felsitic afiric matrix; (ii) mafic dikes, with restrict occurrence, composed primarily of basaltic andesites and subordinately by basalts, with a mineralogical assembly represented by plagioclase, cline- and orthopyroxene and olivine, forming an ofitic texture; and (iii) intermediate rocks, represented by gray to greenish gray andesites and dacites. Dacitic rocks are found outcropping associated to felsic dikes, showing different degrees of hybridization or mixing between mafic and felsic magmas. This is evidenced by large presence of mafic enclaves in the felsic dikes and the frequent presence of embayment textures. SHRIMP U-Pb zircon dating of felsic dikes yielded an age of $1888 \pm 3.3\text{Ma}$, which is interpreted as crystallization age. The felsic dikes are peraluminous to slightly metaluminous mainly due to the fractionation of K-feldspar and plagioclase with minor contribution of amphibole. They are characterized as akin to A2, ferrous and reduced granites. The intermediate and mafic dikes belong to tholeiitic series and are exclusively metaluminous with large fractionation of amphibole and plagioclase. It is noted a decrease in the amounts of CaO, FeO_t, MgO, TiO₂, Sr, Cr and P in the mafic rocks in the direction to the rhyolitic composition, which are more enriched in silica, while K₂O/Na₂O, Al₂O₃ and Na₂O, Rb, Ba and Y increase in the same sense. In rhyolitic varieties, the REE patterns are characterized by LREE enrichment in relation to HREE (high ratios La/Yb), and a significant Eu anomaly. A similar behavior is also seen in the intermediate rocks. On the other hand, the mafic rocks presents flatter REE patterns (low ratio La/Yb) and little or no Eu anomaly. Geochemical modeling and the fractional crystallization vectors showed that the mafic rocks evolved by crystallization of pyroxene and plagioclase, while the K-feldspar and biotite are the fractionating phases in felsic magma. For a discussion about the origin of the intermediate rocks, it was utilized a simple binary mixture model, in which the rhyolites and basaltic andesite are the primary components. From this model was shown that by mixing of 60% of rhyolite and 40% of basaltic andesite melts is possible to generate the dacite composition, while the andesite liquid could be

originated by mixing of 60% and 40% of basaltic andesite and rhyolite melts, respectively. The model proposed suggested that mixing of basaltic and andesitic magmas occurred during the ascent and storage in the crust, where the andesitic dikes are probably generated by a more homogeneous mixture at high depths in the continental crust (mixing), while the dacite dikes can be generated in the upper crust at a lower temperature, thus providing a less efficient mixing process (migling). The petrographic, geochemical, and geochronological affinities observed between the felsic dikes studied and the A-type granites of the Rio Maria and São Felix do Xingu regions, demonstrate that the bimodal magmatism of the Tucumã area is a clear evidence that the Paleoproterozoic magmatism of the Carajás Province has been formed by processes involving thermal perturbations in the upper mantle, mafic underplating, and associated extension or transtension of the crust.

Keywords: Dikes, Bimodal magmatism, Proterozoic, Carajás Province.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPÍTULO I

Figura 1. Mapa de localização da área de estudo.....	3
Figura 2. Províncias geocronológicas do Cráton Amazônico.....	5
Figura 3. Mapa geológico da província Carajás com ênfase na área de trabalho	7
Figura 4. Mapa geológico da região de Tucumã de acordo com Vasquez et al., 2008.....	10

CAPÍTULO II

Figure 1. Map of tectonic domains and Geological map of Tucumã region dikes.....	16
Figure 2. Felsic dikes crosscutting the country rock	17
Figure 3. Macroscopic appearance of Tucumã felsic to mafic rocks.....	18
Figure 4. Microscopic aspects of Tucumã felsic to mafic rocks.....	22
Figure 5. Geochemical classification diagrams to the rocks of Tucumã.....	26
Figure 6. Harker diagrams for selected major and minor elements for the Tucumã dikes.....	28
Figure 7. Harker diagrams for selected trace elements for the Tucumã dikes.....	30
Figure 8. REE and multielements pattern for felsic, intermediate and mafic rocks.....	32
Figure 9. Tectonic environment and classification diagrams for mafic and felsic dikes.....	34
Figure 10. Concordia diagrams showing U/Pb analyses for zircons from samples of felsic dikes.....	35
Figure 11. Variation diagrams with calculated fractionating vectors	37
Figure 12. Sm/Nd vs. Ba/Sr; ((Ti/1000)/Nb) vs. (P/1000); REE and multielements diagrams to modeling the intermediate dikes origin.....	39
Figure 13. Flowchart and schematic model for the genesis of mafic and felsic magmas and their emplacement in continental crust.....	41

LISTA DE TABELAS**CAPÍTULO I**

Tabela 1. Síntese dos dados geocronológicos da província Carajás.....	5
---	---

CAPÍTULO II

Table 1. Proterozoic A type geochronology data of Carajás province.....	14
Table 2. Chemical composition of felsic dikes of Tucumã.....	23
Table 3. Chemical composition of mafic and intermediate dikes of Tucumã.....	24
Table 4. U-Pb zircon data for felsic dikes of Tucumã region.....	35

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	v
RESUMO	vii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	xi
LISTA DE TABELAS	xii
CAPÍTULO I	1
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.2 GEOLOGIA REGIONAL	3
1.2.1 Diques Paleoproterozoicos do TGGRM.....	5
1.3 JUSTIFICATIVA	8
1.4 OBJETIVOS	9
1.5 MATERIAIS E MÉTODOS:	9
1.5.1 Pesquisa Bibliográfica	9
1.5.2 Mapeamento Geológico.....	9
1.5.3 Petrografia	10
1.5.4 Geoquímica.....	11
1.5.5 Geocronologia	11
CAPÍTULO II	12
Abstract.....	12
1. INTRODUCTION	13
2. GEOLOGICAL SETTING.....	13
3. FIELD ASPECTS.....	15
4. PETROGRAPHY	17
4.1. FELSIC DIKES	19
4.2. MAFIC DIKES.....	20
4.3. INTERMEDIATE DIKES.....	20
5. WHOLE-ROCK GEOCHEMISTRY	21
5.1. INTRODUCTION	21
5.2. GEOCHEMICAL CLASSIFICATION.....	25
5.3. MAJOR AND TRACE ELEMENT BEHAVIOR	25
5.4. RARE-EARTH ELEMENTS	29
5.5. CLASSIFICATION AND TECTONIC AFFINITY	31
6. GEOCHRONOLOGY (U-PB)	33
7. DISCUSSION.....	36
7.1. FRACTIONAL CRYSTALLIZATION PROCESS.....	36

7.2. A MODEL FOR DACITE AND ANDESITE GENESIS	37
7.3. MAGMA FORMATION AND TECTONIC SIGNIFICANCE	39
8. SUMMARY AND CONCLUSIONS	40
ACKNOWLEDGEMENTS	42
REFERENCES	43
CAPÍTULO III	50
3. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
REFERÊNCIAS	53
ANEXO	60

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

A Província Carajás é considerada uma das mais importantes províncias metalogenéticas do mundo, com ocorrência de uma grande diversidade de depósitos minerais, onde destacam-se aqueles de ferro, ouro, manganês, níquel, cobre, estanho e ainda, com perspectivas de novas descobertas. Isto motivou a realização de diversos estudos nas últimas décadas, os quais produziram uma grande quantidade de informações, melhorando substancialmente a qualidade dos mapas geológicos e possibilitando a individualização e correlação de unidades litoestratigráficas distintas. Com base nessas informações, Santos (2003) dividiu a Província Carajás em dois terrenos tectonicamente distintos: 1) Domínio Rio Maria, constituído por rochas mesoarqueanas (3,0 – 2,87 Ga) e o Domínio Carajás, afetado por eventos meso- e neo-arqueanos (2,76 Ga). As principais informações sobre a Província Carajás, assim como a representação em mapa de seus limites tectônicos, podem ser visualizado na síntese realizada por Vasquez et al., (2008).

O Grupo de Pesquisa Petrologia de Granitoides da Universidade Federal do Pará (GPPG), em colaboração do Laboratório de Geologia Isotópica desta instituição (PARA-ISO), realizou nas últimas décadas diversos trabalhos na Província Carajás, procurando, com ênfase em dados petrológicos e geocronológicos, individualizar e determinar os principais aspectos evolutivos das rochas granitoides desta região. Inicialmente estes estudos haviam se concentrado no Domínio Rio Maria, porção sul da província, onde diversas unidades arqueanas foram individualizadas e inúmeros plútons graníticos e diques associados, foram considerados como afins daqueles de assinatura geoquímica do tipo-A e agrupados em suítes graníticas paleoproterozoicas distintas em termos de fugacidade de oxigênio (Dall’Agnol et al., 1999, 2005; Teixeira et al., 2002; Oliveira et al., 2010).

Neste contexto, os diques constituem um mecanismo importante para o transporte de magma, e representam o início de um rifteamento ou, no mínimo, manifestações de extensão crustal que permitiram colocar através da crosta quantidades expressivas de magma, em especial no Paleoproterozoico (Rivalenti et al., 1998; Silva Jr et al., 1999; Oliveira et al., 2008, 2010). No entanto, a área de Tucumã (Figura 1), localizada próximo do limite inferido para os domínios tectônicos de Rio Maria e Carajás, ainda encontra-se pobremente caracterizada, com grande parte dos trabalhos desenvolvidos dispondo apenas de informações de cunho regional. De acordo com Macambira & Vale (1997), a área de Tucumã está inserida dentro do contexto

geológico do Terreno Granito-*Greenstone* do Sul do Pará, que corresponde às sequências supracrustais e granitoides milonitizados do tipo Rio Maria, afetados pelo Cinturão Itacaiúnas, e intrudidos por granitos da Suíte Intrusiva Velho Guilherme. Estes autores relatam ainda, a ocorrência de diques félsicos discordantes às demais unidades, e os associam à Formação Iriri, a qual corresponderia a um vulcanismo fissural efusivo bimodal formado no final do Paleoproterozoico (Fernandes et al., 2006). Posteriormente, Juliani & Fernandes (2010), redefiniram esta formação, atribuindo a sua sequência basal de afinidade cálcio-alcálica à Formação Sobreiro, e aquela superior de assinatura alcálica intraplaca à Formação Santa Rosa.

Devido à falta de caracterização das feições geológicas, petrográficas, geoquímicas e geocronológicas dos diques félsicos da área de Tucumã, é proposto para este trabalho estudos detalhados de tais aspectos, a fim de gerar um mapa de distribuição destes corpos, mostrando a disposição espacial dos mesmos, definir suas afinidades geoquímicas, tipologia e relações com o magmatismo máfico e intermediário da área, além de determinar suas idades de cristalização. Será realizado ainda, a partir das informações geradas, um estudo comparativo com os corpos análogos da região de Rio Maria, e daqueles relacionados ao vulcanismo Uatumã da região de São Félix do Xingu. Isto contribuirá para uma melhor compreensão da evolução e gênese destes corpos, além de um melhor entendimento sobre o magmatismo paleoproterozoico da Província Carajás.

Esta dissertação encontra-se estruturada com o objetivo de apresentar os principais resultados obtidos na forma de um artigo científico, sendo a mesma constituída de um capítulo introdutório (Capítulo 1), o qual aborda o contexto geológico regional, as problemáticas, os objetivos e os materiais e métodos utilizados na pesquisa. O capítulo 2 (artigo científico) compreende a caracterização petrográfica, idade e assinatura geoquímica dos diques de Tucumã, bem como uma discussão sobre a geração e processos envolvidos na evolução de seus magmas, utilizando-se para isso, cálculos de modelagem geoquímica - BIMODAL MAGMATISM OF TUCUMÃ AREA, CARAJÁS PROVINCE: U-Pb GEOCHRONOLOGY, CLASSIFICATION AND PROCESSES. No terceiro e último capítulo, será apresentada uma descrição conjunta das principais conclusões do artigo mencionado acima, buscando-se com isso, fornecer uma visão integrada dos principais resultados e contribuições para a evolução do conhecimento geológico da área de Tucumã.

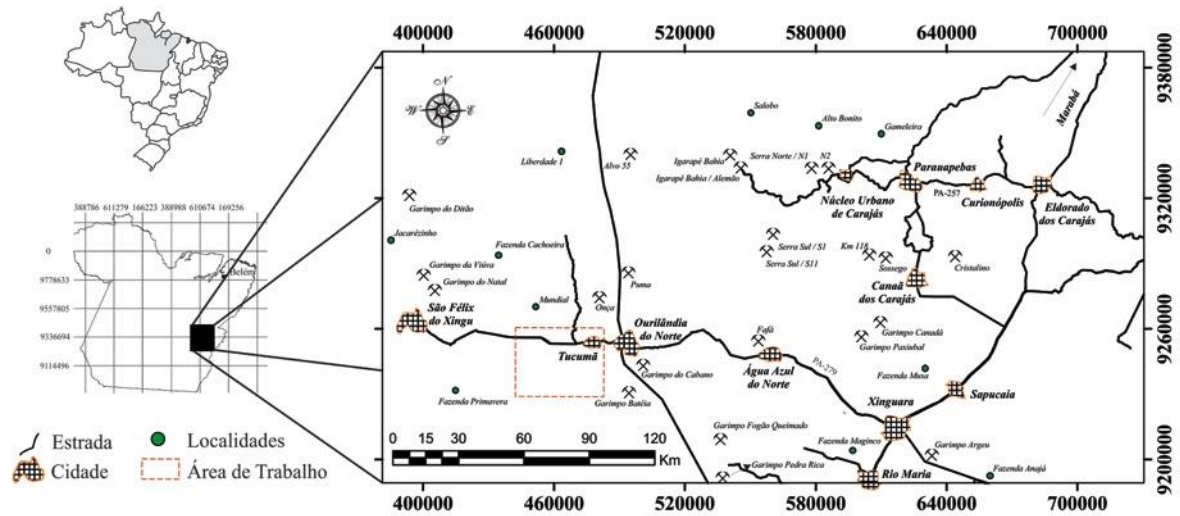


Figura 1. Localização da área de trabalho.

1.2 GEOLOGIA REGIONAL

A área de Tucumã está inserida no contexto geológico do Terreno Granito-*Greenstone* de Rio Maria (TGGRM), borda sudeste do Cráton Amazônico (Figura 2), dentro do Bloco Carajás (Santos et al., 2000) ou Província Amazônia Central (Tassinari & Macambira, 2004). As unidades geológicas descritas no TGGRM compreendem às sequências de *greenstone belts* do Supergrupo Andorinhas, composta por rochas metaultramáficas e metamáficas, correspondendo por vezes a metabasaltos com estrutura em *pillow*, metavulcânicas intermediárias e ácidas intercaladas com rochas metassedimentares clásticas e químicas, com idades de 3046 ± 32 Ma a 2904 ± 5 Ma (Macambira & Lancelot, 1992; Souza, 1994; Pimentel & Machado, 1994; Avelar et al., 1996; Souza et al., 2001; Rolando & Macambira, 2003). Estas foram intrudidas por uma variedade de granitoides arqueanos originados entre 2,98 e 2,86 Ga, que foram separados com base em seus aspectos petrográficos, geoquímicos e geocronológicos em cinco grupos: 1- Séries TTG mais antigas (2,98 a 2,92 Ga), representadas pelo Tonalito Arco Verde (Althoff et al., 2000) e Complexo Tonalítico Caracol (Leite, 2001; Leite et al., 2004), sendo recentemente incluídas neste grupo as unidades Tonalito Mariazinha (Guimarães, 2009; Almeida et al., 2011) e Trondhjemitó Mogno (Huhn et al., 1988), que teve sua idade e posicionamento estratigráfico redefinido por Almeida et al. (2011); 2- Granitoides de alto Mg, que compõem a Suíte Sanukitoide Rio Maria (2,87 Ga), representada pelo Grano-diorito Rio Maria e rochas associadas (Huhn et al., 1988; Medeiros et al., 1988; Althoff et al., 2000; Oliveira, 2009), além do Granito Rancho de Deus da área de Pau D'Arco (Almeida et al., 2013); 3- Série TTG mais jovem (2,86 Ga), representada pelo Trondhjemitó Água Fria (Leite, 2001;

Leite et al., 2004); 4- Leucogranitos Potássicos de afinidade Cálcio-alcálica (2,87-2,86 Ga), representados pelos granitos Xinguara (Leite et al., 2004), Mata Surrão (Duarte & Dall'Agnol, 1996; Althoff et al., 2000) e pequenos *stocks* e apófises disseminados ao longo do TGGRM (Almeida et al., 2008); e 5- Leucogranodioritos-granitos de alto Ba-Sr (~2,87 Ga), que afloram predominantemente na área de Pau D'Arco e são representados pelos plútons Guarantã, Azulona e Trairão, agrupados na Suíte Guarantã (Dias, 2009; Almeida et al., 2011, 2013; Figura 3).

Durante o Paleoproterozoico, a Província Carajás foi palco de um extenso magmatismo granítico anorogênico com afinidades geoquímicas do tipo-A e caráter meta a peraluminoso. Entretanto, mostram diferenças significativas em termos de geoquímica, suscetibilidade magnética (SM) e mineralizações associadas. Sendo assim, três suítes ou grupos de granitos puderam ser distinguidos (Dall'Agnol et al., 1999, 2005; Teixeira et al., 2002; Dall'Agnol & Oliveira, 2007; Lamarão et al., 2012): 1- Suíte Jamon, formada por granitos da série magnetita, que possuem alta razão Fe/(Fe+Mg), alto valor de SM e, localmente, mineralizações de wolframita associadas, sendo constituída pelos plútons Jamon, Musa, Redenção, Marajoara, Bannach e Manda Saia; 2- Suíte Serra dos Carajás, formada por granitos com moderada SM, razão Fe/(Fe+Mg) muito alta e, as vezes, com molibdenita e sulfeto de cobre disseminados (maciços Serra dos Carajás, Cigano e Pojuca); 3- Suíte Velho Guilherme, formada por maciços mineralizados em estanho, dominados por leucogranitos extremamente evoluídos, também com alta razão Fe/(Fe+Mg) e, geralmente, mostrando baixos valores de SM, exemplificados pelos maciços Xingu, Mocambo, Ubim, Antônio Vicente e Velho Guilherme. Esses granitos apresentam-se por vezes associados a rochas vulcânicas de composições intermediárias a félsicas, além de ocorrências subordinadas de rochas plutônicas máficas e diques félsicos a máficos (Dall'Agnol et al., 1999, 2002; Silva Jr. et al., 2009; Oliveira, 2006; Teixeira et al., 2002). Quando datados pelos métodos U/Pb e Pb/Pb em zircões e Pb/Pb em RT, forneceram idades de cristalização e colocação próximas de 1,88 Ga (Barbosa et al., 1995; Dall'Agnol et al., 1999; Ferreira, 2009; Tabela 1). Por outro lado, os plútons Seringa e São João, apesar de não apresentarem afinidade clara com uma das suítes supracitadas, é sugerido por Paiva Jr. et al., (2011) e Lima et al., (2014) que tais corpos sejam afins daqueles que constituem a Suíte Serra dos Carajás.

São granitos intraplaca, não foliados, de alto nível crustal, os quais são colocados em uma crosta rígida e estão em contato discordante com suas encaixantes. A distribuição de suas fácies indica, em geral, um zoneamento concêntrico, com as fácies mais evoluídas ocupando a porção central dos maciços (Oliveira et al., 2008). Nas zonas de contato, xenólitos das rochas

encaixantes são comumente encontrados nestes granitos, e efeitos termais nas rochas adjacentes alcançam metamorfismo de contato na fácies hornblenda *hornfels* (Soares, 1996).

1.2.1 Diques Paleoproterozoicos do TGGRM

No TGGRM são encontrados diques félsicos a máficos sob forma de corpos subverticais, tabulares, com espessuras de até 10 a 20m e extensão aflorante variável podendo, em casos excepcionais, atingir 1.500 a 2.000 m.

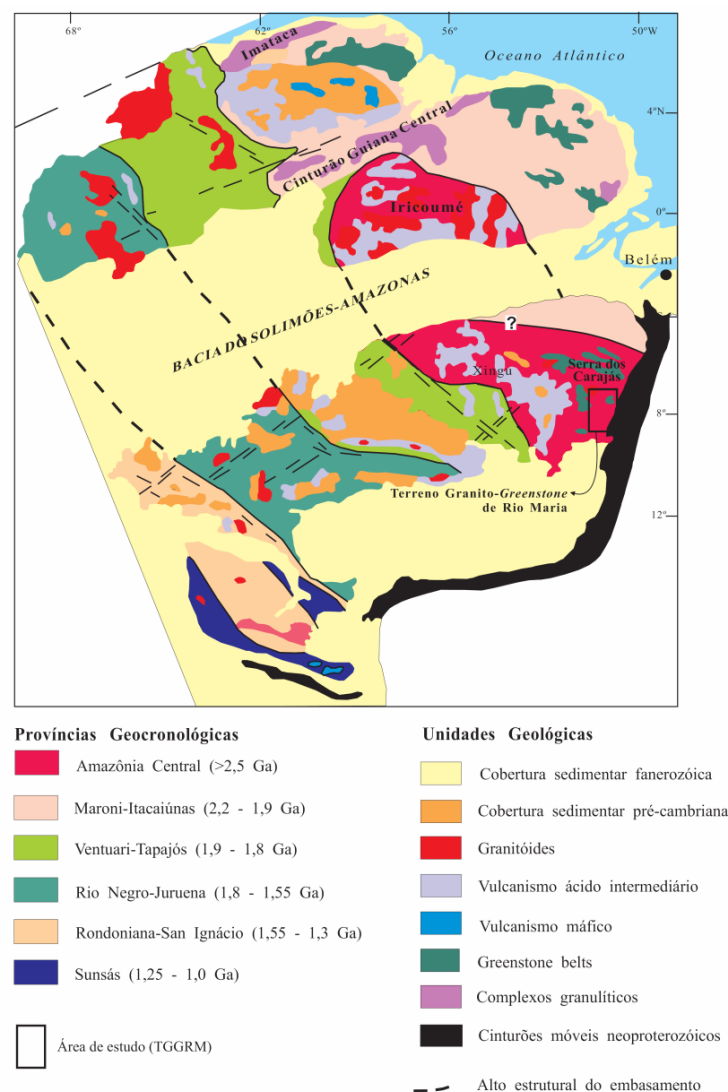


Figura 2 - Províncias geocronológicas do Cráton Amazônico (Tassinari & Macambira, 2004).

Tabela 1. Síntese dos dados geocronológicos dos granitos anorogênicos e diques paleoproterozoicos da Província Carajás.

