

CLARISSA DE AGUIAR DALAN

**GRANITOS DE AFINIDADE ALCALINA NOS DOMÍNIOS RIO
PIRANHAS-SERIDÓ E SÃO JOSÉ DO CAMPESTRE (PROVÍNCIA
BORBOREMA, NE DO BRASIL): ESTUDO COMPARATIVO E
REAValiaÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CRISTALIZAÇÃO**

Orientador: Prof. Dr. Frederico Castro Jobim Vilalva

Co-orientador: Marcos Antonio Leite do Nascimento

Dissertação nº 215/PPGG

NATAL/RN
2018

CLARISSA DE AGUIAR DALAN

**GRANITOS DE AFINIDADE ALCALINA NOS DOMÍNIOS RIO
PIRANHAS-SERIDÓ E SÃO JOSÉ DO CAMPESTRE (PROVÍNCIA
BORBOREMA, NE DO BRASIL): ESTUDO COMPARATIVO E
REAValiaÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CRISTALIZAÇÃO**

Dissertação apresentada em 03 de setembro de 2018, como parte dos requisitos apresentados para obtenção do título de Mestre em Geodinâmica e Geofísica, com área de concentração em geodinâmica, pelo Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Orientador:

**PROF. DR. FREDERICO CASTRO JOBIM VILALVA
(PPGG/UFRN)**

Co-orientador:

**PROF. DR. MARCOS ANTONIO LEITE DO NASCIMENTO
(PPGG/UFRN)**

**NATAL/RN
2018**

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Setorial Prof. Ronaldo Xavier de Arruda - CCET

Dalan, Clarissa de Aguiar.

Granitos de afinidade alcalina nos domínios rio Piranhas-Seridó e São José do Campestre (Província Borborema, NE do Brasil): estudo comparativo e reavaliação das condições de cristalização / Clarissa de Aguiar Dalan. - 2018.

141f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica. Natal, 2018.

Orientador: Frederico Castro Jobim Vilalva.

Coorientador: Marcos Antonio Leite do Nascimento.

1. Granitos alcalinos - Dissertação. 2. Geotermobarometria - Dissertação. 3. Província Borborema - Dissertação. I. Vilalva, Frederico Castro Jobim. II. Nascimento, Marcos Antonio Leite do. III. Título.

RN/UF/CCET

CDU 552.331

CLARISSA DE AGUIAR DALAN

**GRANITOS DE AFINIDADE ALCALINA NOS DOMÍNIOS RIO
PIRANHAS-SERIDÓ E SÃO JOSÉ DO CAMPESTRE (PROVÍNCIA
BORBOREMA, NE DO BRASIL): ESTUDO COMPARATIVO E
REAValiaÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CRISTALIZAÇÃO**

Dissertação apresentada em 03 de setembro de 2018, como parte dos requisitos apresentados para obtenção do título de Mestre em Geodinâmica e Geofísica, com área de concentração em geodinâmica, pelo Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Natal, 03 de setembro de 2018.

BANCA EXAMINADORA:

**Prof. Dr. Frederico Castro Jobim Vilalva
(orientador) PPGG-UFRN**

**Prof. Dr. Antonio Carlos Galindo
(membro interno) PPGG-UFRN**

**Profa. Dr^a. Luana Moreira Florisbal
(membro externo) DEGEO-UFSC**

À minha família, que sempre me apoiou nas minhas decisões, independentemente das dificuldades que enfrentaríamos e continuaram me apoiando incondicionalmente na realização deste mestrado.

Gratidão! Esta dissertação só se concretizou graças ao apoio de vocês. Amo vocês.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar quero agradecer à Força Divina que me trouxe à Natal pra me deixar mais perto de mim. Foi aqui que enxerguei que só eu posso me dar o que eu preciso, só eu posso me limitar e só eu posso lutar pelo meu próprio crescimento. Graças à essa Força Divina, fui presenteada com uma família que sempre me apoiou em todas as decisões da minha vida, mesmo quando isso incluía sair de casa num momento tão complicado pra me aperfeiçoar em prol desse amor pelas forças da natureza, a Geologia. Amo vocês. Tudo que aprendi - e não falo só dos aprendizados geológicos, aprendi muito mais sobre a vida e sobre mim – levarei comigo pro resto da vida e espero poder sempre compartilhar essas experiências. Minha gratidão.