Unidade	Método	Material Analisado	Idade/referência
Proterozoico			
Carajás			
Granito Cigano	U-Pb	Zircão	1883±2 Ma ⁽¹⁾

Granito Serra dos Carajás	U-Pb	Zircão	1880±2 Ma ⁽¹⁾
Granito Pojuca	U-Pb	Zircão	1874±2 Ma ⁽¹⁾
Dominio Rio Maria			
Granito Musa	U-Pb	Zircão	1883±52 Ma ⁽¹⁾
Granito Jamon	Pb-Pb	Zircão	1885±32 Ma ⁽²⁾
Granito Redenção	Pb-Pb	Zircão	1870±68 Ma ⁽²⁾
Granito Seringa	Pb-Pb	Zircão	1890±2 Ma ⁽³⁾
Granito Marajoara	Rb-Sr	Rocha total	1724±50 Ma ⁽⁴⁾
Granito São João	Pb-Pb	Zircão	1895±50 Ma ⁽³⁾
Região Do Xingu			
Granito Velho Guilherme	Pb-Pb	Rocha Total	1823±13 Ma ⁽⁶⁾
Granito Antônio Vicente	Pb-Pb	Zircão	1867±4 Ma ⁽⁷⁾
Granito Mocambo	Pb-Pb	Zircão	1865±4 Ma ⁽⁷⁾
Diques			
Dique Félsico	Pb-Pb	Zircão	1885±2Ma ⁽⁸⁾
Dique Félsico	Rb-Sr	Rocha Total	1707±17Ma ⁽⁹⁾
Dique Intermediário	Rb-Sr	Rocha Total	1874±110Ma ⁽¹⁰⁾
Dique Máfico	K-Ar	Conc Máfico	1802±22Ma ⁽¹¹⁾
Dique Riolitico	Pb-Pb	Zircão	1887±2 Ma ⁽¹²⁾
Dique Riolitico	Pb-Pb	Zircão	1879±2 Ma ⁽¹²⁾

Fonte de dados: ⁽¹⁾Machado et al. (1991); ⁽²⁾Dall'Agnol et al. (1999); ⁽³⁾Lima 2011 (1992); ⁽⁴⁾Macambira (1992); ⁽⁵⁾Paiva Jr. (2009); ⁽⁶⁾Rodrigues et al. (1992); ⁽⁷⁾Teixeira (1999); ⁽⁸⁾Oliveira (2006); ⁽⁹⁾Gastal (1987); ⁽¹⁰⁾Rivalenti et al. (1998); ⁽¹¹⁾Silva Jr. (1999); ⁽¹²⁾Ferreira (2009).

Estes cortam as unidades arqueanas e, localmente, os granitos proterozoicos (Rivalenti et al., 1998; Silva Jr. et al., 1999; Oliveira, 2006). Idades obtidas para os diques máficos (1802 ± 22 Ma, K-Ar, em concentrados máficos; Silva Jr., 1996), intermediários (1874 ± 110 Ma, Rb-Sr, isócrona em rocha total (IRT); Rivalenti et al., 1998) e félsicos (1707 ± 17 Ma, Rb-Sr, IRT, Gastal., 1987; 1885 ± 2 Ma, Pb-Pb em zircão, Oliveira, 2006; 1879 ± 2 Ma, Pb-Pb em zircão, Ferreira et al., 2010), demonstraram que estes se formaram no final do Paleoproterozoico, sendo aproximadamente sincrônicos do magmatismo anorogênico, que ocorreu na Província Carajás. Silva Jr. et al. (1999) e Ferreira (2009) mostraram que estes diques podem ser separados com base em suas características petrográficas e geoquímicas em três grandes associações magmáticas, ao que tudo indica, de origens distintas: (1) diabásios; (2) andesitos e quartzo-andesitos; (3) diques félsicos classificados como dacitos e riolitos pórfiros, similares mineralógica e geoquimicamente aos granitos anorogênicos. Os dados geoquímicos disponíveis indicam que as três associações não devem ter evoluído a partir de um mesmo magma parental por cristalização fracionada ou outros processos magmáticos (Silva Jr. et al., 1999).

Trabalhos de campo na região de Rio Maria levaram a descoberta de um dique composto (Dall'Agnol et al., 2002), formado por um granito pórfiro e um diabásio, seccio

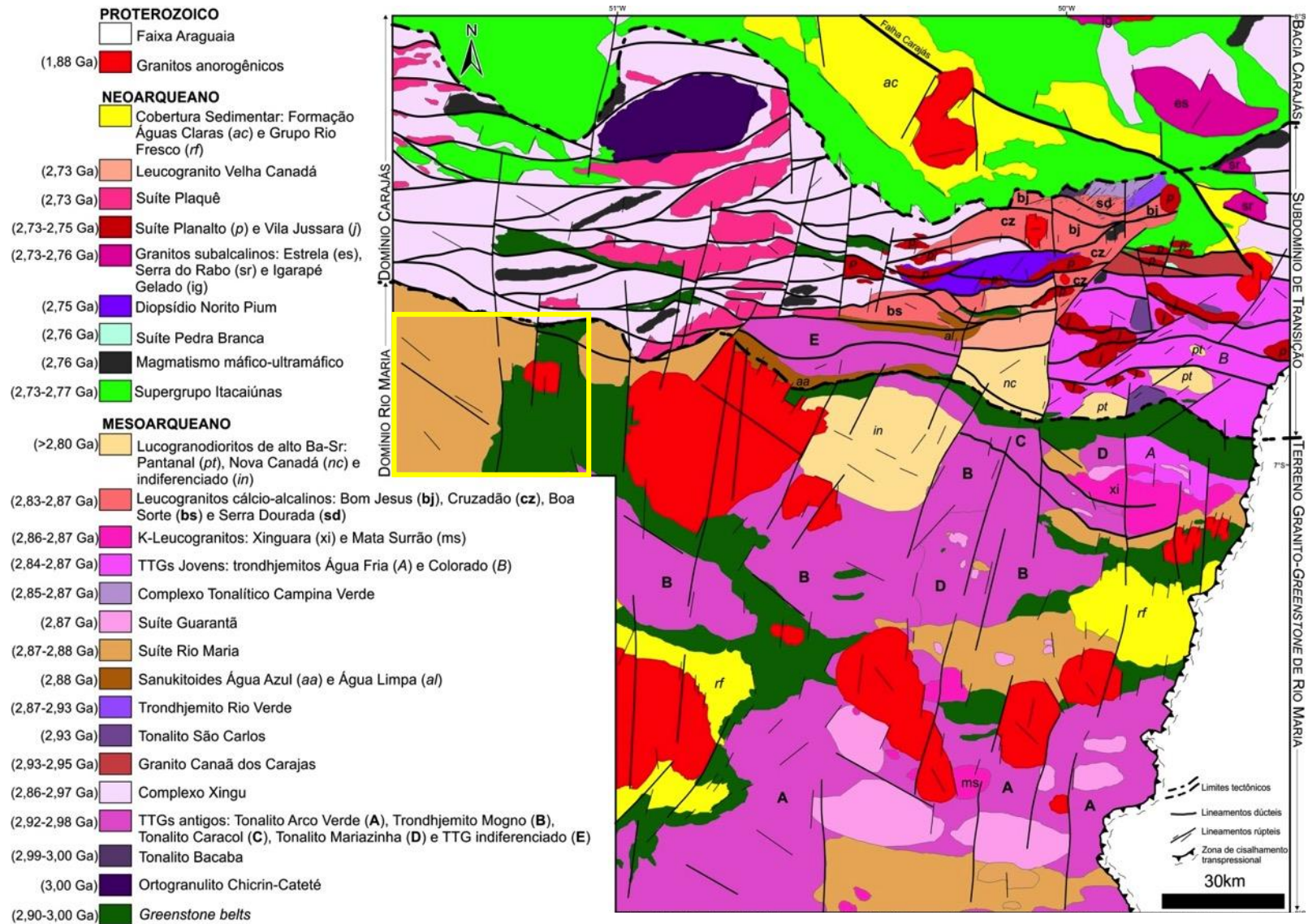


Figura 3. Mapa geológico da Província Carajás, onde está destacada no extremo oeste, a área de trabalho. Mapa modificado de Oliveira et al. (2014).

nando o Granodiorito Rio Maria e aflorando próximo ao contato deste último com o Granito Musa. Dados geocronológicos forneceram uma idade de 1885 ± 4 Ma para o granito pórfiro, que também pode ser admitida como de cristalização do dique máfico associado, pois este apresenta evidências de coexistência no estado parcialmente líquido com o magma formador do riolito (Dall’Agnol et al., 2002; Oliveira, 2006). Na região de Tucumã, Macambira & Vale (1997) associam a ocorrência de diques félsicos à Formação Iriri, a qual corresponderia a um vulcanismo fissural efusivo bimodal formado no final do Paleoproterozoico (Fernandes et al., 2006).

1.3 JUSTIFICATIVA

Contrariamente ao que se observa na região de Rio Maria, onde os levantamentos geológicos realizados em escala de detalhe (1:50.000) permitiram a identificação de diversas ocorrências de corpos intrusivos tabulares (diques), na área de Tucumã tais levantamentos foram realizados apenas em escala regional, estando disponíveis apenas as informações obtidas pelo Serviço Geológico Brasileiro em escala 1:2500.000 (Figura 4). Portanto, levando-se em consideração a escassez de dados geológicos disponíveis na região de Tucumã, foram identificados os seguintes problemas sobre a ocorrência de corpos intrusivos hipabissais na área: **(i)** não se tem conhecimento da representatividade dos diques na área de Tucumã; **(ii)** ausência de uma caracterização petrográfica dessas rochas; **(iii)** idade de formação ainda desconhecida; e **(iv)** classificação e afinidades geoquímicas indefinidas.

Adicionalmente, considerando que corpos tabulares representam um importante mecanismo para o transporte de magma, e que geralmente evidenciam a atuação de processos de distensão crustal (*rifft*), a falta de uma caracterização daqueles que ocorrem na área de Tucumã, nos permite levantar alguns questionamentos sobre os processos envolvidos para geração, evolução, interação e colocação de líquidos na crosta:

- (i). Qual a relação entre os principais tipos de diques que ocorrem na área?
- (ii). Quais os processos magmáticos envolvidos na evolução dessas rochas?
- (iii). Qual a participação de cada variedade nestes processos (p. ex., mistura de magmas)?
- (iv). Os tipos identificados representariam a ocorrência de um magmatismo bimodal, análogo aquele descrito na área de Rio Maria, ou seria afim daquele de São Félix do Xingu?
- (v). Qual o papel destes diques no contexto tectônico regional da Província Carajás e qual a sua relação com a origem e colocação dos granitos Tipo-A?

1.4 OBJETIVOS

A meta geral deste trabalho é a caracterização dos principais aspectos geológicos, texturais e geoquímicos dos diques félsicos da área de Tucumã, bem como a determinação da idade do magmatismo que os originou. Pretende-se, ainda, compará-los com outros corpos análogos já estudados na Província Carajás. Busca-se com isso, contribuir para a discussão sobre a evolução crustal deste segmento do Cráton Amazônico. Portanto, com base nestas informações, estão sendo propostos para a execução deste trabalho, os seguintes objetivos específicos:

(i). Elaborar um mapa geológico da área de Tucumã que mostre a ocorrência e representatividade dos diques em escala 1:50.000; priorizando a disposição espacial destes corpos, a relação com as rochas encaixantes e a integração com mapas geológicos de áreas adjacentes;

(ii). Caracterizar geológica e petrograficamente estas rochas a fim de avaliar suas variações texturais, discutir as transformações tardi a pós-magmáticas, além de determinar as eventuais feições de desequilíbrio presentes nas mesmas.

(iii). Caracterizar geoquimicamente os principais tipos identificados, a fim de determinar suas afinidades ou tipologia, ambiente de formação e os processos que controlam a sua evolução magmática;

(iv). Obter a idade de cristalização dos diques félsicos e intermediários com intuito de definir suas posições estratigráficas e significado tectônico; e

(v). Estabelecer comparações entre esses corpos e as demais unidades paleoproterozoicas análogas, com o intuito de definir e caracterizar suas possíveis similaridades.

1.5 MATERIAIS E MÉTODOS:

1.5.1 Pesquisa Bibliográfica - levantamento bibliográfico referente à geologia da região, caráter geoquímica e aspectos petrológicos da área estudada, onde incluem-se artigos científicos, dissertações de mestrado e teses de doutorado, sobre temas específicos, concernentes à evolução e gênese de granitos proterozoicos.

1.5.2 Mapeamento Geológico - foi realizado um mapeamento geológico da área na escala de 1:50.000, com o objetivo de descrever os principais afloramentos dos diques e suas variações litológicas, enfatizando as relações entre as variedades formadores dos diques, bem como destas

com suas rochas encaixantes. Para a localização dos pontos descritos e amostrados foi utilizado um GPS (Global Position System) com precisão de aproximadamente 10 m.

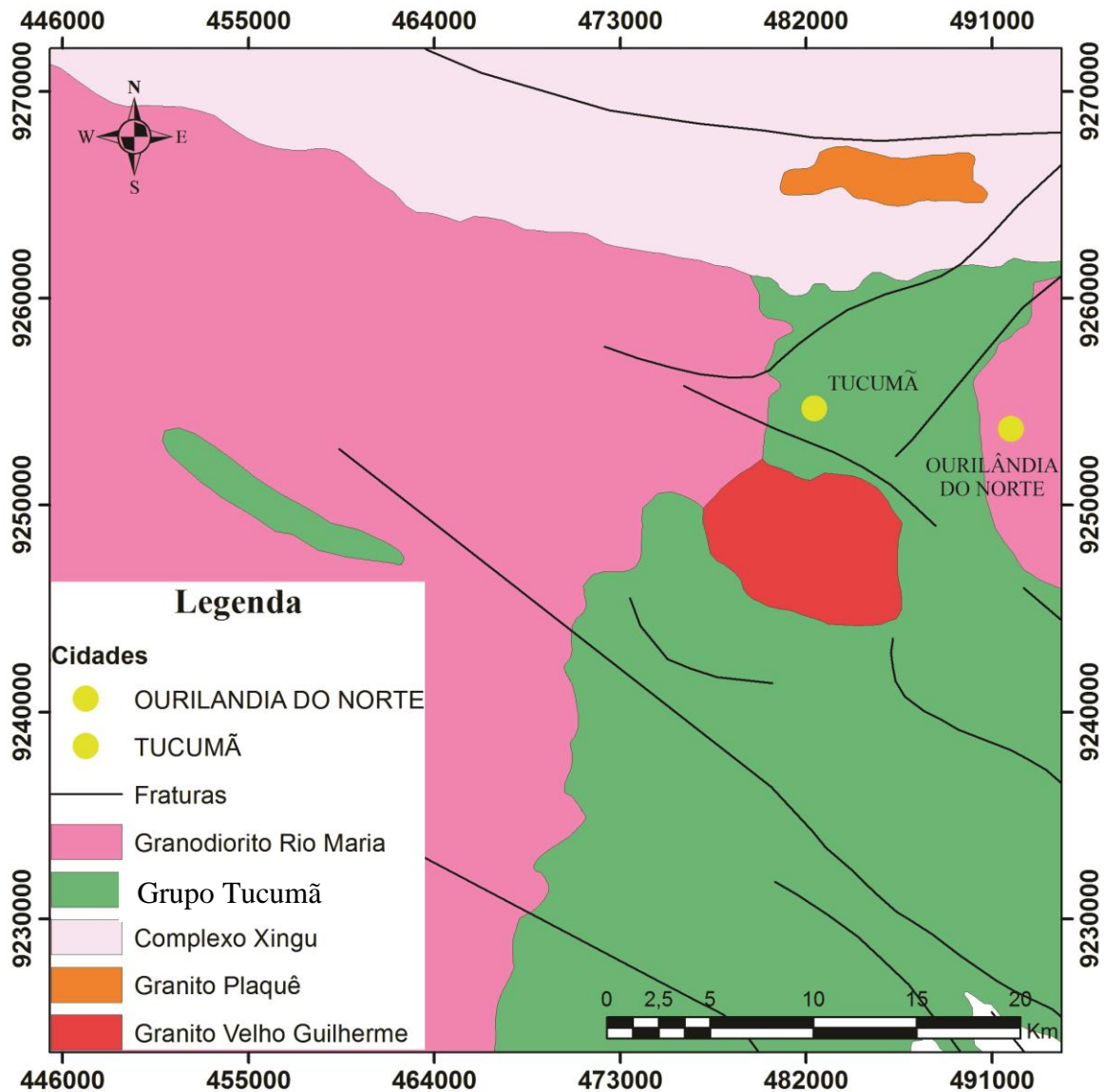


Figura 4. Mapa geológico da região de Tucumã de acordo com Vasquez et al. (2008).

1.5.3 Petrografia - A caracterização petrográfica foi feita com base no estudo macroscópico sistemático, seguido de estudo de lâminas delgadas em microscópio petrográfico, envolvendo: identificação dos minerais (Kerr, 1959; Deer et al., 1992) e descrição sistemática; estudo das texturas magmáticas, de desequilíbrio e alteração (Bard, 1980; Mackenzie et al., 1982; Hibbard, 1995); estimativa da ordem de cristalização dos minerais, quando possível (Dall’Agnol, 1982; Hibbard, 1995; Oliveira, 2001); classificação e caracterização das rochas, conforme estabelecido pela IUGS (Streckeisen, 1976; Le Maitre et al., 1989; McPhie, Doyle & Allen, 1993).

1.5.4 Geoquímica – Para os estudos geoquímicos foram previamente selecionadas com base nos estudos petrográficos amostras representativas das diferentes variedades dos corpos estudados. As análises de rocha total foram feitas pela ACME Analytical Laboratories Ltda. (Vancouver, Canadá), sendo dosados os conteúdos de elementos maiores e menores (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3^t , MgO , CaO , Na_2O , TiO_2 , Cr_2O_3 , P_2O_5 , Perda ao Fogo-PF) e elementos-traço (Zn, Cu, Pb, Ba, Be, Cs, Ga, Hf, Nb, Rb, Sn, Sr, Ta, Th, U, W, Zr, Bi), incluindo terras raras (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb e Lu). Os elementos maiores e menores foram analisados por ICP-ES e os elementos-traço e terras raras por ICP-MS. A caracterização geoquímica dos diques estudados foi baseada em princípios gerais discutidos em Ragland (1989) e Rollinson (1993). Com o intuito de definir a série magmática e a tipologia das rochas, foram utilizados diagramas de variação clássicos e vários diagramas de classificação propostos na literatura (Shand, 1943; La Roche et al., 1980; Pearce et al., 1984; Whalen et al., 1987; Debon & Lefort, 1988; Frost et al., 2001; Dall’Agnol & Oliveira, 2007). Os processos responsáveis pela evolução magmática foram avaliados por meio do comportamento dos elementos litófilos nas diferentes variedades (Rb, Sr, Ba; Hanson, 1978; Dall’Agnol et al., 1999, e referências indicadas neste último trabalho), bem como pelas assinaturas e comportamento de elementos terras raras (Henderson, 1984; Rollinson, 1993). O modelamento geoquímico foi feito através da construção de vetores para cristalização fracionada além da construção de modelos envolvendo AFC e mistura binária simples, utilizando-se das equações de De Paolo, (1981).

1.5.5 Geocronologia - As datações geocronológicas foram realizadas no laboratório de geocronologia de alta resolução da USP, utilizando a metodologia de U-Pb em SHRIMP. Os cristais foram extraídos das amostras utilizando-se o método clássico de separação de minerais pesados, que envolve trituração, pulverização, elutriação, separação magnética e concentração com uso de bromofórmio. Para o procedimento foram preparadas duas montagens uma com 70 e outra com 48 zircões, os quais foram selecionados para análises de acordo com sua morfologia e cor, além da preocupação de levar em consideração todas as variedades de cristais. No total, foram escolhidos 33 cristais para análise. O tratamento posterior dos dados geocronológicos se deu através da redução sistemática dos dados com base em conceitos pré-estabelecidos, além da utilização do *software* ISOPLOT 4 para a geração de diagramas de concórdia e isócronas.

CAPÍTULO II

BIMODAL MAGMATISM OF THE TUCUMÃ AREA, CARAJÁS PROVINCE: U-Pb GEOCHRONOLOGY, CLASSIFICATION AND PROCESSES

Fernando Fernandes da Silva¹ (ffernandes@ufpa.br), Davis Carvalho de Oliveira¹ (davis@ufpa.br), Paul Y.J Antonio² (antonio_pipot69@hotmail.com), Manoel S. D'Agrella Filho² (dagrella@iag.usp.br), Claudio Nery Lamarão¹ (lamarao@ufpa.br)

¹ Grupo de Pesquisa Petrologia de Granitoides (GPPG) - Instituto de Geociências (IG) Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica Universidade Federal do Pará (UFPA). CEP-66075-900, Belém, Pará. (PPGG) – IG – UFPA

² Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) - Universidade de São Paulo, Rua do Matão, 1226, Cidade Universitária, 05508-090 São Paulo – Brasil.

Abstract

Geological mapping of the Tucumã area has enabled the identification of dike swarms intruded into an Archean basement. The disposition of these dikes is consistent with the well-defined NW-SE trending regional faults, and they can reach up to 20 kilometers in length. They were divided into three main groups: (i) felsic dikes (70% of the dikes), composed exclusively of porphyritic rhyolites with euhedral phenocrysts of quartz and feldspars immersed in an aphyric felsite matrix; (ii) mafic dikes, with restricted occurrence, composed of basaltic andesites and subordinate basalts, with a mineralogical assembly consisting dominantly of plagioclase, clinopyroxene, orthopyroxene and olivine; and (iii) intermediate rocks, represented by andesites and dacites. Dacitic rocks are found in outcrops associated with felsic dikes, representing different degrees of hybridization or mixture of mafic and felsic magmas. This is evidenced by a large number of mafic enclaves in the felsic dikes and the frequent presence of embayment textures. SHRIMP U-Pb zircon dating of felsic dikes yielded an age of 1888 ± 3.3 Ma. The felsic dikes are peraluminous to slightly metaluminous and akin to A2, ferroan and reduced granites. The intermediate and mafic dikes are metaluminous and belong to the tholeiitic series. Geochemical modeling showed that mafic rocks evolved by pyroxene and plagioclase crystallization, while K-feldspar and biotite are the fractionate phases in felsic magma. A simple binary mixture model was used to determine the origin of intermediate rocks. It indicated that mixing 60% of rhyolite and 40% basaltic andesite melts could generate the dacitic composition, while the andesite liquid

could be produced by mixing of 60% and 40% basaltic andesite and rhyolite melts, respectively. The mixing of basaltic and andesitic magmas probably occurred during ascent and storage in the crust, where andesitic dikes are likely produced by a more homogeneous mixture at high depths in the continental crust (mixing), while dacite dikes can be generated in the upper crust at a lower temperature, providing a less efficient mixing process (mingling). The affinities observed between the felsic to intermediate rocks of the Rio Maria and São Felix do Xingu areas and the bimodal magmatism of the Tucumã area reinforce the hypothesis that in the Paleoproterozoic the Carajás province was affected by processes involving thermal perturbations in the upper mantle, mafic underplating, and associated crustal extension or transtension.

Keywords: Carajás Province, Dikes, Bimodal magmatism, Magma mixing.

1. INTRODUCTION

Dike swarms represent conspicuous extensional structures commonly related with magma ascent and are widespread in cratons throughout the world, where most of them were developed in Proterozoic time (Halls et al., 2011; Kumar et al., 2012). The Paleoproterozoic Tucumã dikes were emplaced in Mesoarchean rocks in the northwest of the Rio Maria Domain, which corresponds to the southern portion of the Carajás Province in the southeast of the Amazon Craton. The occurrence of hypabyssal bodies in Rio Maria region has been subject of many works (Rivalenti et al., 1998; Silva Jr. et al., 1999; Oliveira et al., 2008). In general, they exhibit trends parallel to the contemporaneous regional horizontal maximum compressive stress orientations and perpendicular to the extension direction. Considering these statements, the Tucumã dikes swarm can provide the opportunity of putting constraints on the early stages of the crustal distension processes associated with Carajás province, such as the relationships between mafic and felsic dikes and their connections with A-Type magmatism.

2. GEOLOGICAL SETTING

The Tucumã dikes are intrusive in the Mesoarchean rocks of the Rio Maria Granite Greenstone terrain (Souza et al., 1996), which is bounded to the north by the Carajás Meso-Neoproterozoic domain (Santos, 2003; Figure 1b). These domains form the Central Amazonian (Tassinari & Macambira, 2004) or Carajás province (Santos et al., 2000) in the southeastern

portion of the Amazon Craton (Figure 1a), part of the Central Brazilian Shield (Almeida et al., 1981). According Santos et al. (2000), the Carajás province is bounded to the north by the Transamazonas province (Bacajá domain), to the west by Mesoproterozoic Amazonia Central province (Irixi-Xingu domain) and to the East by the Araguaia Belt (Moura & Gaudette, 1993). In the Carajás province, the archaean rocks are commonly intruded by Paleoproterozoic anorogenic granites and associated dikes.

The Archean basement in the Tucumã region includes the Tucumã Group, composed of metaultramafic, metamafic and metasedimentary rocks, which were affected by greenschist facies regional metamorphism (Vasquez et al., 2008). This unit occur as a large number of NW-SE segments located to the south and southeast of the Paleoproterozoic A-type Seringa pluton occurrence area (Araújo & Maia, 1991). Another representative Archean basement rock present in this region is the Rio Maria Granodiorite, composed of biotite-hornblende granodiorite with associated tonalites and monzogranites, intrusive into the Tucumã greens-tone belt (Macambira & Vale, 1997; Figure 1c).

Paleoproterozoic A-type granites are found across the Carajás Province in the form of discordant batholiths formed by isotropic rocks of monzo- and syenogranite compositions, with moderately alkaline chemistry (Dall’Agnol et al., 2005). U-Pb and Pb-Pb zircon dating indicate ages of 1.88 Ga (Wirth et al., 1986; Machado et al., 1991; Barbosa et al., 1995; Table 1). In the Rio Maria Domain, they are represented by Seringa, Gradaús, and São João granites in addition to those of the Jamon Suite, which includes Musa, Jamon, Marajoara, Manda Saia, Bannach, and Redenção plutons, and associate felsic and mafic dikes (Rivalenti et al., 1998; Silva Jr et al., 1999; Dall’Agnol & Oliveira, 2007; Oliveira et al., 2008). A representative of this type of magmatism in the Tucumã area is the Velho Guilherme pluton, representative of the Velho Guilherme Suite composed of Velho Guilherme, Antônio Vicente, Mocambo, Xin-gu, and Bom Jardim plutons. They are part of the Southern Pará Tin Province (Macambira & Vale, 1997; Teixeira et al., 2002).

These plutons transect the Archean rocks of the Xingu Complex, and the Tucumã and São Félix groups. Macambira & Vale (1997) associated the occurrence of felsic dikes with rhyolites of the Irixi Formation, which correspond to an effusive bimodal fissural volcanism formed in the late Paleoproterozoic (Fernandes et al., 2006).

Table 1. Proterozoic A type geochronology of Carajás province.

Unit	Method	Analised Material	Age/reference
Proterozoic			
Carajás domain			
Cigano Granite	U-Pb	Zircon	1883±2 Ma ⁽¹⁾

Granito Serra dos Carajás	U-Pb	Zircon	1880±2 Ma ⁽¹⁾
Granito Pojuca	U-Pb	Zircon	1874±2 Ma ⁽¹⁾
Rio Maria domain			
Granito Musa	U-Pb	Zircon	1883±52 Ma ⁽¹⁾
Granito Jamon	Pb-Pb	Zircon	1885±32 Ma ⁽²⁾
Granito Redenção	Pb-Pb	Zircon	1870±68 Ma ⁽²⁾
Granito Seringa	Pb-Pb	Zircon	1890±2 Ma ⁽³⁾
Granito Marajoara	Rb-Sr	Whole rock	1724±50 Ma ⁽⁴⁾
Granito São João	Pb-Pb	Zircon	1895±50 Ma ⁽⁵⁾
Xingu region			
Granito Velho Guilherme	Pb-Pb	Whole rock	1823±13 Ma ⁽⁶⁾
Granito Antônio Vicente	Pb-Pb	Zircon	1867±4 Ma ⁽⁷⁾
Granito Mocambo	Pb-Pb	Zircon	1865±4 Ma ⁽⁷⁾
Dikes			
Felsic dike	Pb-Pb	Zircon	1885±2Ma ⁽⁸⁾
Felsic dike	Rb-Sr	Whole rock	1707±17Ma ⁽⁹⁾
Intermediate dike	Rb-Sr	Whole rock	1874±110Ma ⁽¹⁰⁾
Mafic dike	K-Ar	Mafic agregate	1802±22Ma ⁽¹¹⁾
Rhyolitic dikes	Pb-Pb	Zircon	1887±2 Ma ⁽¹²⁾
Rhyolitic dikes	Pb-Pb	Zircon	1879±2 Ma ⁽¹²⁾

Data source: ⁽¹⁾Machado et al. (1991); ⁽²⁾Dall'Agnol et al. (1999); ⁽³⁾Lima 2011; ⁽⁴⁾Macambira (1992); ⁽⁵⁾Paiva Jr. (2009); ⁽⁶⁾Rodrigues et al. (1992); ⁽⁷⁾Teixeira (1999); ⁽⁸⁾Oliveira (2006); ⁽⁹⁾Gastal., (1987); ⁽¹⁰⁾Rivalenti et. al. (1998); ⁽¹¹⁾Silva Jr. (1999); ⁽¹²⁾Ferreira (2009).

3. FIELD ASPECTS

Tucumã dike swarms occur in the western portion of Velho Guilherme granite disposed in a kilometers-long NW-SE pattern. They are intruded into an older Archean basement formed by leucogranites, granodiorites and a greenstone belt sequence (Figure 2).

Two main groups of dikes, are the felsic and mafic, account for 70% and 10% of the dikes, respectively. A third group of dikes, denominated intermediate, also can be established (20% of the total). These three groups of dikes are found throughout the working area and are usually associated. The felsic dikes are the longest and show occasional evidence of contamination (Figure 3a). All of them are rhyolites and show a prominent porphyritic texture with noticeable size reduction in porphyry crystals from the core to the rim of the dike as well as an increase in matrix content in the same direction. The mafic dikes are subordinate to the felsic dikes (Figure 1a). They are shorter than the felsic dikes, but like the latter, are free of any contamination. They are fine-grained without any significant variation in grain size.

The intermediate dikes are the most complex group, given that they plot as andesites and dacites on the TAS diagram and show evidence of magma contamination, suggesting that the felsic magma was hybridized with the mafic magma (Figures 3b-c-d). The main evidence for this process is the presence of small round mafic xenoliths (mingling magma) and in some cases, it is possible to identify a greater degree of mixture between the two magmas (mixing magma).

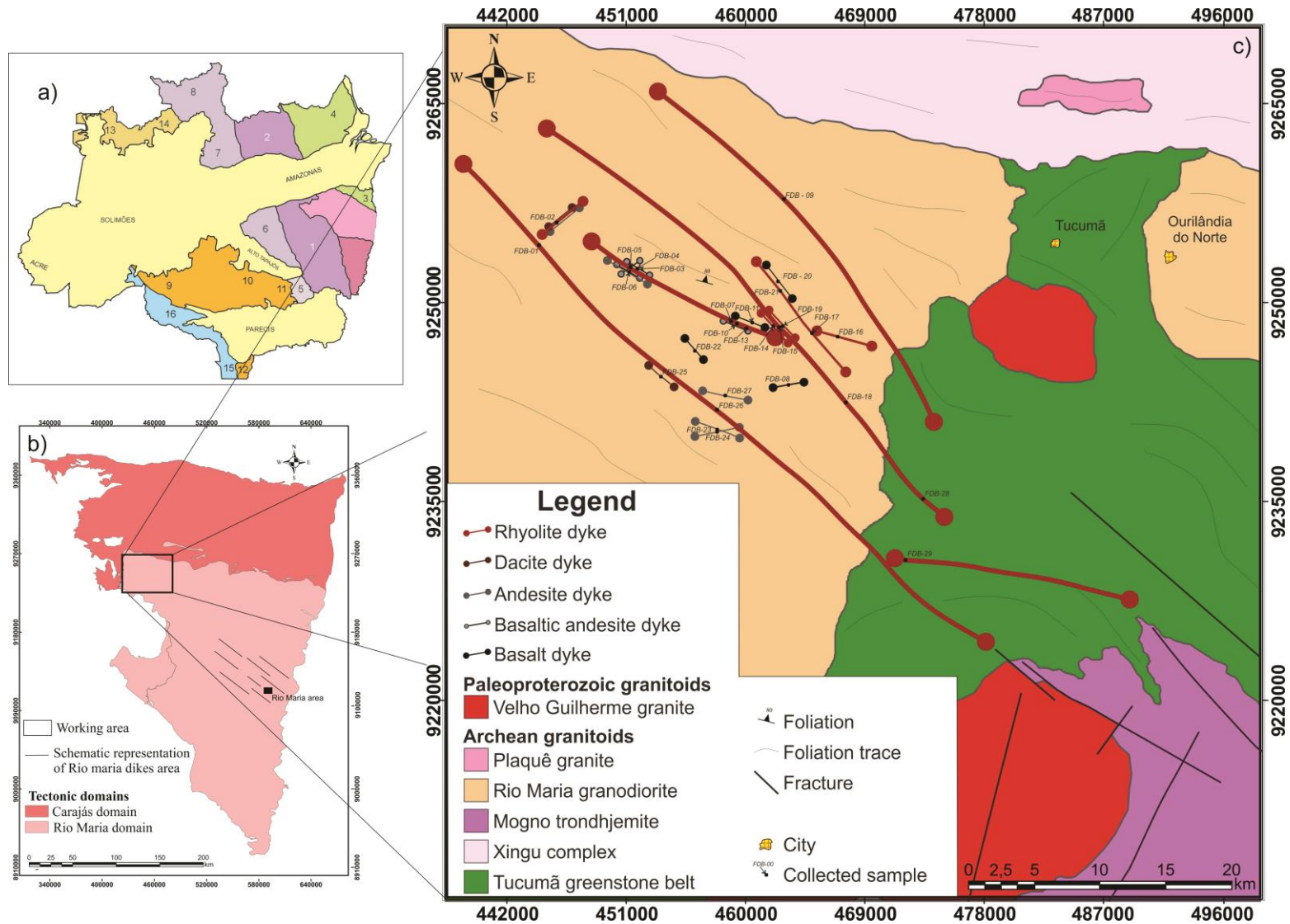


Figure 1. a) Geochronological provinces of the amazon 1, 2 Amazônia central province; 3, 4 Transamazonas province; 5, 6, 7, 8 Tapajós-Parima; 9, 10, 11, 12 Rondônia-Juruena; 13, 14 Rio Negro; 15, 16 Sunsás. b) Map of tectonic domains with a square to highlight the working area (Modified of Oliveira et al., 2014); c) Geological map of Tucumã region dikes.



Figure 2. Felsic dike crosscutting the country rock (greenstone belts sequence).

A peculiarity of this group of rocks is the considerable presence of mafic to intermediate enclaves. They are generally well rounded and show a significant degree of interaction with the surrounding rock, which is also demonstrated by the presence of minerals originating from felsic magma inside the enclaves, resembling what is commonly described for mingling features. These aspects suggest the coexistence of one or more magmas with low viscosity contrast during ascent into the crust.

4. PETROGRAPHY

The microscopic study was concentrated into 60 thin sections of the most representative dike samples from the Tucumã area, where textural and mineralogical aspects were characterized in order to reinforce understanding of their genesis. Rock nomenclature in the present study followed International Union of Geological Sciences (IUGS), which recommends chemical classification using the total alkali silica diagram for fine-grained rocks or those whose mineralogical components cannot be identified by microscope.

Among the dikes studied in this work, it was possible to distinguish three main groups based on petrography and geochemical data. The first consists of felsic dikes, which are composed exclusively of rhyolites, the second of intermediate rocks, classified as andesites and dacites, and the third of mafic dikes, represented by basalts and basalt andesites.

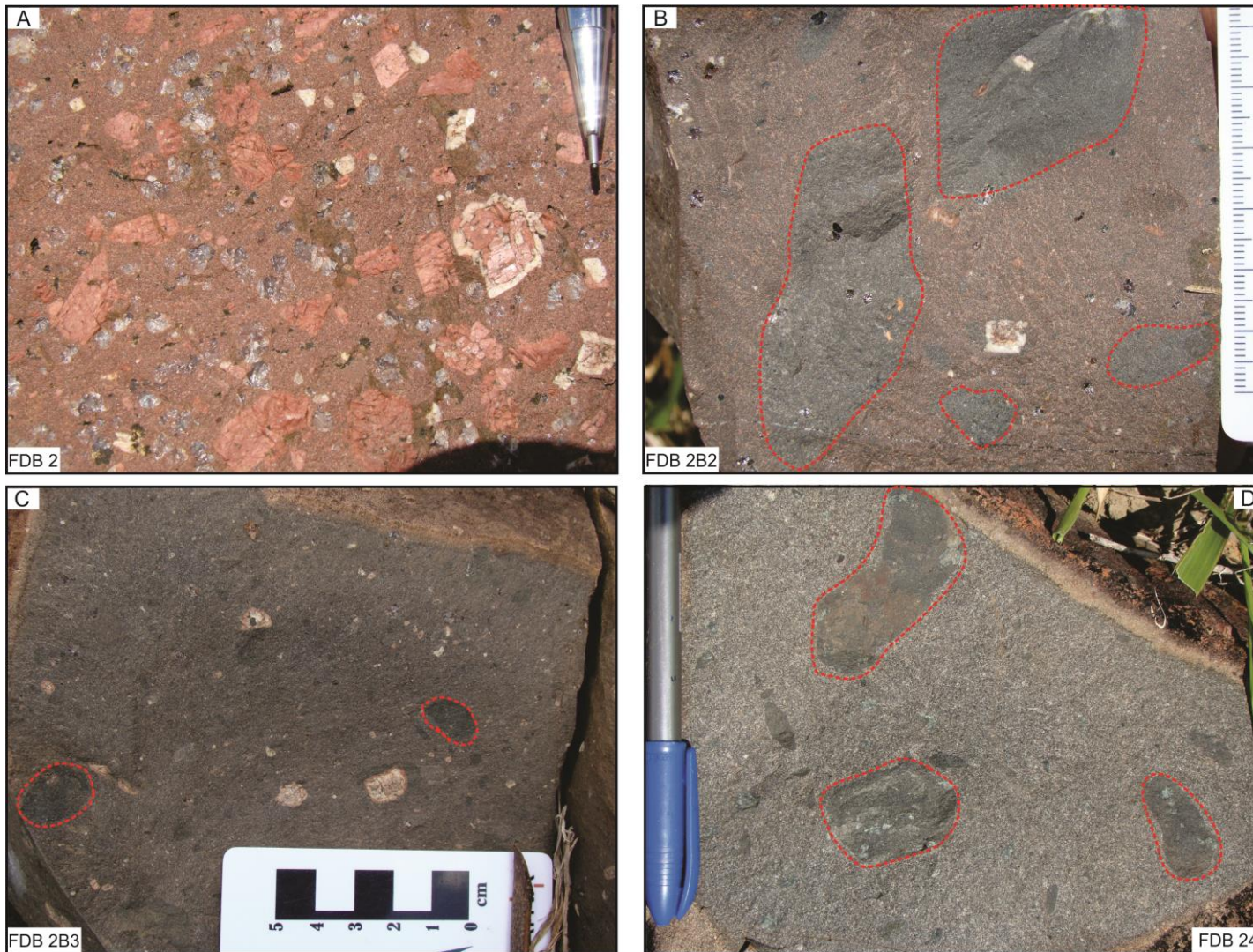


Figure 3. Field relationship and textural features of the Tucumã dikes: A) Macroscopic appearance of the porphyritic rhyolites showing locally plagioclase mantled K-feldspar phenocrysts (rapakivi texture); B) Dacite rock with light pink color and large enclaves highlighted in dashed red line; C) Dacite rock slight darker and with minor enclaves; D) Andesite rock with with small rounded mafic enclaves.

4.1. FELSIC DIKES

Felsic dikes are porphyry rhyolites showing dark purple to pinkish color and usually glomeroporphyritic, holocrystalline to hypocrySTALLINE textures with euhedral to subhedral phenocrysts surrounded by a felsitic matrix. Granophyric and spherulite intergrowths are quite common (Figures 4a-b). Quartz and feldspars are the only ones phenocrysts, account for up to 30% of the volume of these rocks. Biotite, zircon, carbonate and chlorite are subordinate matrix components.

Quartz phenocrysts are generally abundant and can reach up to 4mm in diameter. They show a bipyramidal habit with lower occurrence of rounded shapes due to above-solidus magmatic resorption. They also exhibit an engulfment texture, typical of volcanic rocks with high silica content. Plagioclase appears in a lower amount compared to other phenocrysts. They attain typically 3 to 5 mm in diameter, showing polysynthetic, albite-Carlsbad and albite-pericline twinning, with a tabular habit and euhedral to subhedral forms. Plagioclase crystals usually display normal zoning, evidenced by the more intense sericitic alteration in the Ca-rich inner zone. K-Feldspar is generally euhedral to subhedral with well-developed Carlsbad twinning, and perthite and mesoperthite texture. Granophyric intergrowth and spherulites are common on the rims of this mineral. Another common feature of K-feldspar phenocrysts is rapakivi texture (plagioclase-mantled K-feldspar; Figure 4b), and to a lesser extent, anti-rapakivi texture.

Given that these rocks display mineralogical homogeneity, they are treated as a single unit. However, three main textural variations were identified: porphyritic, glomero-porphyritic and granophyric. The porphyritic rhyolites display quartz and feldspar phenocrysts, with sizes varying between 0.2 and 1.5 cm, surrounded by a groundmass ranging from fine (~1 mm) to very fine-grained (<1 mm). This groundmass consists of quartz, feldspar, biotite and opaque minerals. The glomoporphyritic texture is characterized by the presence of several smaller quartz and K-feldspar phenocrysts in a felsitic matrix. The granophyric texture is a common aspect in these felsic dikes and the distribution of these intergrowths is heterogeneous, ranging from 10 to 70% by volume. The granophyric texture involves inter-growth of quartz and alkali feldspar on a submicroscopic to microscopic scale, and, according to the classification of Smith (1974), the spherulitic, radiate fringe and vermicular types can be observed (Figure 4a). The presence of these textures could indicate the shallow emplacement of these rocks, probably less than 3 km (Thorpe & Brown, 1999). The evidences of hybridization in the felsic magmas are minimum and generally entirely absent.

4.2. MAFIC DIKES

Mafic dikes are formed predominantly by black to gray basaltic andesite with minor basalt. With respect to petrographic aspects, these two types of rocks have notable textural homogeneity. They are holocrystalline, exhibit ophitic texture and show fine- to medium-grained (Figure 4c). Plagioclase, orthopyroxene, clinopyroxene and minor proportions of olivine are the essential phases. Clinopyroxenes are represented by phenocrysts with prismatic habit. Orthopyroxenes occur mainly as microphenocrysts with prismatic habit, typically zoned and twinned. Chlorite, talc and iron oxide/hydroxide are their alteration products. Epidote and carbonate are also present as secondary phases. As with felsic dikes, these rocks do not exhibit noticeable field and petrographic evidence of mixture, except for the occurrence in some rocks of small amounts of K-feldspar phenocrysts, with features that suggest mafic-felsic magma interaction.

4.3. INTERMEDIATE DIKES

Intermediate dikes are the most complex group of the rocks in the present study, since they show evidence of contamination by mafic magma. This group is composed of andesites and dacites with slight petrographic differences. These rocks range in color from gray, greenish gray, dark gray to darkish brick red. Most are porphyritic with an aphyric matrix. The phenocrysts are represented by quartz, plagioclase, k-feldspar and minor amphibole. Phenocrysts vary from a few millimeters to just over 1 cm; however, the proportion of phenocrysts is lower than that found in rhyolites (15 to 30% by vol).

The main differences between andesites and dacites lie in the content and degree of amphibole transformation and matrix composition. Andesites exhibit small amphibole crystals (0.1 to 0.8 mm) which are occasionally displayed as relics. These crystals are subhedral to anhedral, and sometimes zoned and completely transformed to epidote or more rarely to chlorite. Compared to the dacites, the matrix is coarser and composed primarily of plagioclase microliths preserved or altered to sericite, altered amphibole crystals, chlorite and carbonates. These rocks occasionally have a subophitic texture and flow structures characterized by the orientation of tabular plagioclase crystals, suggesting a trachytic texture. The accessory phases consist predominantly of euhedral to subhedral opaque minerals immersed in the fine-grained matrix.

In the dacite rocks the amphibole are subordinate, smaller and difficult to recognize. Nevertheless, the form of occurrence is quite similar to that found in the andesites, but prominently altered and appearing as relic minerals. The matrix is very fine-grained (<0.1 mm) and consists mainly of feldspar microliths and opaque minerals. It has undergone selectively pervasive alteration with plagioclase saussuritization, chloritization of ferromagnesian minerals and alkali feldspar argilization.

Common features of both varieties of these groups include the presence of corona textures, also known as reaction rims, which can be observed in quartz and feldspar phenocrysts (Figure 4d). This texture is a result of the crystals becoming unstable and reacting with its surrounding crystals or melt (Hibbard, 1995; Rämö, 1991). Another common texture is the embayed crystal or engulfment texture (Figures 4 e-f), which consists of a crystal with an irregular cavity penetrating a crystal face. The embayment is often filled with groundmass or another mineral, suggesting that the crystal is out of equilibrium and reacting with the surrounding melt, especially when combined with rounded crystal shapes and reaction rims. Glomeroporphyritic texture is also present, but in lesser amounts compared to rhyolite.