Ao meu orientador, Fred, que ao entrar no Programa, eu nem imaginava que seria sua primeira orientanda (você não imagina o quanto isso me tirou noites de sono hehe) e que seria tão bem guiada. Obrigada por ser um orientador humano, pelos conhecimentos transmitidos, mas principalmente pela paciência e por acreditar em mim quando até eu duvidava da minha capacidade.

Ao meu co-orientador, Marcos, por também me auxiliar quando eu me sentia perdida. Por me mostrar que não adianta termos grandes objetivos se não dermos um passo de cada vez. Obrigada pelo apoio e paciência.

À banca examinadora, por aceitar o convite. Ao professor Drº Galindo que com tanto amor e dedicação ao ensino nos inspira. E à Prof.^a Dra. Luana Florisbal que aceitou o convite de participar e contribuir com seu conhecimento.

À todos os integrantes do Programa de Pós Graduação em Geodinâmica e Geofísica, em especial aos professores.

À Dona Ana, que foi a primeira pessoa a me acolher nessa cidade e me aceitou no seu lar durante um tempo. Muito obrigada.

À Edson e sua família, sempre tão prestativos e amigos nos momentos difíceis de adaptação tanto ao mestrado, quanto nos momentos de chegada à cidade. Obrigada pela acolhida, amigo.

Aos amigos Allyson, Mateus, Paixão, Matchellon, Gian, Samir e Edson da sala 3 do PPGG, a melhor sala da pós graduação possível. Gratidão por me ajudarem, me acalmarem nos momentos de nervosismo, pelos seminários internos e, mais ainda por me ensinarem os mantras “VDC” e “JDC”.

À Rô e Ana pelo reencontro de almas nessa vida. Não consigo definir em palavras o quanto a nossa rede de apoio tem sido essencial e um afago na minha alma. Vocês me lembraram que o significado de família vai além de vínculos sanguíneos. Amo vocês! Amo a gente!

À galera que CAGERNIZOU minha vida nesses últimos anos, Marcota, Cata, Carlola, Khalil, Barbariza, Joyce, Armando, Vinóia, Ramon, Thiago, Diogo, todos do CA e também da graduação, por me acolherem na família de vocês e me possibilitarem vínculos de amizade que espero levar pra sempre. Gratidão pelos papos geológicos e pela oportunidade de um ambiente que inspira tanto o amor pela Geologia.

Ao meu amor, Marcos, que foi o maior presente inesperado nos últimos anos da minha vida. Gratidão por você ter aparecido na minha vida, por darmos tão certo em especial pelas nossas conversas que me ajudaram a voltar ao meu centro nos momentos de nervosismo e por me encorajar e enraizar quando meus pensamentos me sabotavam. Te amo demais, gratidão por tudo. Obrigada por além de um ótimo companheiro, também me inspirar geologicamente.

Aos amigos geológicos, o nosso amor pela Geologia nos uniu, mas agora outras afinidades irão fortalecer nossos laços. Obrigada por tudo.

À toda minha família de sangue e de coração pelas palavras de estímulo e conforto.

Às professoras Dra. Adriana Alves e Lucelene Martis que me auxiliaram durante as análises no *Laser Ablation* no Instituto de Geociências da USP.

Ao professor Dr. Thomas Campos por me ceder dados indispensáveis para discussões nesta dissertação.

Agradeço a todos que cruzaram meu caminho. Sem vocês, o título de mestre até poderia sair, mas seria completamente vazio. Vocês são marcas fundamentais em mim e contribuíram de alguma forma para a construção de quem sou hoje.

Gratidão também à esta cidade maravilhosa que me acolheu nesses dois anos, e que de fato, Natal, foi onde eu renasci. Espero voltar em breve.

Gratidão à VIDA por me trazer até esse ponto dessa forma tão abençoada.

Um mestrado nunca é só um mestrado. Crescer é sempre uma ótima escolha.