5. WHOLE-ROCK GEOCHEMISTRY

5.1. INTRODUCTION

Rock powders (<200 mesh) of the 40 samples considered the most representative of the dike varieties were analyzed by ACME ANALYTICAL LABORATORIES, including whole rock characterization (Tables 2-3). Major and minor element analyses were performed using ICP-ES, while trace elements and Rare Earth Elements were analyzed by ICP-MS. In order to determinate comparison parameters with analogues occurrences in the Carajás province, the geochemical data obtained in this work will also be confronted with those available in the rocks from the Santa Rosa and Sobreiro Formation of the Xingu area (Fernandes et al., 2011), dikes associated with the Jamon suite (Ferreira, 2009; Silva Jr et al., 1999) and granites related to Velho Guilherme suite (Teixeira et al., 2005).

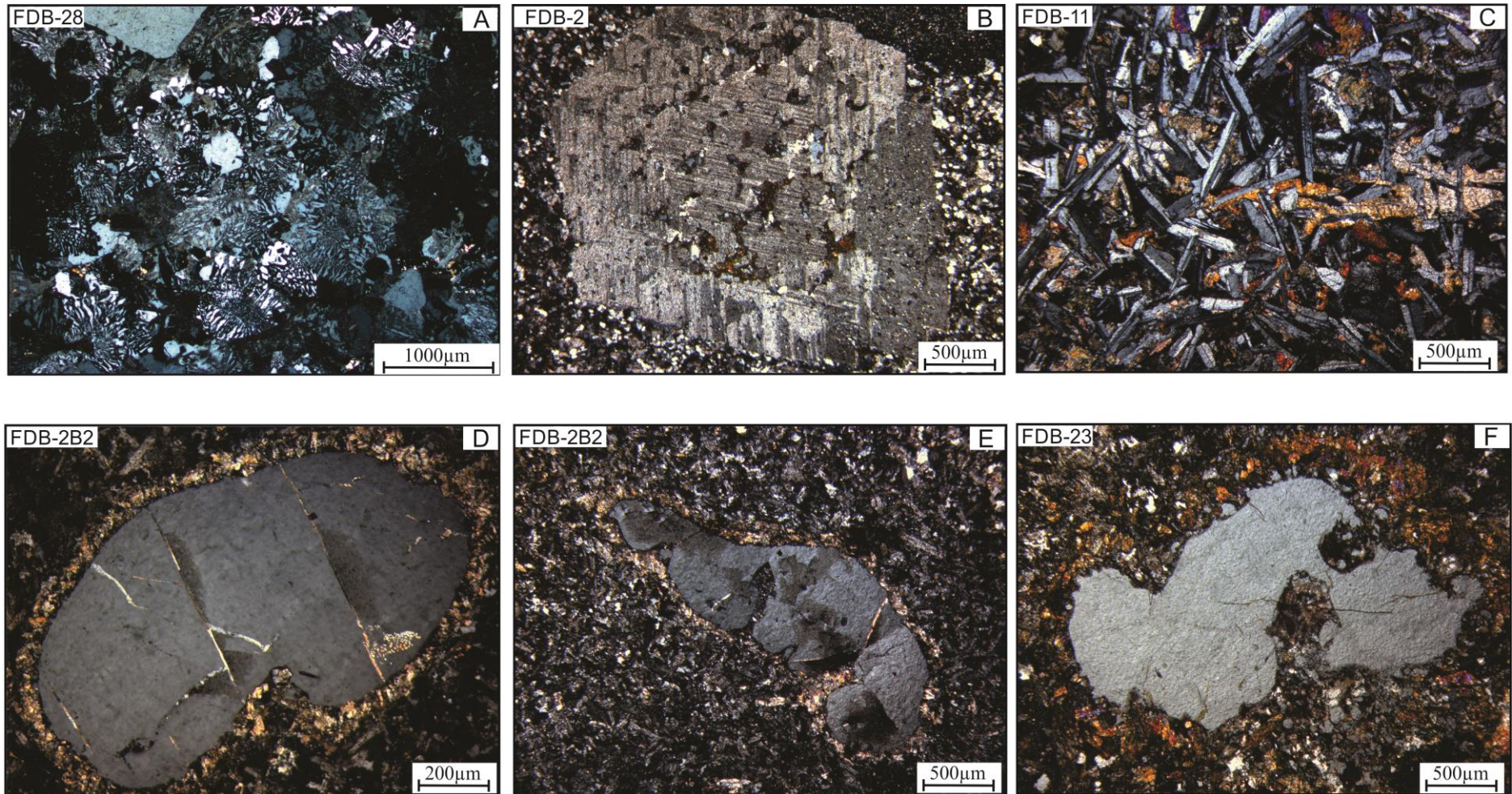


Figure 4. Microtextural aspects of the Tucumã dikes: A) Radiate fringe and vermicular granophyric texture in rhyolite also seen an aggregated of quartz forming the glomero porphyritic texture; B) K-feldspar phenocryst with rapakivi texture; C) Sub-ofitic texture feature of mafic dikes; D, E, F) Corona texture in quartz crystals with different degrees of embayment/engulfment texture.

5.2. GEOCHEMICAL CLASSIFICATION

As mentioned before, the Tucumã dikes have a wide composition range, varying from mafic to felsic, which both display a subalkaline trend and plot in basalt to rhyolite fields in the TAS and R1-R2 diagrams (De La Roche et al., 1980) (Figures 5a-b).

The felsic dikes are peraluminous to slightly metaluminous, mainly due to K-feldspar and plagioclase fractionation with a minor contribution of amphibole, while the intermediate and mafic groups are exclusively metaluminous (Figure 5c). Felsic dikes exhibit high FeOt/(FeOt+MgO) ratios, similar to those of ferroan granites (Frost et al., 2001), and, more particularly, with those observed in the Santa Rosa Formation and in the granites of the Velho Guilherme suite (Figure 5d). Intermediate rocks plot in the magnesian granite field, but they show slightly higher values of FeOt/(FeOt+MgO) compared to the Sobreiro Formation suite, and a clearer scattering than the intermediates dikes of the Jamon Suite.

With respect to the magmatic series, in the AFM diagram (Irvine & Baragar, 1971) mafic dikes plot on the tholeiitic field (Figure 5e), with a lower Fe content when compared to mafic dikes of the Jamon Suite. Such as, while those in the Tucumã area exhibit high-Mg tholeiitic basalts the basalts associated with the Jamon Suite are high-Fe tholeiitic basalts (Figure 5f). Intermediate rocks show a narrow calc-alkaline behavior, slightly Fe-enriched compared to the Sobreiro Formation. The felsic group exhibits an alkalis enrichment that overlaps significantly with the Velho Guilherme Suite, felsic dikes of the Jamon Suite and the Santa Rosa Formation (Figure 5e). In the cationic diagram developed by Jensen (1976), intermediate dikes display dubious behavior. While the mafic group is in the same field in both diagrams, the dacites plot on the tholeiitic field and the andesites on calc-alkaline field (Figure 5f). This incongruous behavior in the two diagrams may indicate that these groups of rocks do not exhibit geochemical continuity.

5.3. MAJOR AND TRACE ELEMENT BEHAVIOR

The Tucumã dikes show a wide variation in SiO₂ content, ranging from 49.18% to 78.56% from mafic to felsic, respectively (Tables 2-3). Separate analysis of the groups reveals that felsic rocks can be distinguished into two different groups, the high SiO₂ (74.00-78.56%) and low SiO₂ (69.16-71.95%) content. The intermediate dikes have the largest variations in SiO₂ (56.76-66.68%), while mafic dikes show a slight variation in SiO₂ content (49.18-53.70%). The global disposition of the rocks analyzed in the Harker variation diagrams (SiO₂ versus

oxides) demonstrates a linear increase in the proportions of TiO_2 , Al_2O_3 , MgO , CaO , FeO and P_2O_5 with a rise in SiO_2 (Figures 6a-b-c-d-f).

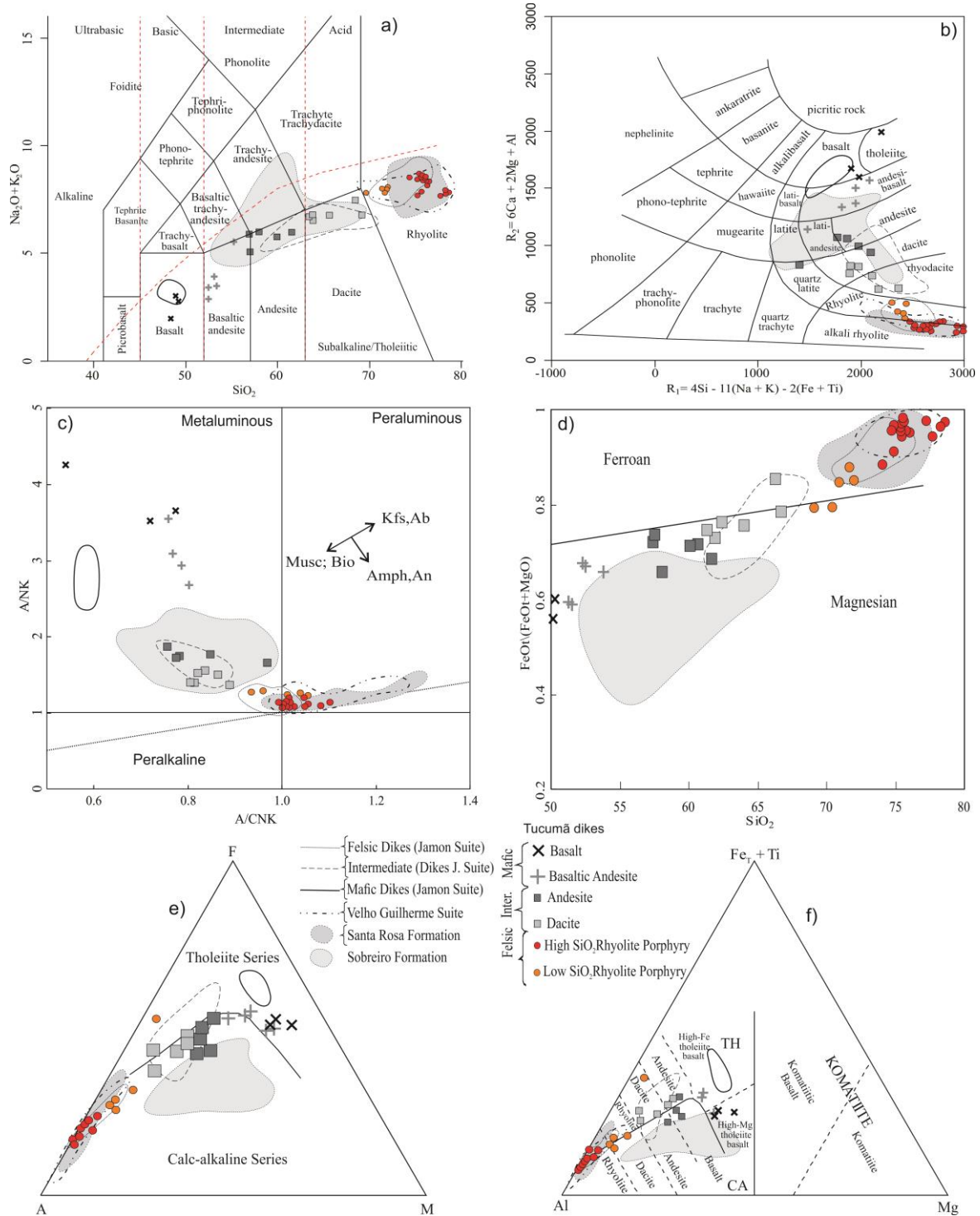


Figure 5. Geochemical characterization of the Tucumã dikes. a) TAS classification diagram; b) R1-R2 multicationic diagram (De La Roche, 1980); c) Molar A/NK vs. A/CNK variation diagram (Shand, 1950), the arrows represent fractionation vectors for mineral phases. (Bio – Biotite; Musc – Muscovite; Amph – Amphibole; An – Anorthite; Kfs – K-feldspar; Ab – Albite) d) SiO_2 vs $\text{FeO}/(\text{FeO} + \text{MgO})$ diagram (Frost et al., 2001); AFM diagram (Fields of Tholeiite and Calc-alkaline Series of Irvine & Baragar, 1971); Al-(Fe+Ti)-Mg cationic diagram (Jensen, 1976).

The amount of Al_2O_3 in the mafic group is mostly $>14.5\%$ with minor variations (14.37-15.62%), while the intermediate and felsic groups exhibit a broad spectrum, ranging from 11.75 to 15.62% and 10.92-12.36 to high SiO_2 and 12.61-13.07 to low SiO_2 respectively. Despite the negative correlation between Al_2O_3 and SiO_2 observed in all dike groups, the arrangement of the sample sets shows parallel trends, suggesting that these rocks are not comagmatic.

Ferromagnesian oxide and CaO levels are higher in the mafic group [MgO (5-8.37%), Fe_2O_{3t} (11.13-12.31%) and CaO (5.70-12.21%)] than the intermediate [MgO (0.97-3.37%), Fe_2O_{3t} (5.92-10.82%) and CaO (2.77-5.87%)] and felsic of low-Si [MgO (0.45-1.05%), Fe_2O_{3t} (3.32-4.53%) and CaO (0.93-1.99%)] and high-Si [MgO (0.04-0.29%), Fe_2O_{3t} (1.67-2.84%) and CaO (0.11-0.91%)]. The negative correlation of the aforementioned oxides may be explained by the early crystallization of clinopyroxene, hornblende, magnetite, ilmenite and apatite. Ca-plagioclase fractionation plays a significant role in the apparent decline in Al_2O_3 and CaO. On the other hand, A/CNK and $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ratios show a clear positive correlation, with a sharp increase towards the most evolved rocks (Figures 6e-f), indicating that K-feldspar is not an important fractionating phase in these magmas. Despite the negative correlation with SiO_2 in these rocks, TiO_2 and P_2O_5 behavior is slightly discordant with other oxides due to their enrichment in the mafic dikes with an increase in SiO_2 .

The felsic dikes in the Tucumã area show considerable affinity in major elements with rhyolites from the Santa Rosa Formation, granites of the Velho Guilherme Suite and felsic dikes associated with the Jamon Suite. In this respect, intermediate dikes exhibit good correlation with the Sobreiro Formation and analogue dikes of the Rio Maria area, although intermediate rocks of the Xingu area are more enriched in Al_2O_3 , CaO, MgO, FeO and P_2O_5 . Mafic dikes do not match those associated with the Jamon Suite, and, despite showing similar trends, those in the Rio Maria area have the highest TiO_2 and FeO.

The variation of trace elements in magmatic series could reflect differentiation and may support the interpretation about the processes responsible for their evolution (Wedepohl, 1970; Hanson, 1978). The behavior of the main trace elements in the different groups of rocks is presented in binary variation diagrams (Figure 7). Rb and Y, whose values range from 161.40-289.10 ppm to high SiO_2 and 167.20-198.30 to low SiO_2 rhyolites, and 16.40 to 96.90 ppm to the intermediate rocks, showing a clear positive correlation with SiO_2 (Figures 7a-e).

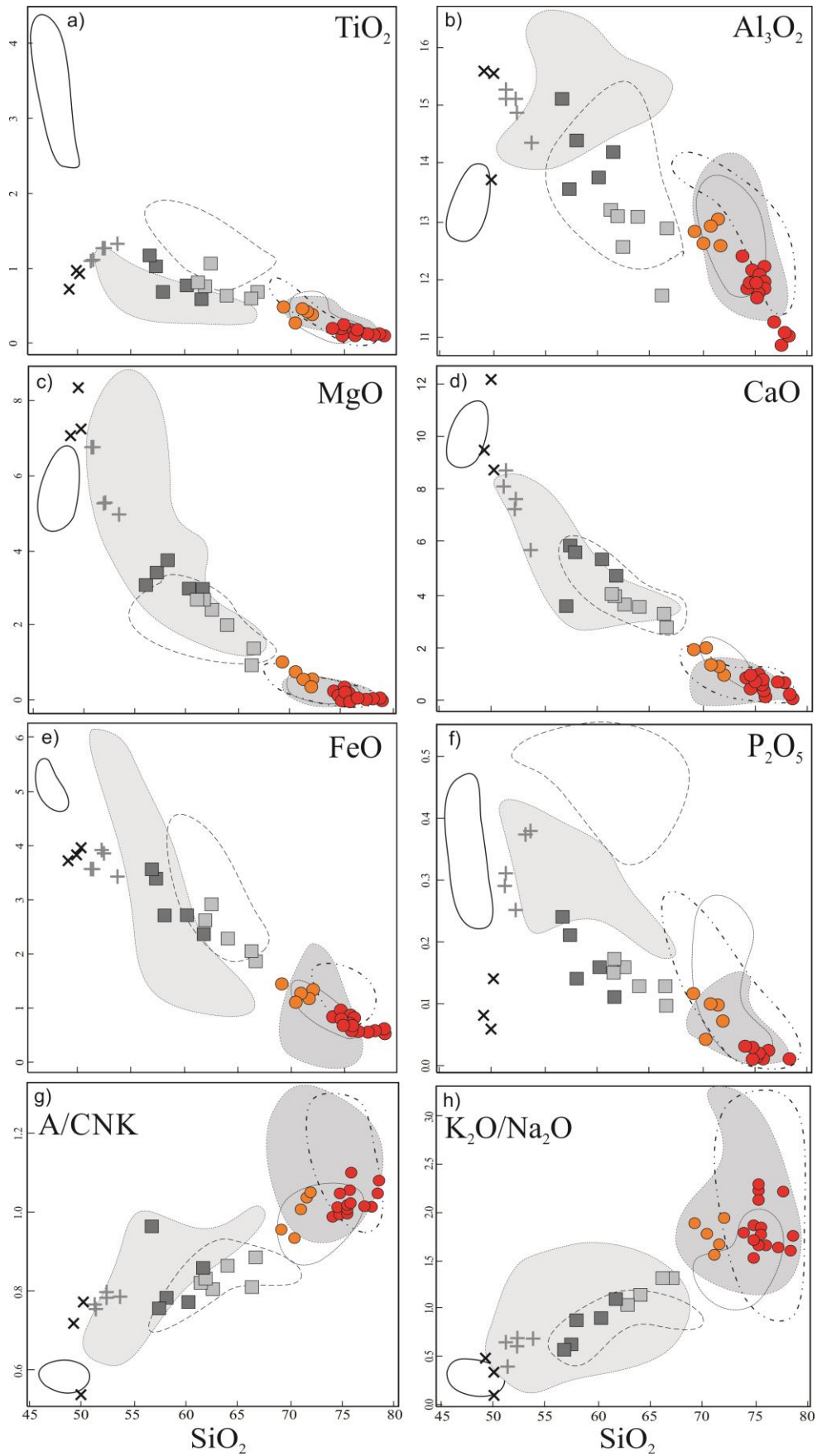


Figure 6. Harker diagrams for selected major and minor elements for the Tucumã dikes. Symbols as in figure 5.

By contrast, Cr content is very high in the mafic samples (47.90 to 451.59 ppm), moderate in the intermediate dikes (20.53 to 130.0 ppm) and extremely low in the rhyolites (13.68-34.21 ppm), exhibiting a negative correlation (Figure 7f). Zr and Ba contents increase from mafic [Zr (52.9-158.7 ppm) and Ba (38-1352 ppm)] to intermediate [Zr (160.8-449 ppm) and Ba (708-1630 ppm)] dikes and then decrease from the low-Si rhyolites samples [Zr (272.50-309.70 ppm) and Ba (774-1587 ppm)] to high-Si rhyolite [Zr (196.8-295.8 ppm) and Ba (112-1588 ppm)]. Sr also show an inflection in its evolutionary trend, where values increase in the mafic samples (104.4-404.7 ppm) and decrease from intermediate (110.9-310.5 ppm) to felsic dikes [low-Si (99.2-164.3 ppm) and high-Si (12.9-68.2 ppm)] (Figure 7b). The dual behavior observed for Ba, Zr and Sr trends may reflect the different fractionating phases during the evolution of these rocks, indicating that Ca-plagioclase \pm amphibole commanded the evolution of intermediate dikes, while zircon and biotite \pm K-feldspar were important fractionating phases during crystallization of the felsic dikes.

In general, there is a noticeable overlap between trace element contents in the Tucumã area dikes and the established fields for the units used for comparison purposes in the present study, as previously described for major element behavior. However, the Sr content of the Sobreiro Formation clearly diverges from that found in intermediate rocks of the Tucumã and Rio Maria areas, while Rb content is significantly higher in the Velho Guilherme Suite compared to felsic rocks from other areas.

Similar to that described and interpreted by Silva Jr. et al. (1999), The frequent compositional gap between the mafic-intermediate-felsic groups in all diagrams, as well as the presence of subparallel trends, support the hypothesis that these rocks have not been derived by fractional crystallization process from a single parent magma or that fractional crystallization was not an important process in magma evolution. This is consistent with what has been described in field relationships.

5.4. RARE-EARTH ELEMENTS

Analytical data on the rare-earth elements (REE; Tables 2-3) and corresponding chondrite-normalized plots (Figures 8a-c-e) for representative samples of the different dikes in the Tucumã area show that felsic dikes display a moderate La/Yb ratio (10.9-20.1), with a nearly HREE flat pattern, and accentuated negative Eu anomaly ($Eu/Eu^*=0.08-0.44$). The REE pattern of the felsic dikes of the Tucumã area matches both Santa Rosa Formation and felsic dikes of the Jamon Suite, while granites of the Velho Guilherme Suite show a more pronounced negative

Eu anomaly. The multi-element diagram for these rocks shows strong depletion of Ti, P and Sr, and moderate Ba, Nb and Ta depletion (Figure 8b).