“E pela lei natural dos encontros

Eu deixo e recebo um tanto”

Mistério do planeta – Novos Baianos

RESUMO

O magmatismo granítico ediacarano de afinidade alcalina (tipo-A) nos Domínios São José do Campestre (SJC) e Rio Piranhas-Seridó (RPS), no extremo NE da província Borborema, é representado pelos plútons Japi, Caxexa, Serra do Boqueirão, Serra do Algodão, Olho D'Água, Serra Negra do Norte e *stock* Flores. Esta dissertação apresenta um estudo integrado e comparativo do ponto de vista petrográfico e químico (rocha-total e química mineral) entre esses plútons, com foco principal na reavaliação dos parâmetros intensivos de cristalização (P , T , fO_2) à luz de novas calibrações geotermobarométricas e modelagens de cristalização com o programa *rhyolite*-MELTS. Buscando uma melhor compreensão regional deste magmatismo, os resultados são comparados com dados disponíveis para granitoides de tipo-A cronocorrelatos no Domínio da Zona Transversal (ZT) da Província Borborema. Petrograficamente definem-se dois grupos: (1) plútons intrusivos em rochas do Domínio SJC (Japi, Caxexa, Serra do Algodão, Serra do Boqueirão e Olho D'Água) onde predominam álcali-feldspato granitos, sienitos e sienogranitos, com anfibólio cálcico e/ou clinopiroxênio cálcico e sódico-cálcico. (2) Plútons aflorantes no Domínio RPS (Serra Negra do Norte e Flores) predominam sieno- e monzogranitos com biotita $\pm$ anfibólio e clinopiroxênio cálcico (Serra Negra do Norte). Titanita, apatita, zircão e opacos são os acessórios mais comuns. Andradita ocorre nos plútons Caxexa e Serra do Algodão e epidoto primário é descrito no plúton Serra Negra do Norte. Em linhas gerais, as rochas têm afinidades alcalina a álcali-cálcica bem marcadas em diagramas litoquímicos. São ricas em ferro (“ferroanas”) e possuem caráter meta- a peraluminoso. As rochas do Serra Negra do Norte destoam por apresentarem composições mais magnesianas que se aproximam das tipicamente encontradas em granitos cálcio-alcálicos (tipo-I cordilheiranos). A mineralogia máfica acompanha as assinaturas químicas das rochas hospedeiras. Os clinopiroxênios variam de diopsídio e augita (Serra Negra do Norte e Japi) a hedenbergita e egirina-augita (Caxexa, Serra do Algodão); os anfibólios são principalmente Mg-ferri-hornblenda e a biotita é predominantemente annítica, com composições mais magnesianas no plúton Serra Negra do Norte. Os plútons Caxexa, Serra do Algodão, Serra do Boqueirão e Olho D'Água mostram semelhanças petrográficas e químicas com granitos peralcalinos do Domínio ZT, enquanto o *stock* Flores é similar aos granitos tipo-A meta- a peraluminosos dos terrenos Alto Moxotó e Alto Pajeú no Domínio ZT. O plúton Japi, e principalmente o Serra Negra do Norte são transicionais, assemelhando-se quimicamente ora a um grupo, ora a outro. As reavaliações termobarométricas revelam que os granitos estudados se cristalizaram sob pressões entre 3,0–3,7 kbar (~11–14 km em profundidade), à exceção do plúton Japi, com pressões médias de 5,3 kbar (~20 km) similares às encontradas nos granitos tipo-A dos terrenos Alto Moxotó e Alto Pajeú. Os modelamentos resultaram em temperaturas de *liquidus* entre 885–917 °C e 818 °C para o *stock* Flores, e *solidus* entre 660–700 °C. Quando presentes, clinopiroxênios, anfibólios e biotita se formam entre 813–822 °C, 728–751 °C e 750–789 °C, respectivamente. Dentre os acessórios, o geotermômetro Zr-em-titanita indica temperaturas da ordem de 780 °C (máximas de 830 °C) para o plúton Caxexa. A cristalização ocorreu sob condições essencialmente oxidantes para a maioria dos plútons ($+1,0 < \Delta_{QFM} < +2,1$; $+0,4 < \Delta_{NNO} < +1,5$), à exceção do *stock* Flores, formado sob condições levemente mais reduzidas ($\Delta_{QFM} \approx 0,0$; $\Delta_{NNO} \approx -0,6$).

PALAVRAS-CHAVE: granitos alcalinos, geotermobarometria, Província Borborema.

ABSTRACT

The ediacaran granitic magmatism of alkaline affinity (A-type) within the São José do Campestre (SJC) and Rio Piranhas-Seridó (RPS) Domains, in northeastern part of the Borborema Province, is represented by the Japi, Caxexa, Serra do Boqueirão, Serra do Algodão, Olho D'Água and Serra Negra do Norte plutons, and by the Flores *stock*. This work presents an integrated and comparative petrographic and chemical (whole-rock and mineral chemistry) study among these plutons, with the main focus on the revaluation of the intensive crystallization parameters (P, T, fO_2), in light of new geothermobarometric calibrations and crystallization modelling with the *rhyolite*-MELTS software. In order to provide a regional understanding of this magmatism, the results are compared with available data for chrono-correlated A-type granites within the Transversal Zone (TZ) Domain of the Borborema Province. Based on petrographic data, the plutons are divided in two groups: (1) plutons intrusive into the SJC Domain (Japi, Caxexa, Serra do Algodão, Serra do Boqueirão and Olho D'Água) that are made mainly of alkali-feldspar granites, syenites and syenogranites, with calcic amphibole and/or calcic and sodic-calcic clinopyroxene. (2) plutons that crop out in the RPS Domain (Serra Negra do Norte and Flores), comprising syeno- and monzogranites with biotite $\pm$ calcic amphibole and clinopyroxene (Serra Negra do Norte). Titanite, apatite, zircon and opaque minerals are the main accessories. Andradite is found in the Caxexa and Serra do Algodão plutons, and primary epidote in the Serra Negra do Norte. Overall, the studied rocks show well-defined alkaline to alkali-calcic affinities in lithochemical diagrams. They are iron-rich (ferroan) and have meta- to peraluminous character. The Serra Negra do Norte pluton differs by showing more magnesian compositions that approach those typical of calc-alkaline granites (cordilleran I-type). The mafic minerals follow the chemical signatures of their host-rocks. Clinopyroxenes vary from diopside and augite (Serra Negra do Norte and Japi) to hedenbergite and aegirine-augite (Caxexa, Serra do Algodão); amphiboles are mainly Mg-ferri-hornblende, and the biotite is annite, with more magnesian compositions in the Serra Negra do Norte granites. The Caxexa, Serra do Algodão, Serra do Boqueirão and Olho D'Água plutons share petrographic and chemical similarities with peralkaline granites of the TZ Domain, whereas the Flores *stock* are akin to meta- to peraluminous A-type granites of the Alto Moxotó and Alto Pajeú terrains inside the TZ Domain. The Japi, and mainly the Serra Negra do Norte plutons are transitional, with chemical similarities sometimes with one group, sometimes with another. The revaluated thermobarometry reveals that the studied granites crystallized under pressures of 3.0–3.7 kbar (~11–14 km at depth), except for those of the Japi pluton, with average pressures of 5.3 kbar (~20 km) that are akin to those found for the A-type granites in the Alto Moxotó and Alto Pajeú terrains. Crystallization modelling yielded *liquidus* temperatures in the range 885–917 °C, and 818 °C for the Flores *stock*, and *solidus* between 660–700 °C. When they are present, clinopyroxenes, amphiboles and biotite formed between 813–822 °C, 728–751 °C, and 750–789 °C, respectively. Among the accessories, the geothermometer Zr-in-titanite gave temperatures of about 780 °C (maximum of 830 °C). Crystallization took place under essentially oxidizing conditions for most of the plutons ($+1.0 < \Delta_{QFM} < +2.1$; $+0.4 < \Delta_{NNO} < +1.5$), except for the Flores *stock* formed under slightly more reduced conditions ($\Delta_{QFM} \approx 0.0$; $\Delta_{NNO} \approx -0.6$).