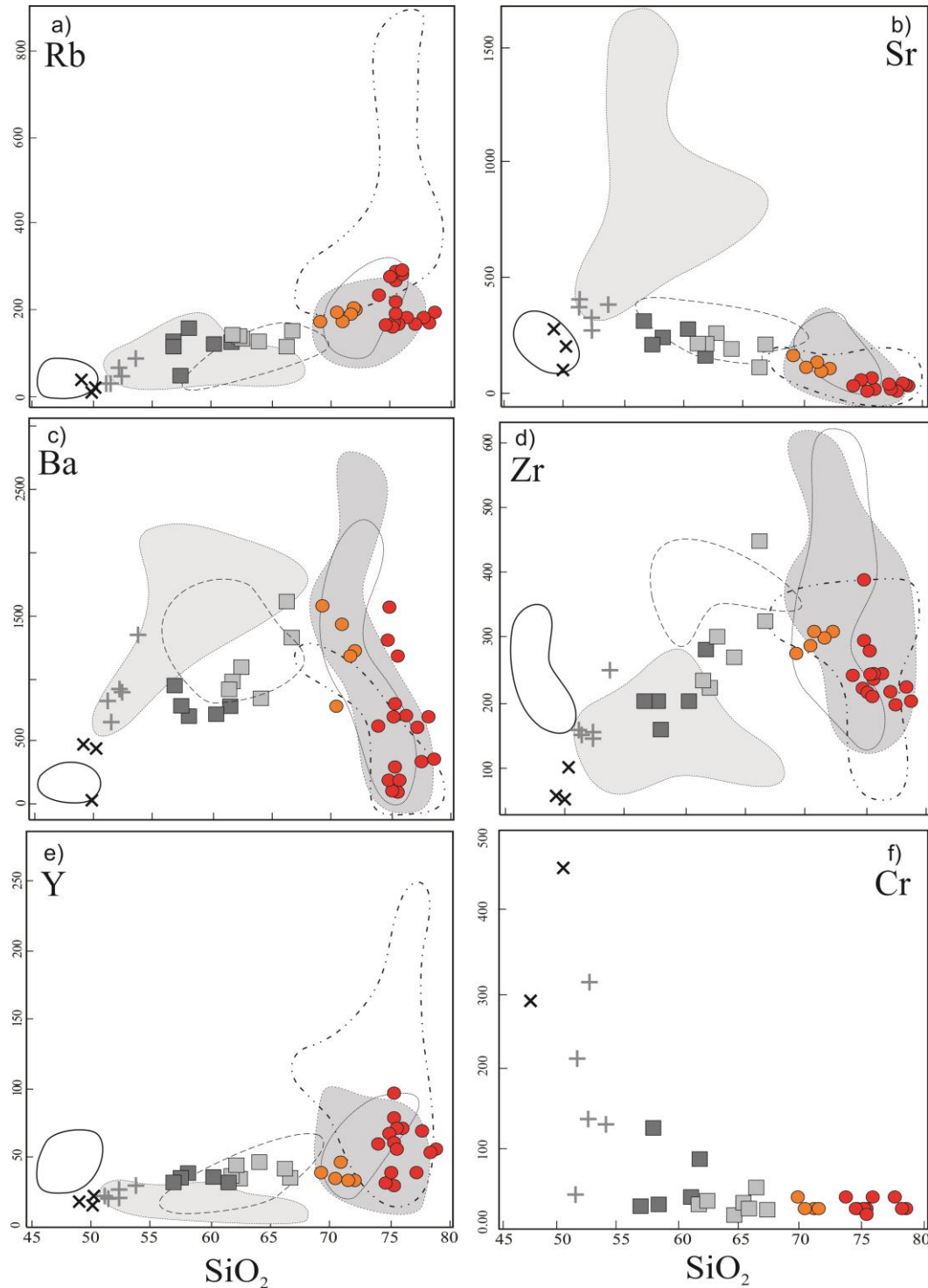


Figure 7. Harker diagrams for selected trace elements for the Tucumã dikes. Symbols as in figure 5.

Intermediate dikes display a similar pattern to that observed in felsic dikes, although they exhibit a smaller La/Yb ratio (6.43-13.68), slight HREE depletion and a smaller Eu

anomaly ($\text{Eu}/\text{Eu}^*=0.32-0.65$). When compared with the Sobreiro Formation, the dacites and andesites of the Tucumã area show a similar La/Yb ratio; however, they differ in their higher REE content and accentuated negative Eu anomaly, which is absent in the Sobreiro Formation (Figure 8c). The intermediate dikes of the Tucumã area exhibit a similar REE pattern to that identified in the Rio Maria area, although the latter show a less pronounced Eu anomaly. Similarly to that observed in the felsic dikes, intermediate rocks show negative though less significant Ti, P and Sr anomalies (Figure 8d). The negative Nb and Ta anomalies are more pronounced in both intermediate dikes and the Sobreiro Formation when compared to felsic rocks. The Sobreiro Formation differs from the other dikes by the absence of a negative Eu anomaly and presence of a positive Sr anomaly (Figure 8d).

The mafic dikes of the Tucumã area display an almost flat REE pattern, with low La/Yb ratios (1.21-13.25) and no negative Eu anomaly ($\text{Eu}/\text{Eu}^*=0.95-1$). They show no affinity with mafic dikes of the Jamon Suite, since the latter are more enriched in HREE and exhibit a flatter REE patterns (Figure 8e). In the multi-element diagram (Figure 8f), the mafic dikes of the Tucumã area show moderate to weak negative Ti, P and Sr anomalies, in contrast to what is observed in the intermediate and felsic dikes, and more pronounced negative Nb and Ta anomalies when compared to the last one. These aspects contrast with that observed in the mafic rocks associated with the Jamon Suite, which shows slightly flatter spidergram patterns than those mentioned above, in addition to a slightly P anomaly and absence of negative Ti, Nb and Ta anomalies.

Negative anomalies in Sr, P and Ti are consistent with extensive fractional crystallization of plagioclase, apatite and Fe-Ti oxides, respectively. However, a strong negative anomaly in Nb and Ta contents may be due to contamination of the magma and/or their sources by crustal components (Martin et al., 1997).

5.5. CLASSIFICATION AND TECTONIC AFFINITY

The tectonic setting discrimination diagrams show that both mafic and felsic dikes have within-plate whole rock geochemical affinity, indicating that emplacement in these bodies occurred within an overall extensional tectonic setting. On the Zr vs. Zr/Y discrimination diagram (Pearce and Norry, 1979), the mafic rocks plot in the within-plate basalt field (Figure 9b), while on the Y vs Nb discrimination diagram (Pearce et al., 1984), the felsic dikes plot in the within-plate granite field and could have been formed in areas of attenuated continental crust (Figure 9a), as described for the Paleoproterozoic plutons of the Carajás Province

(Dall’Agnol et al., 1999b; Oliveira et al., 2010). The fact that some rhyolite samples overlap the fields of volcanic arc granites and within-plate granites may reflect a minor degree of contamination by mafic magma.

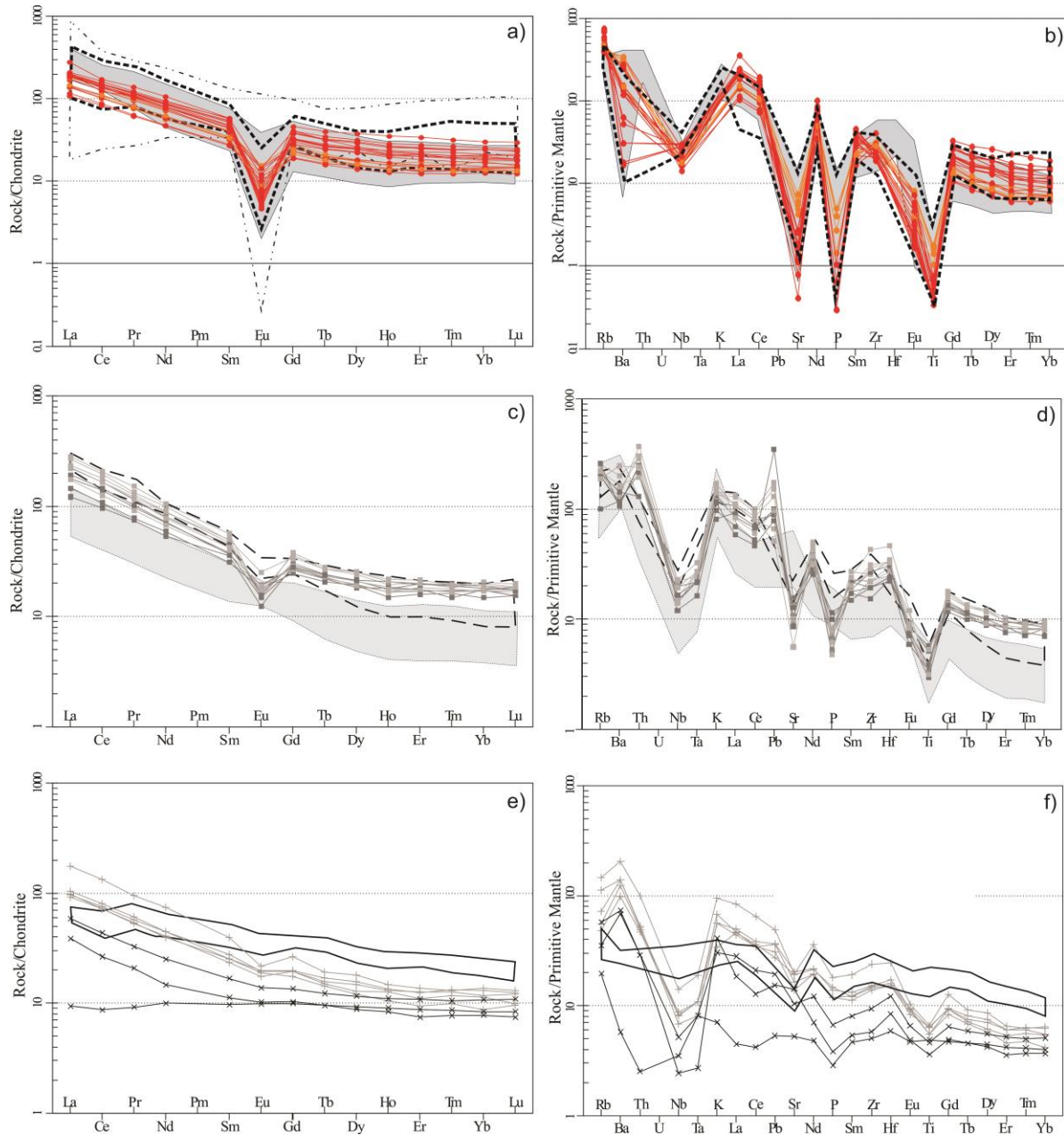


Figure 8. a and b) Chondrite-normalized REE (Boynton, 1984) and Primitive mantle normalized (MacDonough & Sun, 1995) multi-elements patterns of Tucumã felsic dikes; c and d) for Tucumã intermediate dikes; e and f) for Tucumã mafic dikes. Symbols as in figure 5.

The felsic dikes show enrichment in high-field-strength elements (e.g. Nb, Y, Zr), allowing their samples to fall in the A-type granite field in the $\text{FeO}_{\text{tot}}/\text{MgO}$ vs. $\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y}$ plot of Whalen et al. (1987; Figure 9c). Effective separation of A-type granitoid varieties was recognized by Eby (1992), according to the contents of trace elements (Y, Nb, Ce, and Ga), in particular, Y/Nb. On a Nb-Y-Zr/4 triangular plot, samples from Tucumã area felsic dikes plot

in the field defined by the granitoid group derived from subcontinental lithosphere or lower crust (A2), reflecting higher Y/Nb ratios (>1.2) than granites interpreted as differentiates of basalt magma derived from an OIB-like source (A1; Figure 9d).

In the classification scheme of Dall'Agnol & Oliveira (2007), designed to separate calc-alkaline granites from A-type granites, and oxidized A-type granites from reduced A-type granites, felsic dikes of the Tucumã area show a consistent A-type character (Figures 9e-f). As with typical A-type granites worldwide, the rhyolite dikes under study also show a relatively low $\text{CaO}/(\text{FeO}+\text{MgO}+\text{TiO}_2)$ ratio and low Al_2O_3 content when compared to calc-alkaline granites (Figure 9e). In the $\text{FeOt}/(\text{FeOt}+\text{MgO})$ vs. Al_2O_3 diagram (Figure 9f), the felsic dikes show a moderate (low-Si) to strong (high-Si) enrichment in FeO relative to MgO [$0.9 < \text{FeOt}/(\text{FeOt}+\text{MgO}) > 0.9$], and consequently, reduced A-type characteristics. Affinity with reduced A-type granites can also be observed for both the Santa Rosa Formation and plutons of the Velho Guilherme Suite, while dikes associated with the oxidized A-type Jamon suite exhibit ambiguous behavior, overlapping the fields of reduced and oxidized granites.

6. GEOCHRONOLOGY (U-PB)

The samples were analyzed by a Sensitive High Resolution Ion Microprobe (SHRIMP II) in the high-resolution geochronology laboratory of Universidade de Sao Paulo (USP) with analytical procedures and part of the reductions conducted in accordance with Sato et al. (2008); Willians et al., (1998); Stern (1998). Two Mounts were prepared with 70 and 48 zircon grains respectively, where, 17 for FDB 29 and 16 for FDB 02 were selected and analyzed considering morphology and color, in order to examine all varieties of crystals. Data were plotted on concordia diagrams using ISOPLOT 4 software (Ludwig 2003, 2009). The concentrations of uranium, lead and thorium were calibrated against the Temora zircon standard (Black et al., 2003) and the equipment had a 30 micron spot diameter. Crystal selection took into account the low disagreement with grains (up to 5%), maximum common lead content of 1.5% and individual error ratio below 7%.

Most zircons are prismatic, colorless, transparent and euhedral with some broken parts. Image C1 (Figure 10) shows obvious oscillatory zoning but no inherited cores, and Th/U values (Table 4) strongly indicate a magmatic origin for these zircons (Belousova et al., 2009; Hoskin and Black, 2000). The zircons of FDB 29 and FDB 2 samples, after all corrections and when plotted in a concordia diagram (Figure 10), exhibit an age of $1880.9 \pm 3.3\text{Ma}$ (MSWD=2.0) and 1881.9 ± 4.4 (MSWD=2.0) respectively, which can be interpreted as crystallization ages, since

these ages refer to a worldwide extensional and metamorphic-free event (Dall’Agnol et al., 2005; Rämö & Haapala, 1995; Dall’Agnol & Oliveira, 2007).

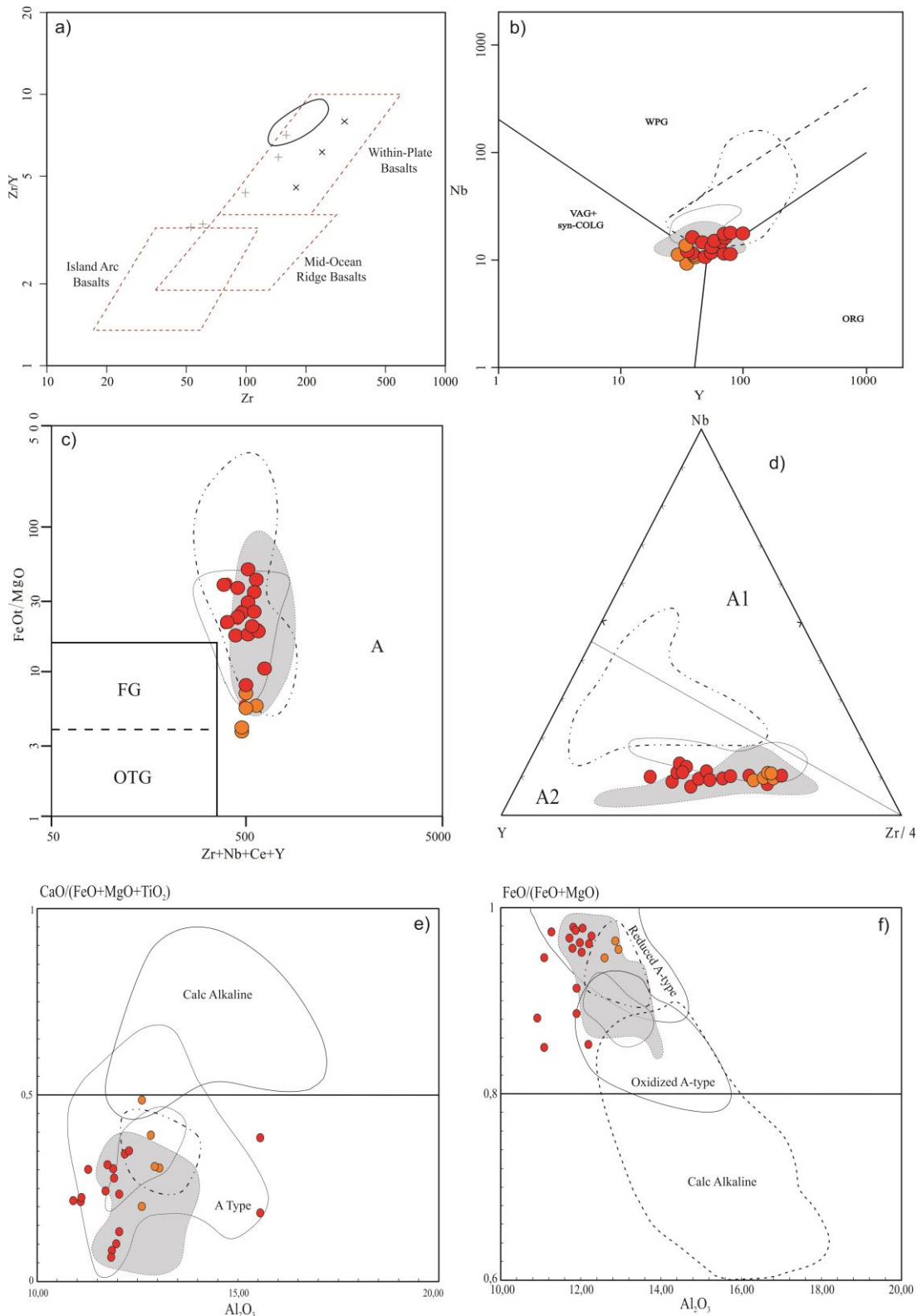
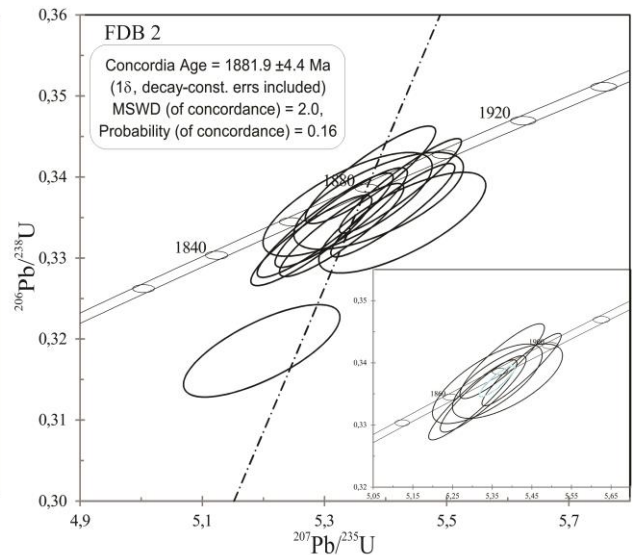
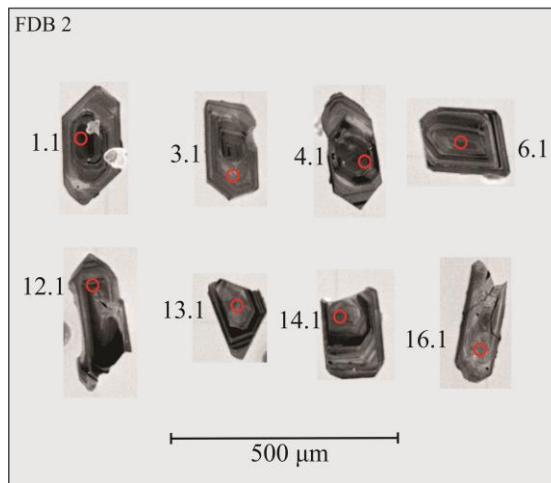
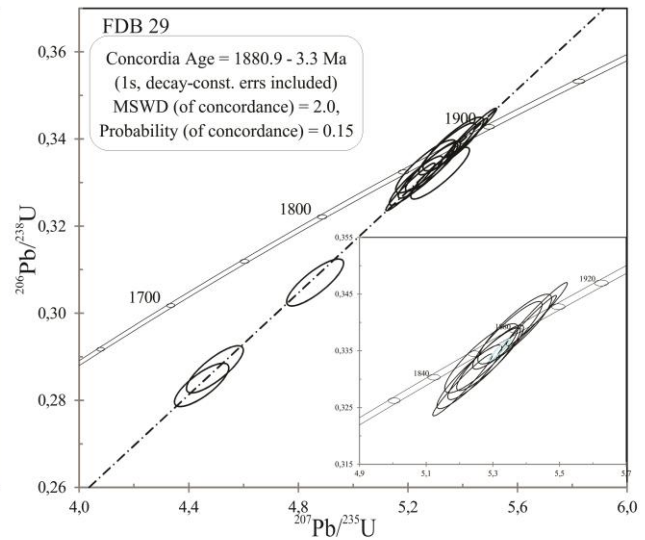
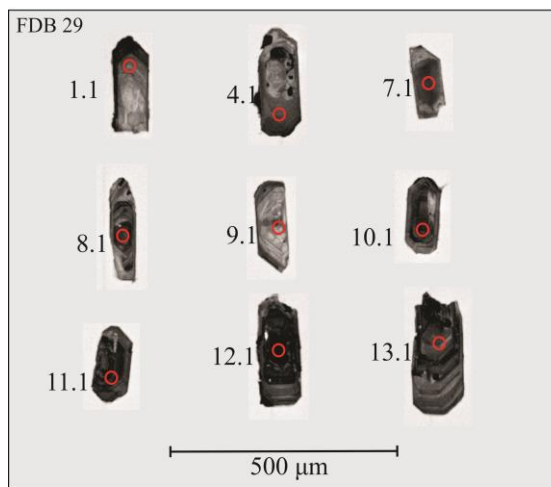


Figure 9. a) Tectonic classification diagrams of Pearce and Norry (1979) for mafic dikes and b) Pearce et al. (1984) for the felsic one. c) Whalen et al., 1987 diagram; d) Eby (1992) diagram. e) Dall’Agnol & Oliveira, 2007 diagram to show magmatic series and, f) to evidence the oxidation state of them. Symbols as in figure 5.

Table 4. U-Pb zircon data for felsic dikes of Tucumã region.

Spot Name	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Pb206 (comm) %	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ Pb	err(%) 1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ Pb	err(%) 1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	err(%) 1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb Age	err(%) 1σ
FDB-2-1.1	239	229	0,99	0,0562	0,3334	1,1	5,33	1,3	0,1159	0,5	1894	10
FDB-2-3.1	157	101	0,66	-0,0215	0,3350	1,2	5,33	1,3	0,1153	0,6	1885	10
FDB-2-4.1	362	308	0,88	0,2310	0,3322	1,1	5,28	1,2	0,1153	0,5	1884	10
FDB-2-6.1	238	220	0,95	0,0343	0,3389	1,1	5,42	1,2	0,1161	0,4	1897	8
FDB-2-12.1	192	134	0,72	0,0276	0,3340	1,3	5,30	1,4	0,1151	0,5	1881	10
FDB-2-13.1	155	159	1,06	0,2288	0,3371	1,2	5,39	1,7	0,1160	1,2	1895	22
FDB-2-14.1	160	149	0,96	0,0481	0,3403	1,2	5,38	1,3	0,1146	0,6	1873	11
FDB-2-16.1	91	66	0,75	0,1642	0,3366	1,3	5,34	1,7	0,1150	1,2	1880	21
FDB-29-1.1	133	49	0,38	0,0538	0,3	1,2	5,27	1,4	0,1	0,7	1871	12
FDB-29-4.1	178	65	0,38	0,0402	0,3377	1,2	5,34	1,3	0,1148	0,5	1876	10
FDB-29-7.1	241	130	0,56	0,0628	0,3327	1,3	5,27	1,4	0,1150	0,5	1879	9
FDB-29-8.1	283	142	0,52	0,0946	0,3304	1,1	5,23	1,2	0,1148	0,5	1877	9
FDB-29-9.1	135	70	0,54	-0,0050	0,3388	1,2	5,37	1,4	0,1149	0,6	1878	12
FDB-29-10.1	661	359	0,56	0,0053	0,3414	1,1	5,43	1,1	0,1154	0,3	1886	5
FDB-29-11.1	625	328	0,54	0,0294	0,3290	1,1	5,21	1,1	0,1148	0,3	1877	5
FDB-29-12.1	981	572	0,60	0,0080	0,3393	1,1	5,40	1,1	0,1155	0,2	1887	4
FDB-29-13.1	229	92	0,42	0,0795	0,3338	1,1	5,29	1,3	0,1150	0,5	1880	9

**Figure 10.** a, c) Zircon images with a circle representing the laser spot on shrimp; b, d) Concordia diagrams showing U/Pb analyses for zircons from samples of felsic dikes.

7. DISCUSSION

7.1. FRACTIONAL CRYSTALLIZATION PROCESS

Chemical data for the mafic and felsic dikes provide an interpretation on the process that controls the magmatic evolution of these rocks. The fractionation vector calculated by Rayleigh equation (1) for less evolved samples of mafic and felsic dike groups explains the relationship between these rocks.

$$C_{l^a}/c_{l^b} = (c_{o^a}/c_{o^b}) \cdot F^{(D_a - D_b)} \quad (1)$$

Where $C_o^{(a,b)}$ and $C_l^{(a,b)}$ are the concentrations of element a and b in the initial and residual liquids, respectively, $D_{a,b}$ are the bulk partition coefficients of a and b and F is the fraction of residual liquid.

The vectors (Figures 11a-b) displayed in red correspond to the high SiO₂ felsic dikes (rhyolites) and in black, to the mafic dikes (basalts). The Y vs. Rb diagram (Figure 11a) indicates that the mafic dikes evolve mainly due to plagioclase and clinopyroxene crystallization and the rhyolites through plagioclase with K-feldspar. This suggests that mafic and felsic dikes may be related to a linear crystallization trend involving plagioclase. However, Ba vs. Sr and diagram (Figures 11b) show a trend towards clinopyroxene crystallization in mafic rocks, with minor contribution of amphibole to originate the andesite basalt, while felsic dikes show a distinct trend, evidencing feldspar and biotite crystallization. This evidence rules out a direct relationship through fractional crystallization for both rock groups.

The K/Ba vs. Ba and Th/Yb vs. SiO₂ diagrams (Figures 11c-d) show a curvilinear trend in the felsic dikes, which suggests assimilation, or that this variation in rhyolitic magma may be triggered by melting of a heterogeneous crust, also proposed for the Santa Rosa formation (Fernandes et al., 2011). Moreover, an alternative interpretation was put forth by Sylvester, 1994 and Skjerlie & Jhonston (1993), whereby even though biotite and alkali feldspar are the mineral phases with the highest Kd for Ba in equilibrium with granitic liquid, biotite is the dominant sink for Ba in a restite formed in equilibrium with granite melt, since the alkali feldspar is not stable. Thus, the large variation in Ba content in rhyolites (Figure 11e) cannot be generated only by fractional crystallization, and may be explained by the biotite content in the restite. In other words, high Ba content in low-Si rhyolite dikes suggests that most of the biotite in their source was consumed at high temperatures. On the other hand, rhyolites with

low Ba content (high-Si group) probably have high residual biotite and are associated with low temperatures. This leads us believe that in addition to fractional crystallization the felsic dikes may be probably a product of melting in different degrees of the continental crust.

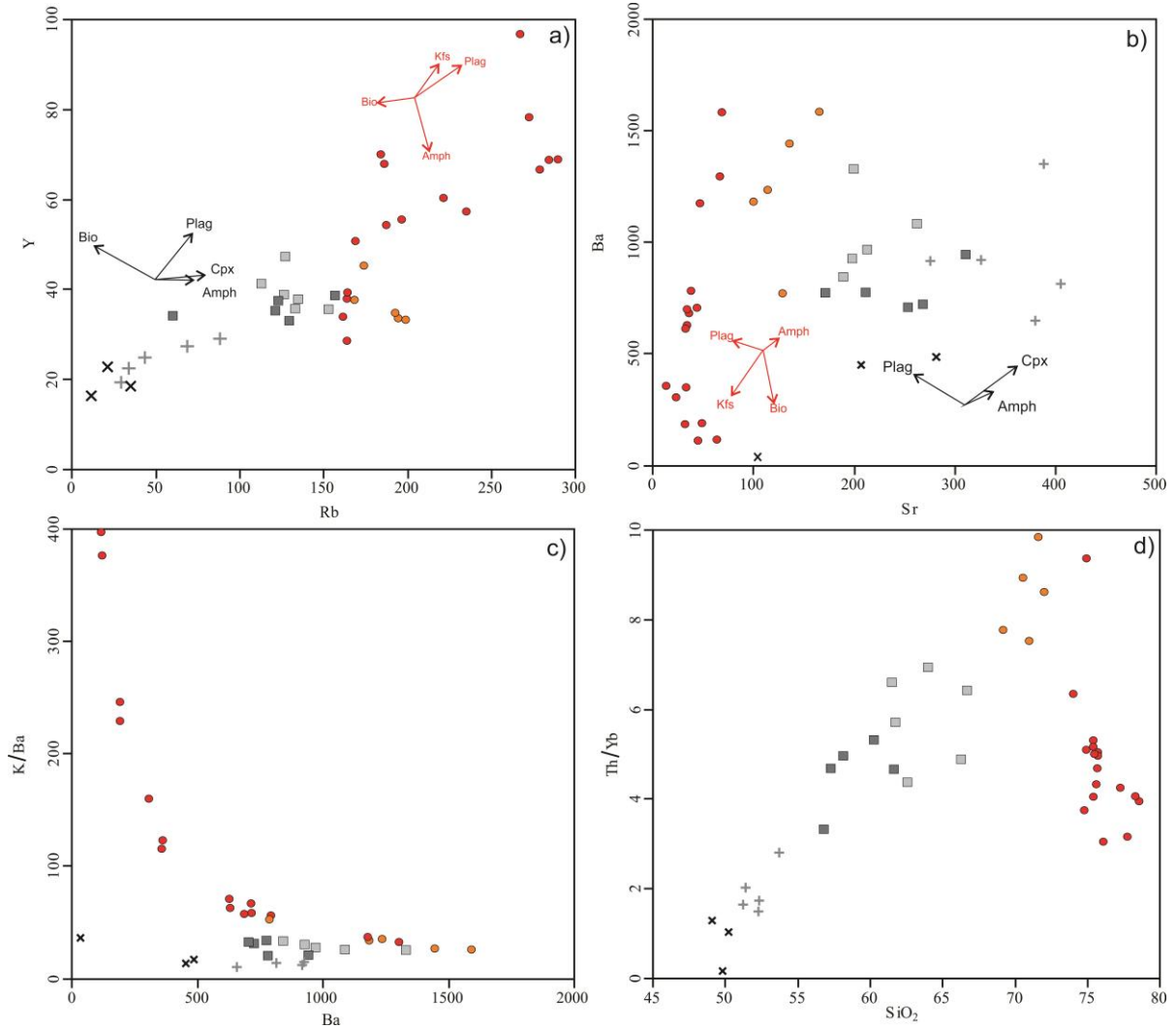


Figure 11. Variation diagrams with calculated fractionating vectors for felsic and mafic dikes. a) Rb vs. Y; b) Sr vs. Ba; c) K/Ba vs. Ba; d) Th/Yb vs. SiO₂. Symbols as in figure 5.

7.2. A MODEL FOR DACITE AND ANDESITE GENESIS

In the previous section, we have evaluated if fractional crystallization was the main magmatic process that controlled the evolution of rhyolitic and basaltic rocks; however, dacites and andesites do not fit well in that model. Therefore, to unveil the process that controls the magmatic evolution of intermediate dikes other hypotheses have been tested using geochemical modeling. The hypotheses tested were assimilation and fractional crystallization (AFC), described by De Paolo (1981) in equation (2) and binary mixing, in equation (3).

$$C_{lc}/C_{lu} = (r/(r - 1 + D)) \cdot (C_c/C_{lu} \cdot (1 - f)) + f \quad (2)$$

Where C_{lc} and C_{lu} is the concentration of trace elements in the contaminated and uncontaminated liquid, respectively, C_c the concentration of trace elements in the contaminant, r the assimilation rate/crystallization rate, D the bulk distribution coefficient for the fractionating assemblage, and f an index described by $f = F^{-(r-1+D)/(r-1)}$; where F = fraction of remaining liquid.

$$X_M = X_A \cdot f + X_B \cdot (1 - f) \quad (3)$$

X_A and X_B are the concentration of trace elements in the end members of the mixing, X_M is the concentration of trace elements in the mixture and f an index described by $(A / (A+B))$.

Figures 12 a-b show the curves resulting from the equations presented above. The AFC curve (blue line) was built by taking the basalt, with a fractionating assemblage formed by 20% olivine, 40% plagioclase and 40% clinopyroxene, as the starting point for crystallization and with rhyolite as contaminant. The r index used was 0.4, which is typical of the upper crust, and consistent with dike emplacement levels. The mixing curve (orange line) was built taking basaltic andesite and the rhyolites as end members (X_A) and (X_B), respectively. After these curves were built, the means of basalts, basaltic andesites, andesites, dacites and rhyolites were plotted in the diagram to determine the dominant process involved in the origin of intermediate dikes. Based on this, it is evident to associate the mixing processes with the formation of intermediate rocks, since the Tucumã dikes plot on the mixing curves rather than AFC trajectories (Figures 12 a-b). The next step was to quantify the degree of mixing of the two components (basaltic andesite and rhyolites) and determine their relative contributions to the mixing process.

A model based on binary mixing to explain the origin of dacite can be seen through normalized REE and multi-element diagrams (Figures 12c-d). The average composition of basaltic andesite (dark gray line) and rhyolites (red line) are plotted in the diagrams as well as average dacite composition (light gray line); next, by calculating the aforementioned equation it is possible to determine the degree of mixing, denoted by f (orange line). The degree of mixing that most resembles dacite dikes is $f = 0.4$, which signifies mixing of 60% rhyolites and 40% basaltic andesite, indicating the major contribution of felsic magma in the formation of these rocks. A similar model is used to clarify the generation of andesite dikes (Figures 12e-f), where $f = 0.6$ represents mixing of 40% of rhyolites and 60% of basaltic andesite. In this case, the mafic component would theoretically be more important. This, is in line with petrographic and

geochemical observations, suggesting that andesite liquid represents the product of a more advanced stage of the hybridization process, resulting in more homogeneous and less evolved intermediate rocks.

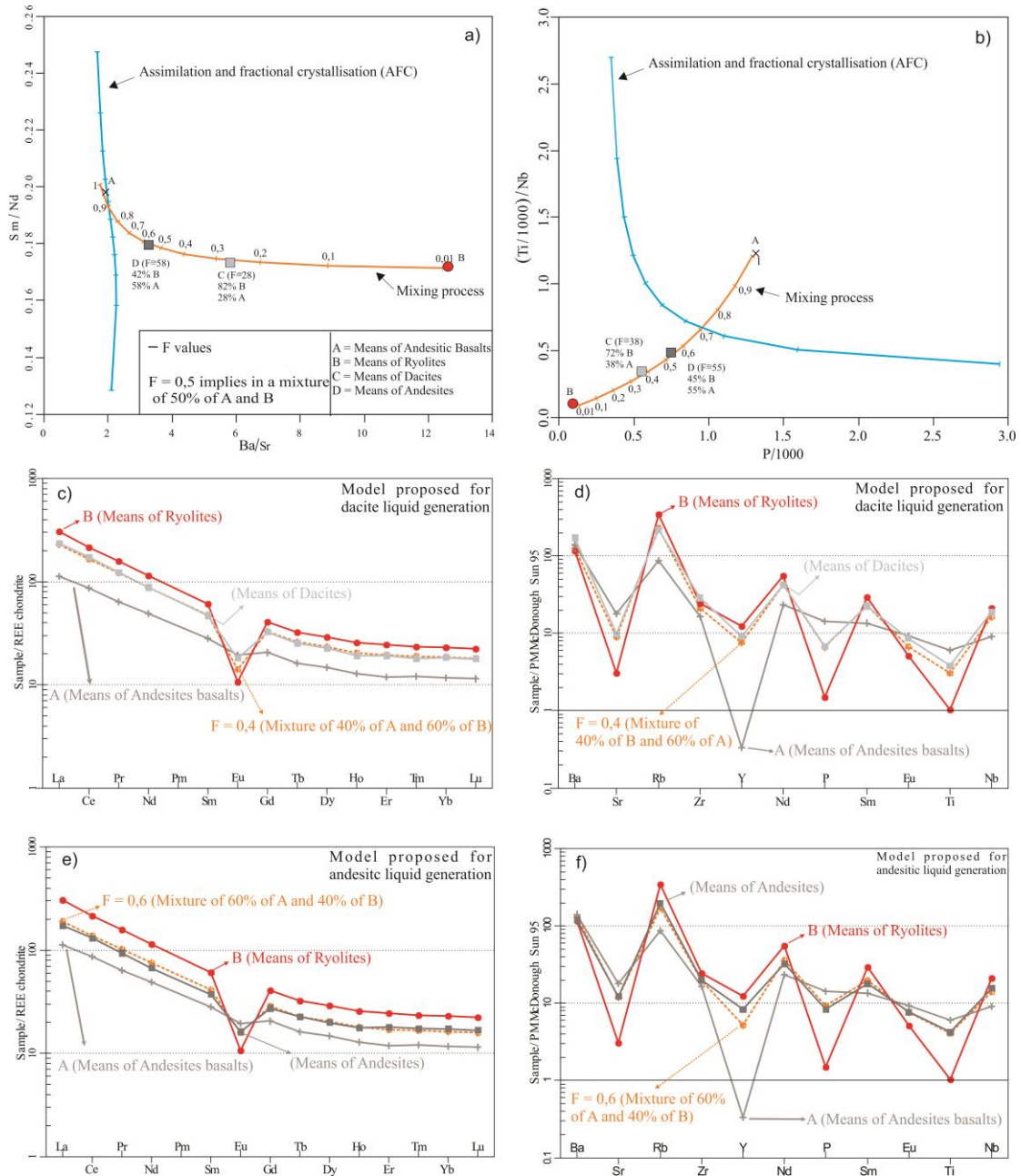


Figure 12. a) Sm/Nd vs. Ba/Sr, b) ((Ti/1000)/Nb)/(P/1000) variation diagrams to determine what process was dominant in intermediate rocks generation, c) e) REE normalized for Boynton, 1984 chondrite d) f) multi-element normalized for McDonough & Sun, 1995, to evidence a generation model for dacitic and andesitic hybrid rocks.

7.3. MAGMA FORMATION AND TECTONIC SIGNIFICANCE

In order to discuss the tectonic significance, the figure 13 shows a flowchart and schematic model illustrating the processes involved in the generation and emplacement of the

Tucumã dikes. The evolutionary history of the dikes consists initially of an extensional tectonic that resulted in decompression-induced mantle melting and basaltic magma generation, which produces a basalt andesite liquid through fractional crystallization. These magmas are trapped while rising to the surface at the Mohorovicic discontinuity or within the crust, supplying sufficient heat for partial melting and the formation of granite magma.

It is known that at ~1.88 Ga the Amazonian Craton underwent a major period of crustal extension (Dall'Agnol et al., 2005; Lamarão et al., 2005; Oliveira et al., 2008, 2010), and in that context, mafic and felsic magmas (basalts and rhyolites) in the Tucumã area ascended to the upper crust through the reactivated deep structure, forming large bimodal dike swarms associated with A-type plutons. However, during the ascent of these magmas, mixing processes occurred and changed their original compositions, in order to generate liquids of intermediate compositions. It has been shown that intermediate rocks could be the product of mixing processes which would more probably occur during transport to the emplacement zone. However, in order to explain how these processes generate a wide range of compositions, Sparks and Marshall (1986) demonstrated that complete hybridization depends on initial magma temperatures and the proportion of mafic magma in the mixture. Thus, andesite dikes are likely generated by a homogenous mixing of mafic and felsic magmas at high depths (Figure 13), unlike dacites, which are probably produced in the upper crust at a lower temperature, thereby providing a less efficient process (magma mingling).

8. SUMMARY AND CONCLUSIONS

The geological mapping of the Tucumã region led to the identification of several bodies aligned in a NW-SE trend and intruded into an older Archean basement. The dikes reach lengths of up to 60 km and three groups were distinguished: felsic (rhyolites), intermediate (andesites and dacites) and mafic (basalt and andesitic basalt). The dacite and andesite rocks are subordinated and occur in association with the felsic dikes. They show considerable evidence of hybridization, suggesting mingling between felsic and mafic magmas. U-Pb zircon ages of 1.88 Ga were obtained for the felsic dikes and are interpreted as crystallization and emplacement age of the different dikes identified in the Tucumã area.

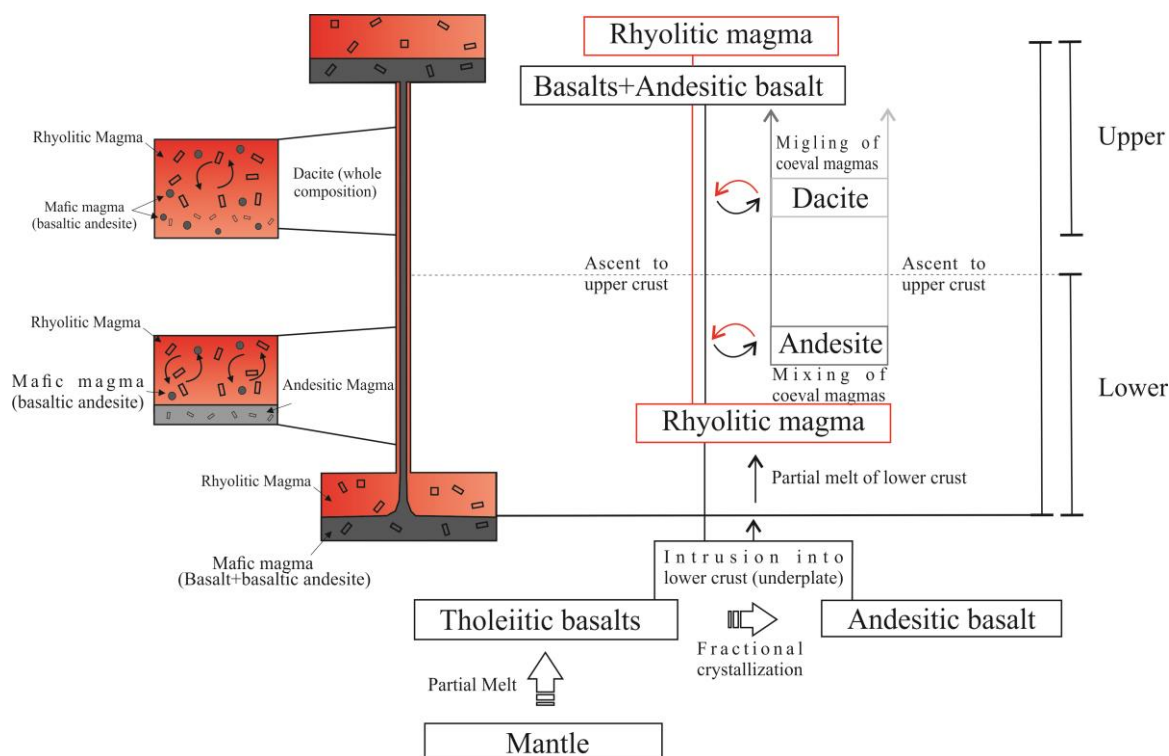


Figure 13. Flowchart and schematic model for the genesis of mafic and felsic magmas and their emplacement in continental crust in addition to the processes involved in hybridization and subsequent generation of intermediate rocks.

Felsic dikes are essentially peraluminous and have affinity with A-type reduced granites. Intermediate dikes are metaluminous, classified as hybrid rocks with dacitic and andesitic composition. Lastly, mafic dikes are strongly metaluminous and are classified as within-plate tholeiitic basalts.

The geochemical data suggest that rhyolite and basalt magmas are not co-magmatic, however, the basalt liquid evolved due to plagioclase and clinopyroxene crystallization to originate the andesite basalt. On the other hand, even though felsic liquids evolved by fractional crystallization, they show trends in some diagrams (K/Ba vs Ba), suggesting that low-Si and high-Si rhyolites were generated by partial melting at different temperatures during the ascent within the continental crust.

Geochemical modeling demonstrated the viability of mixing between mafic and felsic magmas in generating rocks similar to those of dacitic and andesitic composition described in other areas of Carajás Province. Andesites could be the product of the mixture of 60% mafic magma and 40% rhyolite liquids. This process occurred at deeper crustal levels, resulting in a more homogeneous mixture (magma mixing). Dacite rocks were generated at shallower crustal levels at lower temperatures, where the mixing process was less efficient (magma mingling) and the felsic liquid would have had a more significant contribution (60%).

The compositional differences between the mafic and felsic magmas clearly show that these magmas evolved independently, ruling out their origin from a single liquid. Data presented in this study point to the existence of bimodal magmatism in the Tucumã area, similar to that identified in the Rio Maria region, where a number of studies suggest that the genesis of this magmatism is related to the same tectonic-magmatic event that gave rise to the A-type granite of the Jamon suite (Rämö et al., 2002; Oliveira et al., 2008).

The similar petrographic, geochemical, and geochronological age of the felsic dikes under study and the A-type granites of the Jamon and Velho Guilherme suites suggest that the Paleoproterozoic magmatism of the Tucumã area has also been formed by processes involving thermal perturbations in the upper mantle, mafic underplating, and associated crustal extension or transtension. This is consistent with the broad thermal anomaly associated with the A-type granites of the southwestern United States (Anderson and Cullers, 1999; Frost et al., 1999) and southern Finland (Ramo & Haapala, 1995).

The occurrence of diabase and granite porphyry dike swarms, orientated WNW–ESE to NNW–SSE and coeval with the A-type plutons, demonstrates that tectonic extensional stress was oriented approximately NNE–SSW to ENE–WSW. In this case, the brittle continental crust breakup is also demonstrated by the tabular geometry inferred for A-type plutons of the Jamon suite, and the high viscosity contrast between the granites and their Archean country rocks (Oliveira et al., 2008, 2010). This indicates that dikes were the main mechanism responsible for magma transport and emplacement into the crust.

Even though the Tucumã dikes show a strong affinity with the volcanic rocks and A-type plutons of the São Félix do Xingu region, the anomalous values of Sr attributed to the Sobreiro Formation is a significant difference between it and the andesitic dikes of Tucumã. That characteristic led Fernandes et al. (2011) to attribute the generation of the Sobreiro Formation to the mixing of mantle-derived and anatectic melts of Archean rocks beneath the volcanic sequences in a flat-slab subduction setting.