KEYWORDS: alkaline granites, geothermobarometry, Borborema Province

SUMÁRIO

CAPÍTULO I. INTRODUÇÃO	13
I.1 Apresentação do Tema e Objetivos	13
I.2 Revisão de nomenclatura – Granitos alcalinos ou de tipo-A	14
I.3 Metodologia	17
CAPÍTULO II. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	24
II.1 Província Borborema	24
II.1.1 Domínio Rio Piranhas-Seridó	26
II.1.2 Domínio São José do Campestre	26
II.1.3 O Magmatismo ediacarano-cambriano	26
II.1.4. Domínio da Zona Transversal	28
CAPÍTULO III. GEOLOGIA DOS CORPOS ESTUDADOS	31
III.1 Stock Flores	31
III.2 Plúton Serra Negra do Norte	32
III.3 Plúton Japi	33
III.4 Plúton Caxexa	34
III.5 Plútons Serra do Algodão, Serra do Boqueirão e Olho D'Água	35
CAPÍTULO IV. CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA	36
IV. 1 Mineralogia Félsica	37
IV.2 Mineralogia máfica	38
IV.2.1 Plútons Caxexa, SA, SB e OD	39
IV.2.2 Japi	40
IV.2.3 Stock Flores	40
IV.2.4 Serra Negra do Norte	41
IV.3 Sequências de cristalização	42
CAPÍTULO V. LITOQUÍMICA	45
V.1 Diagramas de variação	45
V.1.1. Elementos maiores	45
V.1.2. Elementos traços	48
V.1.3 Elementos Terras Raras	49
V.2. Diagramas de séries magmáticas	52
V.2.1 Saturação em alumina	52
V.2.2 Diagramas discriminantes de séries magmáticas	52
V.3 Comparação com os plútons alcalinos do DZT	58
CAPÍTULO VI. QUIMISMO MINERAL	63

VI. 1 Feldspatos.....	63
VI. 2 Clinopiroxênios.....	66
VI. 3 Anfibólios	69
VI. 4 Biotita	71
CAPÍTULO VII. ARTIGO SUBMETIDO	77
1. INTRODUÇÃO	79
2. CONTEXTUALIZAÇÃO GEOLÓGICA	80
3. MATERIAIS E MÉTODOS	81
4. A SUÍTE ALCALINA: SÍNTESE TEXTURAL E QUÍMICA	83
4. 1 Petrografia e Litoquímica.....	83
4.2. Quimismo mineral.....	86
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	89
5.1 Pressão.....	89
5.2 Temperatura	91
5.3 Fugacidade de Oxigênio	96
5.4 Implicações geodinâmicas	99
6. CONCLUSÕES.....	101
7. REFERÊNCIAS	102
CAPÍTULO VIII. CONCLUSÕES	109
IX. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111
X. ANEXOS.....	128
Tabelas com modelagens no programa rhyolite-MELTS para os plútons estudados	

CAPÍTULO I. INTRODUÇÃO

I.1 Apresentação do Tema e Objetivos

A Província Borborema (Almeida et al., 1977), no nordeste brasileiro, consiste de um cinturão orogênico meso-neoproterozoico que envolve a colagem de blocos crustais mais antigos (arqueanos a paleoproterozoicos) e unidades supracrustais proterozoicas, agrupadas em diferentes terrenos e domínios tectonoestratigráficos. Em seu extremo nordeste, a província é subdividida em três domínios denominados Jaguaribeano, Rio Piranhas-Seridó e São José do Campestre (Angelim et al., 2006). Nesta região (e na província como um todo), uma importante feição geológica é a ocorrência de um extenso e volumoso magmatismo granítico (*lato sensu*) sin- a pós-orogênico durante os períodos Ediacarano e Cambriano. Nos Domínios Rio Piranhas-Seridó e São José do Campestre, este magmatismo é agrupado em seis suítes com características petrográficas e químicas distintas: shoshonítica, cálcio-alcalina de alto K porfírica, cálcio-alcalina de alto K equigranular, cálcio-alcalina, alcalina e alcalina charnoquítica (Nascimento et al., 2015). Embora muitos dos principais corpos dessas suítes já se encontrem relativamente bem caracterizados do ponto de vista petrográfico, químico, tectônico e cronológico, estudos comparativos e integrados entre corpos de uma mesma suíte ou de suítes distintas que permitam interpretações petrogenéticas são escassos. De forma a preencher esta lacuna do conhecimento, foi elaborado e iniciado um plano de pesquisa com o objetivo de integralizar, reavaliar e discutir dados geológicos prévios e inéditos das diferentes suítes que compõem o magmatismo Ediacarano-Cambriano no extremo nordeste da Província Borborema, de forma a se ter uma melhor compreensão de seu contexto evolutivo e significado geotectônico. Em um primeiro momento escolheu-se como alvo a suíte cálcio-alcalina de alto K porfírica (Campos, 2016; Campos et al., 2016) e atualmente estão em curso estudos que abordam as suítes cálcio-alcalina de alto K equigranular e shoshonítica. É neste contexto que se insere esta dissertação de Mestrado, que tem como foco de trabalho a suíte alcalina nos Domínios Rio Piranhas-Seridó (DRPS) e São José do Campestre (DSJC), cuja representação se dá pelo plúton Serra Negra do Norte e *stock*