ACKNOWLEDGEMENTS

The Research Group on Granitoids Petrology (RGGP), for their support in the various stages of this work, the Institute of Geosciences (IG), the Post-Graduate Program in Geology and Geochemistry (PPGG) and the Faculty of Geology, Campus of Marabá, for the support of field activities. This research received financial support from CNPq (D. C. Oliveira - Grants – Proc. 485806/2013-4 and 311610/2012-9; F.F Silva - scholarship — Proc. 133931/2013-7,);

Vale/FAPESPA (01/2010); and Brazilian Institute of Geoscience Amazon (GEOCIAM – CNPq/MCT/FAPESPA – Process no 573733/2008-2).

REFERENCES

- Almeida, F.F.M., Hasui, Y., Brito Neves, B.B., Fuck, R.A., (1981). Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth-Science Reviews* 17, 1e29.
- Anderson, J. L., and Cullers, R. L., 1999. Paleo- and Mesoproterozoic granite plutonism of Colorado and Wyoming. *Rocky Mountain Geology*, v. 34, p. 149-164
- Araújo, O.J.B., Maia, R.G.N., 1991. Programa de levantamentos geológicos básicos do Brasil, Serra dos Carajás, folha SB-22-Z-A, Estado do Pará. Texto explicativo, Brasília, DNPM/CPRM. 164p (in Portuguese).
- Barbosa A.A., Lafon J.M., Neves A.P., Vale A.G., 1995. Geocronologia Rb-Sr e Pb-Pb do Granito Redenção, SE do Pará: Implicações para a evolução do magmatismo Proterozoico da região de Redenção. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Ciências da Terra*, 7:147-164.
- Belousova, E.A., Reid, A.J., Griffin, W.L., O'Reilly, S.Y., 2009. Rejuvenation vs. recycling of Archean crust in the Gawler Craton, South Australia. Evidence from U–Pb and Hf isotopes in Detrital Zircon. *Lithos* 113, 570–582.
- Black, L.P., Kamo, S.L., Allen, C.M., Aleinikoff, J.N., Davis, D.W., Korsch, R.J., Foudoulis, C., 2003. TEMORA 1: a new zircon standard for Phanerozoic U–Pb geochronology. *Chemical Geology*, 200: 155–170.
- Boynton, W.V., 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements; meteorite studies. In: *Rare earth element geochemistry*. Henderson, P. (Editors), Elsevier Sci. Publ. Co., Amsterdam. 63-114.
- Dall'Agnol, R., Costi, H.T., Leite, A.A.S., Magalhães, M.S. & Teixeira, N.P., 1999a: Rapakivi granites from Brazil and adjacent areas. *Precamb. Res.* 95, 9-39.
- Dall'Agnol, R., Rämö, O.T., Magalhães, M.S., Macambira, M.J.B., 1999b. Petrology of the anorogenic, oxidised Jamon and Musa granites, Amazonian craton: implications for the genesis of Proterozoic A-type granites. *Lithos* 46, 431-462.
- Dall'Agnol, R., Teixeira, N.P., Rämö, O.T., Moura, C.A.V., Macambira, M.J.B., Oliveira, D.C., (2005). Petrogenesis of the Paleoproterozoic, rapakivi, A-type granites of the Archean Carajás Metallogenic Province, Brazil. *Lithos* 80, 01-129.

- Dall'Agnol, R., Oliveira, D.C., 2007. Oxidized, magnetite-series, rapakivi-type granites of Carajás, Brazil: Implications for classification and petrogenesis of A-type granites. *Lithos* 93, 215–233.
- De La Roche, H., Leterrier, J., Grand Claude, P., Marchal, M., (1980). A classification of volcanic and plutonic rocks using R1R2-diagram and major-element analyses — its relationships with current nomenclature. *Chemical Geology* 29, 183–210.
- De Paolo, D.J., 1981. Trace element and isotopic effects of combined wall-rock assimilation and fractional crystallization. *Earth and Planetary Science Letters* 53, 189-202. doi: 10.1016/0012-821X(81)90153-9.
- Eby, G.N., 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications. *Geology* 20, 641-644.
- Fernandes, C.M.D., Lamarão, C.N., Teixeira, N.P., 2006. O vulcanismo bimodal do tipo Uatumã da região de São Felix do Xingu (PA), Província Mineral de Carajás. *Revista brasileira de Geociências* 36, 565-576.
- Fernandes, C.M.D., Juliani, C., Monteiro, L.V.S., Lagler, B., Misas, C.M.E., 2011. High-K calc-alkaline to A-type fissure-controlled volcano-plutonism of the São Félix do Xingu region, Amazonian craton, Brazil: Exclusively crustal sources or only mixed Nd model ages? *Journal of South American Earth Sciences* 32, 351-368.
- Ferreira, A.T.R. 2009. Petrografia, geoquímica e geocronologia dos diques da área de Bannach, Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria, SE do Pará. 2009. 55f. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências.
- Frost, C.D., Frost, B.R., Chamberlain, K.R., Edwards, B., 1999. Petrogenesis of the 1.43 Ga Sherman batholith, SE Wyoming, USA: a reduced, rapakivi-type anorogenic granite. *Journal of Petrology* 40, 1771-1802.
- Frost, B.R., Barnes, C., Collins, W., Arculus, R., Ellis, D., Frost, C., 2001. A chemical classification for granitic rocks. *Journal of Petrology* 42, 2033–2048.
- Gastal, M.C.P. 1987. Mapeamento e Petrologia do Maciço Granítico Musa: Rio Maria, Sudeste do Pará. Belém. 319 p. (Tese de Mestrado. UFPA-Centro de Geociências).
- Halls, H.C., Hamilton, M.A. and Denyszyn, S.W. 2011. The Melville Bugt dyke swarm of Greenland: a connection to the 1.5-1.6 Ga Fennoscandian Rapakivi granite province? In *Dyke Swarms: Keys for Geodynamic Interpretation*. Ed. R.K. Srivastava, Pub. Springer-Verlag, Berlin, 605 p., Chapter 27, pp. 509-535. Proceedings of the 6th International Dyke Symposium, Varanasi, India, February 4 to 7, 2010.

- Hanson, G.N., 1978. The application of trace elements in the petrogenesis of igneous rocks of granitic composition. *Earth and Planetary Science Letters*, 38:26-43.
- Hibbard, M.J., 1995. *Petrography to Petrogenesis*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey: 587p.
- Hoskin, P.W.O., and Black, L.P., 2000. Metamorphic zircon formation by solid state recrystallization of protolith igneous zircon: *Journal of Metamorphic Geology*, v. 18, p. 423-439.
- Irvine, T.N., Baragar, W.R.A., 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences* 8, 523-547.
- Jensen, L.S., 1976. A new cation plot for classifying subalkalic volcanic rocks. *Ont. Div. Mines, Misc. Pap.*, 66, 21p.
- Kumar, A., Hamilton, M.A. and Halls, H.C. 2012. A paleoproterozoic giant radiating dyke swarm in the Dharwar Craton, southern India. *Geochem. Geophys. Geosyst.* doi:10.1029/2011GC003926.
- Ludwig K.R., 2003. Using Isoplot/Ex, version 3.00, a geochronological toolkit for Microsoft Excel. *Berkeley Geochronology Center Special Publication*, no. 1, 43p.
- Ludwig K. R., 2009. *Isoplot v.4 for Excel 2007*, Berkeley Geochronology Center, Berkeley, Calif, 71p.
- Macambira M.J.B. 1992. *Chronologie U/Pb, Rb/Sr, K/Ar et croissance de la croûte continentale dans L'Amazonie du sud-est; exemple de la région de Rio Maria, Province de Carajas, Brésil*. Tese de Doutorado, Montpellier, Université Montpellier II-France, 212 p.
- Macambira, E.M.B. & Vale, A.G., 1997. *Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil*. São Felix do Xingu. Folha SB.22-Y-B. Estado do Pará, DNPM/CPRM, Brasília, 384p.
- Machado, N., Lindenmayer, Z., Krogh, T.H., Lindenmayer, D., 1991. U-Pb geochronology of Archaean magmatism and basement reactivation in the Carajás area, Amazon shield, Brazil. *Precambrian Research*, 49:329-354.
- Martin, H., Peucat, J.J., Sabaté, J.C., Cunha, J.C., 1997. Crustal evolution in the Archaean of South America: example of the Sete Voltas Massif, Bahia State, Brazil. *Precam. Res.*, 82:35-62.
- McDonough, W.F., and Sun, S.-S., 1995. Composition of the Earth. *Chemical Geology* 120: 223-253. doi: 10.1016/0009-2541(94)00140-4.

- Moura, C.A.V., & Gaudette, H.E., 1993. Evidence of Brasiliano/Panafrican deformation in the Araguaia Belt: Implication for Gondwana evolution. In: *Revista Brasileira de Geociências*, 23(2): 117-123.
- Oliveira, D.C. Modelos de Evolução e Colocação dos Granitos Paleoproterozoicos da Suíte Jamon, SE do Cráton Amazônico. 2006. 186p. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Belém, 2006.
- Oliveira, D.C., Dall’Agnol, R., Silva, J.B.C. & Almeida, J.A.C., 2008. Gravimetric, radiometric, and magnetic susceptibility study of the Paleoproterozoic Redenção and Bannach plutons: implications for architecture and zoning of A-type granites. *J. S. Am. Earth Sci.* 25, 100-115.
- Oliveira, D.C., Neves, S.P., Trindade, R.I.F., Dall’Agnol, R., Gorki, M., Paulo, B.C., 2010. Magnetic anisotropy of the Redenção granite, eastern Amazonian craton (Brazil): Implications for the emplacement of A-type. *Tectonophysics*, 493: 27-41.
- Oliveira, D.C. Gabriel, E.O., Santos, P.J.L., Silva, C.R.P., Rodrigues, D.S., Santos, R.D., Galarza, M.A., Marangoanha, B., Santos, M.S., Souza, D.B., 2014. Geologia da região de Água Azul do Norte (PA) - Implicações para a compartimentação tectônica do Domínio Carajás. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 47, Anais, Salvador, CDrom.
- Paiva Júnior A.L. 2009. Geologia, petrografia, geocronologia e geoquímica do Granito anorogênico Seringa, Província Mineral de Carajás, SSE do Pará. Universidade Federal do Pará. Instituto de geociências, (Dissertação de Mestrado), p. 120.
- Pearce, J.A., & Norry, M.J., 1979. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rocks. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 69: 33-47.
- Pearce, J.A., Harris, N.B.W., Tindle, A.G., 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, v.25, p. 956-983.
- Rämö, O.T., & Haapala, I., 1995. One hundred years of rapakivi granite. *Mineral. Petrol.* 52, 129-185.
- Ramö, O.T., Dall’Agnol, R., Macambira, M.J.B., Leite, A.A.S., Oliveira, D.C., 2002. 1.88 Ga oxidized A-type granites of the Rio Maria region, eastern Amazonian Craton, Brazil: positively anorogenic, *Journal of Geology*, 110, 603–610.
- Rivalenti, G., Mazzuchelli, M., Girardi, V.A.V., Cavazzini, G., Finatti, C., Barbieri, M. A., Teixeira, W., 1998. Petrogenesis of the Paleoproterozoic basaltic-andesite-rhyolite dyke association in the Carajás region, Amazonian craton. *Lithos*, 43, p. 235-265.

- Rodrigues, E.S., Lafon, J.M., Scheller, T., 1992. Geocronologia Pb-Pb da Província Mineral de Carajás: primeiros resultados. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 37, Boletim de Resumos Expandidos, São Paulo, v.2, p.183-184.
- Lamarão C.N., Dall'Agnol R., Pimentel M.M. 2005. Nd isotopic composition of Paleoproterozoic volcanic and granitoid rocks of Vila Riozinho: implications of the crustal evolution of the Tapajós gold province, Amazon craton. *Journal of South American Earth Sciences*, 18:277-292.
- Lima P.H.A. 2011. Geologia, Petrografia e Geocronologia do Granito São João, Província Carajás, SSE do Pará. Trabalho de Conclusão de Curso - Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 64 p.
- Santos, J.O.S., Hartmann, L.A., Gaudette, H.E., Groves, D.I., Mcnaughton, N.J., Fletcher, I.R., 2000. A New Understanding of the Provinces of the Amazon Craton Based on Integration of Field Mapping and U-Pb and Sm-Nd Geochronology. *Gondwana Research*, 3(4):453–488.
- Santos, J.O.S., 2003. Geotectônica dos Escudos das Guianas e Brasil-Central. In: L. A. Bizzi, C. Schobbenhaus, R. M. Vidotti e J. H. Gonçalves (eds.). *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*. CPRM, Brasília, 169-195 (In portuguese).
- Sato, K., Basei, M.A.S., Siga, O.J., 2008. Novas técnicas aplicadas ao método U-Pb no CPGeo - IGc/USP: avanços na digestão química, espectrometria de massa (TIMS) e exemplos de aplicação integrada com SHRIMP [New techniques applied to U-Pb method at CPGeo – IgC/USP: advances in chemical digestion, mass spectrometry (TIMS) and examples of application integrated with SHRIMP]. *Geologia USP Série Científica*, 8:77-99.
- Shand, S.J., 1950. *Eruptive rocks their genesis, composition, classification and their relation to ore deposit*. 4ed., London, 488p.
- Skjerlie, K.P., and Johnston, D.A., 1993. Fluid-absent melting behaviour of an F-rich tonalitic gneiss at mid-crustal pressures: implications for the generation of anorogenic granites, *J Petrol.*, 34,4, 785-815.
- Silva Jr., R.O., Dall’Agnol, R., Oliveira, E.P. 1999. Geologia, petrografia e geoquímica dos diques proterozoicos da região de Rio Maria, sudeste do Pará. *Geochimica Brasiliensis*, 13(2):163-181.
- Smith, J.V., 1974. *Feldspar Minerals*. New York, Springer-Verlag. 690 p.
- Souza S.Z., Dall’Agnol R., Althoff F.J., Leite A.A.S., Barros C.E.M. 1996. Carajás mineral province: geological, geochronological and tectonic constrasts on the Archean evolution of

- the Rio Maria Granite-Greenstone Terrain and the Carajás block. In: SBG, Symp. Arch. Terr. South Amer. Platf., Extended abstracts, p 31-32.
- Sparks, R.S.J., Marshall, L.A., 1986. Thermal and mechanical constraints on mixing between mafic and silicic magmas, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 29, Issues 1–4, September 1986, Pages 99-124, ISSN 0377-0273, doi: 10.1016/0377-0273(86)90041-7.
- Stern, R.A., 1998. High resolution SIMS determination of radiogenic trace isotope ratios in minerals. In: Cabri, L.J., Vaughan, D.J (Eds). *Modern approaches to ore and environmental mineralogy*. Mineralogical Association of Canada. Short Course Series, 27:241-268.
- Sylvester, P.J., 1994. Archaean granite plutons. In: Condie, K.C. ed. *The Archaean crustal evolution*. Elsevier, p. 261-314.
- Tassinari, C.C.G., & Macambira, M., 2004. A evolução tectônica do Craton Amazônico. In: MANTESSO – NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C.D.R.; BRITO NEVES, B.B. (Eds.), *Geologia do Continente Sul Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques Almeida*. São Paulo, p. 471-486.
- Taylor, S.R., McLennan, S.M., (1985). *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Thorpe, R.S., & Brown, G.C., 1999. *The field description of igneous rocks*. John Wiley & Sons, 154p.
- Teixeira, N.P., 1999. Contribuição ao estudo das rochas granitoides e mineralizações associadas da Suíte Intrusiva Velho Guilherme, Província Estanífera do Sul do Pará. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 508p.
- Teixeira, N.P., Bettencourt, J.S., Moura, C.A.V., Dall’Agnol, R., Macambira, E.M.B., 2002a. Archen crustal sources for paleoproterozoic tin-granites in the Carajás Province, SSE Pará, Brazil: Pb-Pb geochronology and Nd isotope geochemistry. *Prec. Res.*, 119(1-4), 2257-2275.
- Teixeira, N.P., Bettencourt, J.S., Dall’Agnol, R., Moura, C.A.V., Fernandes, C.M.D., Pinho, S.C.C.P., 2005. Geoquímica dos granitos paleoproterozoicos da Suíte granítica Velho Guilherme, Província Estanífera do Sul do Pará. *Revista Brasileira de Geociências*, 35(2), 217-226.
- Vasquez, L.V., Rosa-Costa, L.R., Silva, C.G., Ricci, P.F., Barbosa, J.O., Klein, E.L., Lopes, E.S., Macambira, E.B., Chaves, C.L., Carvalho, J.M., Oliveira, J.G., Anjos, G.C., Silva, H.R., 2008. *Geologia e Recursos Minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas – SIG: texto explicativo dos mapas Geológico e Tectônico e de Recursos*

- Minerais do Estado do Pará. Organizadores, Vasquez M.L., Rosa-Costa L.T. Escala 1:1.000.000. Belém: CPRM.
- Wedepohl, K.H., 1970. Rubidium, Handbook of geochemistry. Berlin, Springer-Verlag, p.37B-37N.
- Whalen, J.B., Currie, K.L., Chappell, B.W., 1987. A-types granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis, Contributions of Mineralogy and Petrology 95, 407–419.
- Williams, I., 1998. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. In: McKibben M.A., Shanks III W.C., Ridley W.I., (eds.). Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes. Society of Economic Geologists. Short course, 7:1-35.
- Wirth, K.R., Gibbs, A.K., Olszewski Jr., W.J., 1986. U-Pb zircon ages of the Grão Pará group and Serra dos Carajás granite, Para, Brazil. Revista Brasileira de Geociências, 16(2):195-200.

CAPÍTULO III

3. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

As informações geradas a partir do mapeamento geológico da região Tucumã levaram à identificação de vários diques intrusivos em granitoides arqueanos com orientação coincidente à estruturação regional NW-SE pré-existente, e que podem atingir até 60 km de extensão. Foi possível, a partir de dados petrográficos e geoquímicos, individualizar tais rochas em três grupos: (i) tipos félsicos de baixa-Si (SiO_2 entre 69,1% e 71,9%) e alta-Si (SiO_2 entre 74% e 78,56%), que foram classificados neste trabalho como riolitos pórfiros e são amplamente predominantes na área e marcados pela presença de fenocristais de quartzo, K-feldspato e plagioclásio, imersos em uma matriz felsítica e afírica e, por vezes, pela ocorrência de textura rapakivi; (ii) tipos intermediários (SiO_2 entre 56,7% e 66,6%), que possuem ocorrência restrita, representando cerca de 10% dos corpos estudados, e foram classificados como dacitos e andesitos; e (iii) tipos máficos (SiO_2 entre 49,1% e 53,7%) são igualmente restritos e são formados por basaltos e basalto andesitos, contendo plagioclásio, clino- e ortopiroxênios e, mais restritamente, olivina, os quais geralmente configuram textura subofítica.

As relações de campo evidenciaram diversos níveis de interação entre os magmas félsico e máfico. A coexistência destes magmas é dada pela presença de texturas decorrentes de mistura de magma (desequilíbrio) e relações de magma *mingling*, visto que fenocristais de quartzo e feldspatos são frequentemente encontrados no interior dos *enclaves* máficos descritos nos riolitos. Tais processos resultaram em rochas de composição híbrida e que estariam representadas neste trabalho pelos dacitos (mistura heterogênea) e, em um estágio mais avançado de assimilação, pelos andesitos descritos na área (mistura homogênea ou magma *mixing*). Dessa forma, a idade de $1888 \pm 3,3$ Ma obtida pelo método U-Pb em zircão para os diques félsicos da área de Tucumã, é interpretada como de cristalização tanto dos riolitos quanto daqueles de caráter máfico a intermediário.

Os diques félsicos são peraluminosos a levemente metaluminosos, e apresentam afinidades geoquímicas com os magmas formadores dos granitos do tipo A2 ferrosos e reduzidos. Já os tipos máficos pertencem à série toleítica e apresentam um acentuado fracionamento de piroxênio e plagioclásio. Apesar dos dados geoquímicos sugerirem, em alguns aspectos, afinidades petrológicas entre os magmas formadores dos três grupos de diques identificados, as diferenças significativas quanto aos seus padrões de ETR e no comportamento de Rb, Ba e Sr sugerem que estas rochas não estejam ligadas por um único processo evolutivo.

Dados de modelagem geoquímica sugerem que a evolução magmática dos diques máficos se deu pelo fracionamento de piroxênio e plagioclásio, ao passo que K-feldspato, biotita, zircão, óxidos de Fe e Ti e apatita são as fases fracionantes no magma félsico. Porém, para a geração das rochas intermediárias, ficou evidenciado que através da mistura de 60% de magma riolítico com contaminação de 40% de líquidos basálticos, originou-se o líquido dacítico. Já para a origem dos andesitos, seria necessária uma contribuição maior de magma basáltico na mistura (em torno de 60%). Desta forma, estima-se que os diques de composição andesítica são provavelmente gerados por uma mistura homogênea em maiores profundidades da crosta continental (*mixing*), ao contrário dos dacitos que, provavelmente, são gerados na crosta superior, a uma temperatura mais baixa proporcionando, dessa forma, um processo de mistura menos eficiente (*migling*).

Os dados apresentados neste trabalho apontam para a existência de um magmatismo proterozoico bimodal na área de Tucumã, similar ao que foi identificado na região de Rio Maria por Dall'Agnol et al. (2002). Considerando que este tipo de magmatismo represente uma interação de magmas máficos e félsicos conduzidos por processos de *commingling* e *mixing*, as fortes afinidades geoquímicas e geocronológicas observadas entre os diques de riolito pórfiro e os plútons da Suíte Velho Guilherme sugerem que a gênese do magmatismo proterozoico da área Tucumã, assim como admitido para aquele da região de Rio Maria (Rämö et al., 2002; Oliveira et al., 2008), estaria relacionado ao mesmo evento tectônico-magmático que deu origem aos granitos rapakivi do sudoeste dos Estados Unidos e do sul da Finlândia, cujos processos de formação envolveriam anomalias termais regionais no manto superior e *underplating* máfico associados a regimes extensionais ou transtensionais da crosta (Rämö & Haapala, 1995; Frost et al., 1999). Ao longo do Domínio Rio Maria, a ocorrência dos enxames de diques de direção geral NW-SE e a coexistência com os plútons das suítes Jamon e Velho Guilherme, demonstra que a atuação dos esforços tectônicos que levaram à extensão e faturamento da crosta foram orientados segundo o *trend* NE-SW.

Nota-se ainda que as afinidades geoquímicas dos diques de Tucumã estendem-se para as associações vulcânicas da região de São Félix do Xingu, onde as rochas das formações Santa Rosa e Sobreiro, são claramente afins daquelas que constituem os diques félsicos e intermediários, respectivamente. De maneira análoga ao que se admite para a evolução dos diques de Tucumã, Fernandes et al. (2011) assumem um modelo de geração para as rochas de São Félix do Xingu a partir de líquidos crustais (fusão de rochas meso a neoarqueanas) com mistura/assimilação de líquidos juvenis. Estes autores também admitem para a Formação Santa Rosa uma origem em ambiente fissural semelhante aquele descrito para as suítes de granitos

tipo-A da Província Carajás. No entanto, os altos conteúdos de Sr encontrados nas rochas da Formação Sobreiro contrastam com os baixos valores atribuídos aos diques de Tucumã, fazendo com que Fernandes et al. (2011) assumam um ambiente de subducção de baixo ângulo para a geração dos andesitos de São Félix do Xingu, como consequência da migração de arcos na Província Tapajós.