Flores no DRPS, e os plútons Caxexa, Serra do Algodão, Serra do Boqueirão, Olho D'água e a fácies alcalina do plúton Japi no DSJC. A dissertação tem como objetivo principal contribuir com o melhor entendimento da granitogênese alcalina no DRPS e DJSC e seu significado geodinâmico através de (1) o estudo comparativo das características petrográficas e químicas desses corpos, destacando similaridades e diferenças; (2) a reavaliação dos parâmetros intensivos de cristalização (P, T, fO_2). Adicionalmente, oferece-se uma comparação preliminar com granitos similares aflorantes no Domínio da Zona Transversal, correspondente à porção central da Província Borborema.

I.2 Revisão de nomenclatura – Granitos alcalinos ou de tipo-A

Os sete plútons aqui estudados são rochas com assinatura alcalina, e como tal apresentam características petrográficas e químicas com os denominados granitoides de tipo-A. Neste âmbito, apresenta-se a seguir uma breve revisão bibliográfica sobre granitos de tipo-A.

A denominação alfabética de granitos foi inicialmente proposta com enfoque genético, tal como empregado na classificação pioneira de granitos de tipo – I e –S (Chappell e White, 1974). No entanto, a gênese dos granitos tipo-A nunca foi consenso, tampouco bem definida. Por outro lado, as características geoquímicas desses granitos e rochas associadas são relativamente bem estabelecidas. O termo “tipo-A” foi cunhado por Loiselle e Wones (1979) inicialmente para definir um grupo específico de granitos (e rochas félsicas associadas) de natureza **Anorogênica**, com tendência **Alcalina** e formado sob baixas fugacidades de H_2O (“**Anidros**”) e O_2 . Este trabalho, apresentado na forma de um resumo simples, não foi procedido de estudos aprofundados pelos autores, o que contribuiu para a confusão criada em torno de alguns atributos de magmas de tipo-A (cf. Bonin, 2007; Frost e Frost, 2011).

Collins et al. (1982) publicou o primeiro artigo empregando o termo granito tipo-A para corpos do Cinturão Dobrado de Lachlan, Austrália. Tais corpos apresentavam altas concentrações de álcalis, Nb e Ga, Sn e foram interpretados como resultado da fusão parcial de granulitos félsicos.

Whalen et al. (1987) sintetizaram as principais características litoquímicas e tectônicas então conhecidas para os granitos tipo-A e propuseram diagramas classificatórios baseados nos teores de álcalis e de traços como Zr, Nb, Ce, Y, e na razão Ga/Al. Os autores destacaram ainda que os granitos de tipo-A se classificam predominantemente como intraplaca nos diagramas de ambientação tectônica de Pearce et al. (1984).

Em linhas gerais, granitoides de tipo-A incluem litotipos com características petrográficas e afinidades químicas e isotópicas contrastantes: álcali-cálcicas, subalcalinas a alcalinas, peralcalinas, metaluminosas a levemente peraluminosas, com razões Fe/Mg altas a muito altas. Os máficos principais são sódicos a sódico-cálcicos, ou mesmo cálcicos (clinopiroxênios e anfibólios) e potássicos (biotita). São rochas enriquecidas em álcalis, elementos de alto potencial iônico, em especial o Zr, Nb, Y e terras-raras; e empobrecidas em Ca, Ba, Sr e Eu. Formam-se em ambientes anorogênicos continentais ou oceânicos, bem como sin- a pós-orogênicos e/ou sin- a pós-colisionais em regimes tectônicos extensionais na crosta continental (cf., Whalen et al., 1987; Sylvester, 1989; Eby, 1992; Jardim de Sá et al., 1999; Frost et al., 2001; King et al., 2001; Gualda e Vlach, 2007; Bonin, 2007; Grebennikov, 2014; Nédélec e Bouchez, 2015; Milani et al., 2015).

Quanto às condições redox de formação, embora originalmente definidos como formados em ambientes mais reduzidos, magmas de tipo-A podem ser gerados sob condições ora mais oxidantes, ora mais redutoras (Anderson e Bender, 1989; Dall'Agnol e Oliveira, 2007; Cunha et al., 2016). Magmas tipo-A oxidados são considerados derivados de fundidos com quantidades consideráveis de conteúdos de água (>4% porcentagem em peso) provenientes de fonte ígnea quartzo-feldspática abaixo das condições de oxidação e que possuam clinopiroxênio como uma importante fase residual. Os granitos tipo-A reduzidos podem ser derivados de fontes ígneas quartzo-feldspáticas com componentes metassedimentares, mas também de fontes toleíticas diferenciadas (Dall'Agnol e Oliveira, 2007).

Com a evolução do conhecimento, Eby (1992) definiu dois subgrupos de granitos de tipo-A, denominados A1 e A2, vinculando a origem do primeiro à atividade de pluma mantélica ou *hotspots* em ambiente de rifte intraplaca (ambiente anorogênico), e o segundo a uma origem crustal ou mantélica em ambientes

tectônicos extensionais (ambiente pós-colisional ou pós-orogênico). A divisão entre os dois tipos é baseada na distribuição de elementos traços.

A grande variedade de composições e rochas agrupadas sob o rótulo “tipo-A” e os diferentes ambientes geotectônicos de formação tornam impossível a proposição de um modelo genético universal. Outrossim, apontam para o fato de que magmas/granoitoides de tipo-A se formam via processos e áreas-fontes com importância específica em relação aos diferentes ambientes (Turner et al., 1992; Whalen, 2005). Em linhas gerais, os modelos petrogenéticos já propostos para a formação de magmas tipo-A se dividem em quatro grupos (e.g., Bonin, 2007; Martin, 2006, Nédélec e Bouchez, 2015): (1) geração a partir da diferenciação de magmas mantélicos tipo OIB, com contaminação e assimilação crustal variada; (2) diferenciação de magmas toleíticos continentais, com diferentes proporções de interação crustal; (3) fusão parcial de fonte crustal empobrecida por eventos prévios de fusão; (4) fusão de crosta metassomatizada por fluidos mantélicos, com fracionamento concomitante de magmas basálticos.

Para Bonin (2007), a grande variabilidade petrográfica, litoquímica e tectônica de rochas agrupadas sob o rótulo “tipo-A”, bem como a falta de consenso quanto aos modelos petrogenéticos envolvidos, aponta para a existência de “granitos e granitos de tipo-A”. Estes, entre outros fatores, levaram Frost e Frost (2011) a sugerirem que o termo fosse descontinuado e substituído por “granitos ferroanos”, um neologismo para o termo “*ferroan granites*” dos autores (cf. Frost et al., 2001). Os autores se baseiam no fato que a composição rica em ferro total destes granitos é comum em todas as classificações propostas até o momento. Outro autor que propôs o abandono da denominação genética de granitos tipo-A foi Nardi (2016), uma vez que esta denominação isola os granitos do seu contexto geológico. Como nova sugestão, Nardi (2016) propôs a classificação dos granitos com base em séries magmáticas, com a série alcalina dividida em alcalina subsaturada em sílica, alcalina sódica saturada em sílica, shoshonítica ou alcalina potássica e ultrapotássica saturada em sílica. Neste contexto, os granitos tipo-A corresponderiam à série alcalina sódica saturada em sílica. Esta série corresponde, no âmbito dos granitos, a granitos metaluminosos e peralcalinos. Os granitoides metaluminosos, com biotita e anfibólio como fases máficas principais, correspondem a granitos e quartzo sienitos (e rochas básicas

associadas) de afinidade alcalina saturadas em sílica e ocorrem principalmente em ambientes pós-colisionais, anorogênicos ou em arco continental maduro. Os granitoides peralcalinos tem anfibólios e piroxênios sódicos como máficos principais.