REFERÊNCIAS

- Almeida, J.A.C.; Oliveira, M.A.; Dall’Agnol, R.; Althoff, F.J.; Borges, R.M.K. 2008. Geologia da Folha Marajoara (SB-22-ZC V) - Programa Geobrasil. Belém, CPRM– Serviço Geológico do Brasil. 147p. (Relatório técnico).
- Almeida, J.A.C., Dall’Agnol, R., Oliveira, M.A., Macambira, M.J.B., Pimentel, M.M., Rämö, O.T., Guimarães, F.V., Leite, A.A.S., 2011. Zircon geochronology and geochemistry of the TTG suites of the Rio Maria granite-greenstone terrane: Implications for the growth of the Archean crust of Carajás Province, Brazil. *Precambrian Research*, 187:201-221.
- Almeida, J.A.C., Dall’Agnol, R., Leite, A.A.S. 2013. Geochemistry and zircon geochronology of the Archean granite suites of the Rio Maria granite-greenstone terrane, Carajás Province, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 42:201-221
- Althoff, F.J., Barbey, P., Boullier, A.M., 2000. 2.8–3.0 Ga plutonism and deformation in the SE Amazonian craton: the Archean granitoids of Marajoara (Carajás Mineral province, Brazil). *Precambrian Research* 104, 187–206.
- Avelar, V.G., Lafon, J.M., Correia Jr., F.C., Macambira, E.M.B., 1996. O Magmatismo arqueano da região de Tucumã-Província Mineral de Carajás: novos resultados geocronológicos. *Revista Brasileira de Geociências* 29, 454–460.
- Barbosa, A.B., Lafon, J.M., Neves, A.P., Vale, A.G., 1995. Geocronologia Rb-Sr e Pb-Pb do Granito Redenção, SE do Pará: implicações para a evolução do magmatismo proterozoico da Região de Redenção. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, série Ciências da Terra*, Belém, 7:147-164.
- Bard J. P. 1980. *Microtextures of igneous and metamorphic rocks*. D. Reidel Publishing Company. Tokyo. 246.
- Dall’Agnol, R., 1982. Maciço Jamon: Evolução petrológica de um granito da Amazônia Oriental. *In: Simpósio de Geologia da Amazônia*, 1. Anais. Belém, SBG. v. 2, p. 139-161.
- Dall’Agnol, R., Oliveira M.A., Almeida J.A.C., Althoff F.J., LEITE A.A.S., Oliveira D.C., & Barros C.E.M., 2006. Archean and Paleoproterozoic granitoids of the Carajás Metallogenic Province, eastern Amazonian craton. *Abstracts of Symposium on magmatism, crustal evolution, and metallogenesis of the Amazonian craton*1: 99-150
- Dall’Agnol, R., Rämö, O.T., Magalhães, M.S., Macambira, M.J.B., 1999. Petrology of the anorogenic, oxidised Jamon and Musa granites, Amazonian craton: implications for the genesis of Proterozoic A-type granites. *Lithos*, 46:431-462.

- Dall'Agnol, R., Oliveira, D.C., Macambira, M.J.B., Lamarão, C.N.. 2002. Diques proterozoicos do Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria: a descoberta de diques compostos e novos dados geocronológicos. In: 2 Simpósio sobre Vulcânismo e Ambiente Associados, 2002, Belém. Boletim dos Resumos e roteiro da excursão. Belém: Núcleo PRONEX do Centro de Geociências da UFPA, 2002. v. 1. p. 13-13.
- Dall'Agnol, R., Teixeira, N.P., Rämö, O. T., Moura, C.A.V., Macambira, M.J.B., Oliveira, D.C., 2005. Petrogenesis of the Paleoproterozoic, rapakivi, A-type granites of the Archean Carajás Metallogenic Province, Brazil. *Lithos*, 80:102-129.
- Dall'Agnol, R., Oliveira, D.C., 2007. Oxidized, magnetite-series, rapakivi-type granites of Carajás, Brazil: Implications for classification and petrogenesis of A-type granites. *Lithos*, 93:215–233.
- Debon F., Le Fort P., Sabaté P. 1988. Uma classificação químico-mineralógica das rochas plutônicas comuns e suas associações, método e aplicações. *Rev. Bras. Geoc.*, 18 (2): 122-133.
- Deer, W.A., Howie; R.A., Zussman, J., 1992. *Rock-forming minerals*. London, Second Edition Longmans (eds.). 696 p.
- De Paolo, D.J., 1981. Trace element and isotopic effects of combined wall-rock assimilation and fractional crystallization. *Earth and Planetary Science Letters* 53, 189-202. doi: 10.1016/0012-821X(81)90153-9.
- Dias, S. B. 2009. Caracterização geológica, petrográfica e geoquímica de granitos Arqueanos da Folha Marajoara, terreno granito-greenstone de Rio Maria, sudeste do Pará. Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica. 129 p. (Dissertação de Mestrado).
- Fernandes, C.M.D., Lamarão, C. N., Teixeira, N. P., 2006. O vulcanismo bimodal do tipo Uatumã da região de São Felix do Xingu (PA), Província Mineral de Carajás. *Revista brasileira de Geociências*, 36:565-576.
- Fernandes, C.M.D., Juliani, C., Monteiro, L.V.S., Lagler, B., Misas, C.M.E., 2011. High-K calc-alkaline to A-type fissure-controlled volcano-plutonism of the São Félix do Xingu region, Amazonian craton, Brazil: Exclusively crustal sources or only mixed Nd model ages? *Journal of South American Earth Sciences* 32, 351-368.
- Ferreira, A.T.R. 2009. Petrografia, geoquímica e geocronologia dos diques da área de Bannach, Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria, SE do Pará. 2009. 55f. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências.

- Ferreira, A.T.R., Almeida, J.A.C., Dall' Agnol, R., Macambira, M.J.B., 2010. Petrografia, Geoquímica e Geocronologia dos Diques da Área de Bannach, Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria, SE do Pará. In: 45° Congresso Brasileiro de Geologia, 2010, BELÉM. Desenvolvimento e Mudanças Globais: a Importância das Geociências.
- Frost, C.D., Frost, B.R., Chamberlain, K.R., Edwards, B., 1999. Petrogenesis of the 1.43 Ga Sherman batholith, SE Wyoming, USA: a reduced, rapakivi-type anorogenic granite. *Journal of Petrology* 40, 1771-1802.
- Frost, B.R., Barnes, C., Collins, W., Arculus, R., Ellis, D., Frost, C., 2001. A chemical classification for granitic rocks. *Journal of Petrology* 42, 2033–2048.
- Gastal, M.C.P. 1987. Mapeamento e Petrologia do Maciço Granítico Musa: Rio Maria, Sudeste do Pará. Belém. 319 p. (Tese de Mestrado. UFPA-Centro de Geociências).
- Guimarães, F.V., 2009. Geologia, petrografia e geoquímica do trondhjemitó Mogno e rochas arqueanas associadas, terreno granito-greenstone de Rio Maria – SE do Pará, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 102p.
- Hanson, G.N., 1978. The application of trace elements in the petrogenesis of igneous rocks of granitic composition. *Earth and Planetary Science Letters*, 38:26-43.
- Henderson, P., 1984. *Rare Earth Element Geochemistry*, Elsevier, Amsterdam 510 pp.
- Hibbard, M.J., 1995. *Petrography to Petrogenesis*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey: 587p.
- Huhn S.R.B., Santos A.B.S., Amaral A.F., Ledsham E.J., Gouveia J.L., Martins L.B.P., Montalvão R.M.G., Costa V.G. 1988. O terreno granito-greenstone da região de Rio Maria - Sul do Pará. In: SBG, Congr. Bras.Geol. 35. Belém, Anais, 3:1438-1453.
- Juliani, C., Fernandes, C.M.D., 2010. Well preserved Late proterozoic volcanic centers in the São Felix do Xingu region, Amazonian Craton, Brazil. *Journal of Volcanology and Geothermal research*.
- Kerr, P., 1959. *Optical Mineralogy*. McGraw-Hill Book Co., New York, Third Edition, 492 p.
- Lamarão, C. N., Pinho, S C C., Paiva Junior, A.L., Galarza, M. A. 2012. Mineralogy and geochemistry of the Paleoproterozoic, tin-mineralized Bom Jardim granite of the Velho Guilherme Suite, eastern Amazonian craton. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 38, p. 1-15.
- La Roche, H., Leterrier, J., Grandclaude, P., Marchal, M., 1980. A classification of volcanic and plutonic rocks using R1 R2- diagram and major-element analyses - its relationships with current nomenclature. *Chem. Geol.*, 29:183-210.

- Leite A.A.S. 2001. Geoquímica, petrogênese e evolução estrutural dos granitóides arqueanos da região de Xinguara, SE do Cráton Amazônico. Tese de Doutorado, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, 330 p.
- Leite, A.A.S., Dall'Agnol, R., Macambira, M.J.B., Althoff, F.J., 2004. Geologia e geocronologia dos granitoides arqueanos da região de Xinguara (PA) e suas implicações na evolução do Terreno Granito-*Greenstone* de Rio Maria. *Revista Brasileira de Geociências*, 34:447-458.
- Le Maitre, R.W., Bateman, P., Duxson, A., Keller, J., Lameyre, J., Le Bassatine, P.A., Schmid, R., Sorensen, H., Streckeisen, A., Woolwy, R.A., Zannettin, B., 1989. Recommendation of the IUGS, subcommission of the systematic on igneous rocks. Oxford, Blackwell Scientific Publications. 193p.
- Lima P.H.A. 2011. Geologia, Petrografia e Geocronologia do Granito São João, Província Carajás, SSE do Pará. Trabalho de Conclusão de Curso - Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 64 p.
- Lima, P. H. A., Lamarão, C. N., Santos, M. J. P. 2014. Petrografia, geoquímica e suscetibilidade magnética do Granito Paleoproterozóico São João, sudeste do Cráton Amazônico, Província Carajás. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais*, v. 9, p. 47-72.
- Macambira, E.M.B., Vale, A.G., 1997. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. São Felix do Xingu. Folha SB.22-Y-B. Estado do Pará. DNPM/CPRM. Brasília.384p.
- Macambira, M.J.B., 1992. Chronologie U/Pb, Rb/Sr, K/Ar et croissance de la croûte continentale dans L'Amazonie du sud-est; exemple de la région de Rio Maria, Province de Carajás, Brésil. Tese de Doutorado, Montpellier, Université Montpellier II-France, 212 p.
- Machado, N., Lindenmayer, Z., Krogh, T.E., Lindenmayer, D., 1991. U-Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás área, Amazon Shield, Brazil. *Precambrian Research* 49, 329-354.
- Mackenzie, W.S., Donaldson, C.H., Guilford, C., 1982. Atlas of igneous rocks and textures. London, Longman. 148p.
- McPhie, J., Allen, R., Doyle, M., 1993 Volcanic textures: a guide to the interpretation of textures in volcanic rocks. Hobart: Centre for Ore Deposit and Exploration Studies, University of Tasmania 198 p.
- Medeiros H. & Dall'Agnol R. 1988. Petrologia da porção leste do Batólito Granodiorítico Rio Maria, sudeste do Pará. In: SBG, Congr. Brasileiro Geol., 35, Belém, Anais, 3:1488-1499.

- Oliveira, D.C., 2001. Geologia, geoquímica e petrologia magnética do Granito Paleoproterozoico Redenção, SE do Cráton Amazônico. Belém. Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 207 p. (Tese de Mestrado).
- Oliveira, D.C. Modelos de Evolução e Colocação dos Granitos Paleoproterozoicos da Suíte Jamon, SE do Cráton Amazônico. 2006. 186p. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Belém, 2006
- Oliveira, D.C., Dall’Agnol, R., Silva, J.B.C. & Almeida, J.A.C., 2008. Gravimetric, radiometric, and magnetic susceptibility study of the Paleoproterozoic Redenção and Bannach plutons: implications for architecture and zoning of A-type granites. *J. S. Am. Earth Sci.* 25, 100-115.
- Oliveira, D.C., Neves, S.P., Trindade, R.I.F., Dall’Agnol, R., Mariano G., Barros P.C., 2010. Petrological constraints on crystallization conditions of Meso-Archean Gorki, M., Paulo, B.C., 2010. Magnetic anisotropy of the Redenção granite, eastern Amazonian craton (Brazil): Implications for the emplacement of A-type. *Tectonophysics*, 493: 27-41.
- Oliveira, D.C. Gabriel, E.O., Santos, P.J.L., Silva, C.R.P., Rodrigues, D.S., Santos, R.D., Galarza, M.A., Marangoanha, B., Santos, M.S., Souza, D.B., 2014. Geologia da região de Água Azul do Norte (PA) - Implicações para a compartimentação tectônica do Domínio Carajás. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 47, Anais, Salvador, CDrom.
- Oliveira M.A., Dall’Agnol R., Althoff F.J., Leite A.A.S., 2009 Petrological constraints on crystallization conditions of Meso-Archean Sanukitoid Rocks, southeastern Amazonian craton, Brazil. *Journal of petrology*. 31:2121-2148.
- Paiva Júnior A.L. 2009. Geologia, petrografia, geocronologia e geoquímica do Granito anorogênico Seringa, Província Mineral de Carajás, SSE do Pará. Universidade Federal do Pará. Instituto de geociências, (Dissertação de Mestrado), p. 120.
- Paiva Jr. A.L., Lamarão C. N., Lima P.H.A., 2011. Geologia, petrografia e geoquímica do batólito Anorogênico Seringa, Província Mineral de Carajás, SSE do Pará. *Rev. Bras. Geoc.*41(2):185-202.
- Pearce, J.A., Harris, N.B.W., Tindle, A.G., 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, v. 25, p. 956-983.
- Pimentel, M.M.; Machado, N. (1994) Geocronologia U-PB dos terrenos granito-greenstone de Rio Maria, Pará. In: Congresso brasileiro de geologia, 38., Camboriú, 1994. Boletim de Resumos Expandidos. Camboriú, SBG. v.2, p.390-391.
- Ragland, P.C., 1989. *Basic analytical Petrology*. 2. New York, Oxford University Press.

- Rämö, O.T. 1991. Petrogenesis of the proterozoic rapakivi granites and related basic rocks of southeastern Fennoscandia: Nd and Pb isotopic and general geochemical constraints. *Geol Surv Finland Bull* 355.
- Rämö, O.T., & Haapala, I., 1995. One hundred years of rapakivi granite. *Mineral. Petrol.* 52, 129-185.
- Rämö, O.T., Dall'Agnol, R., Macambira, M.J.B., Leite, A.A.S., deOliveira, D.C., 2002. 1.88 Ga oxidized A-type granites of the Rio Maria region, eastern Amazonian craton, Brazil: positively anorogenic! *Journal of Geology* 110, 603–610
- Rivalenti, G., Mazzuchelli, M., Girardi, V.A.V., Cavazzini, G., Finatti, C., Barbieri, M.A., Teixeira, W., 1998. Petrogenesis of the Paleoproterozoic basaltic- andesite-rhyolite dyke association in the Carajás region, Amazonian craton. *Lithos*, 43:235-265.
- Rodrigues E.M.S., Lafon J.M., Scheller T. 1992. Geocronologia Pb-Pb em rochas totais da Província Mineral de Carajás: primeiros resultados. In: SBG. Congr. Bras. Geol.,37, São Paulo.Boletim de Resumos Expandidos. 2:183-184.
- Rolando A.P. & Macambira M.J.B. 2002. Geocronologia dos granitoides arqueanos da região da Serra do Inajá, novas evidências sobre a formação da crosta continental no sudeste do Cráton Amazônico, SSE Pará. In: SBG, Cong. Bras. Geol., 41, João Pessoa, Anais, p. 525.
- Rollinson, H.R., 1993. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, and Interpretation.* New York, Longman, 352 p.
- Santos, J.O.S., Hartmann, L.A., Gaudette, H.E., Groves, D.I., Mcnaughton, N.J., Fletcher, I.R., 2000. A New Understanding of the Provinces of the Amazon Craton Based on Integration of Field Mapping and U-Pb and Sm-Nd Geochronology. *Gondwana Research*, 3(4):453–488.
- Santos, J.O.S., 2003. Geotectônica dos Escudos das Guianas e Brasil-Central. In: L. A. Bizzi, C. Schobbenhaus, R. M. Vidotti e J. H. Gonçalves (eds.). *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil.* CPRM, Brasília, 169-195 (In portuguese).
- Shand, S. J., 1943. *Eruptive Rocks*, 2nd ed. Wiley, New York.
- Silva Jr., R.O. 1996. *Geologia, petrografia e geoquímica dos diques da região de Rio Maria, SE-PA.* Dissertação de Mestrado. Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, 123p.
- Silva Jr., R.O, Dall'Agnol, R., Oliveira, E.P., 1999. Geologia, petrografia e geoquímica dos diques proterozoicos da região de Rio Maria, sudeste do Pará. *Geoch. Brasiliensis*, 13(2):163-181.

- Soares, C.M. 1996. Estudo das relações de contato do granodiorito Rio Maria com os granitos Jamon e Musa e com diques do proterozoico. Belém, Universidade Federal do Pará. 165p. (Dissertação de Mestrado).
- Souza, Z.S. 1994. Geologia e petrogênese do "greenstone belt" Identidade: implicações sobre a evolução geodinâmica do terreno granito - "greenstone" de Rio Maria, SE do Pará. Belém, Universidade Federal do Pará. V. 1, 434p.; v. 2, p. 435-625. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Pará. Belém. 1994.
- Souza, Z.S., Potrel, A., Lafon, J.M., Althoff, F.J., Pimentel, M.M., Dall'Agnol, R., Oliveira, C.G., 2001. Nd, Pb and Sr isotopes in the Identidade Belt, an Archean greenstone belt of Rio Maria region (Carajás Province, Brazil): implications for the geodynamic evolution of the Amazonian craton. *Precambrian Research* 109, 293–315.
- Strecheisen, A., 1976. To each plutonic rock its proper name. *Earth Science Reviews*, 12:1-33.
- Tassinari, C.C.G., Macambira, M., 2004. A evolução tectônica do Craton Amazônico. *In: Mantesso – Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C.D.R., Brito Neves, B.B. (Eds.), Geologia do Continente Sul Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques Almeida. São Paulo, p. 471-486.*
- Teixeira, N.P., 1999. Contribuição ao estudo das rochas granitoides e mineralizações associadas da Suíte Intrusiva Velho Guilherme, Província Estanífera do Sul do Pará. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 508p.
- Teixeira, N.P., Fernandes, C.M.D., Moura, C.A.V., Pinho, S.C.C., Bettencourt J.S., 2002. Geologia, Geoquímica, Geocronologia e Isótopos de Sm-Nd de rochas vulcânicas paleoproterozoicas do Grupo Uatumã ocorrentes na região de São Félix do Xingu, Província Mineral de Carajás, Cráton Amazônico, Brasil. *In: SBG, Simpósio sobre vulcanismo e ambientes associados, 2, Boletim de Resumos e Roteiro da Excursão, Belém, p.28.*
- Vasquez, L.V., Rosa-Costa, L.R., Silva, C.G., Ricci, P.F., Barbosa, J.O., Klein, E.L., Lopes, E.S., Macambira, E.B., Chaves, C.L., Carvalho, J.M., Oliveira, J.G., Anjos, G.C., Silva, H.R., 2008. Geologia e Recursos Minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas – SIG: texto explicativo dos mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará. Organizadores, Vasquez M.L., Rosa-Costa L.T. Escala 1:1.000.000. Belém: CPRM.
- Whalen, J.B., Currie, K.L., Chappell, B.W., 1987. A-types granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis, *Contributions of Mineralogy and Petrology* 95, 407–419.

ANEXO

Pontos amostrados com direção dos diques e discriminação dos estudos realizados.

Pontos	Latitude	Longitude	Direção (Az)	Classificação	Class Química	Petrografia	Geoquímica	Geocronologia
FDB - 01	9254324	444319	315	Rlt	Félsico		x	
FDB - 2A	9256004	445656	230	Rlt	Félsico	x	x	x
FDB - 2B1	9256004	445656	230	Dac	Félsico		x	
FDB - 2B2	9256004	445656	230	Dac	Félsico	x	x	
FDB - 2B3	9256004	445656	230	Dac	Félsico	x	x	
FDB - 2C	9256004	445656	230	And	Intermediario	x	x	
FDB - 03A	9252562	451741	300	Rlt	Félsico	x	x	
FDB - 03B	9252562	451741	300	And B	Máfico		x	
FDB - 04	9252562	451741	300	Rlt	Félsico	x	x	
FDB - 04B	9252562	451741	300	And B	Máfico	x	x	
FDB - 05	9252658	451199	235	And B	Máfico	x	x	
FDB - 6B1	9252300	451159	320	Rlt	Félsico		x	
FDB - 6B2	9252300	451159	320	And B	Máfico	x	x	
FDB - 6B3	9252300	451159	320	And	Intermediario	x	x	
FDB - 07	9248634	458856	295	Rlt	Félsico		x	
FDB - 10A	9248466	459245	290	Rlt	Félsico	x	x	
FDB - 10B	9248466	459245	290	Rlt	Félsico	x	x	
FDB - 10C	9248466	459245	290	And B	Máfico	x	x	
FDB - 11	9248502	460365	290	B	Máfico	x	x	
FDB - 13	9248098	459966	315	Rlt	Félsico	x	x	
FDB - 14	9248259	462007	320	Rlt	Félsico	x	x	
FDB - 15	9248198	462464	325	Rlt	Félsico	x	x	
FDB - 16	9247442	466807	285	Rlt	Félsico	x	x	
FDB - 17	9247774	464874	320	Rlt	Félsico	x	x	
FDB - 19	9248291	462720	320	Rlt	Félsico	x	x	
FDB - 20	9251017	4623983	320	B	Máfico	x	x	
FDB - 21	9250883	462520	320	Rlt	Félsico		x	
FDB - 22	9246407	456104	320	B	Máfico	x	x	
FDB - 23	9240481	457752	290	And	Intermediario	x	x	
FDB - 24	9240326	457741	260	And	Intermediario	x	x	
FDB - 25A	9244434	453542	310	Dac	Félsico		x	
FDB - 25B	9244434	453542	310	Dac	Félsico		x	
FDB - 26	9241957	457785	320	Rlt	Félsico	x	x	
FDB - 27	9243069	458408	280	And	Intermediario	x	x	
FDB - 28	9235306	473291	310	Rlt	Félsico	x	x	
FDB - 29	9230685	471967	280	Rlt	Félsico	x	x	x