I.3 Metodologia

O desenvolvimento desta dissertação seguiu as cinco etapas listadas a seguir:

1. Levantamento e atualização bibliográfica sobre os granitos alcalinos (tipo-A) da Província Borborema, com ênfase nos domínios São José do Campestre (SJC) e Rio Piranhas-Seridó (RPS), quais sejam: plútons Caxexa, Serra do Algodão, Serra do Boqueirão, Olho D'Água e Japi (SJC); *stock* Flores e plúton Serra Negra do Norte (RPS); bem como sobre ocorrências clássicas para comparação;
2. Catalogação e descrição petrográfica de seções delgadas dos plútons Caxexa, Serra Negra do Norte e *stock* Flores, provenientes dos acervos de pesquisadores da UFRN;
3. Elaboração de um banco de dados para os granitos alcalinos dos domínios SJC e RPS. Foram compilados e selecionados de forma criteriosa dados petrográficos, litoquímicos e de química mineral disponíveis na literatura, bem como alguns dados ainda inéditos fornecidos por pesquisadores da UFRN. Dados químicos (rocha-total e química mineral) de ocorrências clássicas de granitos de tipo-A do Domínio da Zona Transversal da Província Borborema (DZT) foram também compilados de forma preliminar para comparações. A tabela I-1 lista os plútons selecionados, as principais referências consultadas e o quantitativo de dados químicos compilados.
4. Análises químicas inéditas via *laser ablation* para a quantificação dos teores de Zr (ppm) em cristais de titanita do Plúton Caxexa.
5. Tratamento integrado, análise, reinterpretação e discussão dos dados à luz das interpretações clássicas e atuais sobre granitos de tipo-A e o contexto geotectônico dos domínios RPS e SJC na Província Borborema.

As descrições petrográficas foram feitas no laboratório de Microscopia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte com o microscópio petrográfico da

marca *Olympus* modelo BX41TF. Foram analisadas 15 lâminas do plúton Caxexa, 11 do plúton Serra Negra do Norte e 32 do stock Flores. Informações petrográficas dos outros plútons foram levantadas da bibliografia (Tab. I-1). Foram caracterizadas as assembleias máficas e félsicas, principais texturas existentes e sequências de cristalização mineralógica em cada plúton.

Os teores de Zr (ppm) em cristais de titanita do plúton Caxexa foram quantificados por ablação a laser (*laser ablation* - LA) no laboratório de LA-ICP-MS do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, com um espectrômetro ICP-MS do tipo quadrupolo modelo iCAP Q da Thermo Scientific, acoplado a um sistema de *laser ablation* Y(Nd)AlG de 213 nm modelo UP-213 da ESI-New Wave. Quatro cristais de titanita foram analisados em seções delgado-polidas de 100 μm . Os experimentos de ablação a laser foram feitos com uma fluência de energia de 3,6 J/cm², frequência de repetição de 15 Hz e diâmetro do laser de 40 μm . O tempo total de aquisição foi de 120 s, igualmente dividido entre leitura do *background* e aquisição do sinal iônico do isótopo ⁹¹Zr, com tempo de integração e *dwell time* de cerca de 1,6 e 25 ms, respectivamente. A ablação é seguida por 30s de *washout time*. Os materiais de referência NIST-SRM 610 e USGS BIR-1 foram usados como padrões externos, e os teores médios de CaO (% peso) na titanita do Caxexa, obtidos via microsonda eletrônica por Nascimento (2000), foram utilizados como padrão interno. A redução dos dados, correção do *drift* do equipamento, tratamento e conversão das intensidades em concentrações (ppm) foram efetuadas com o programa *Glitter* (van Achterbergh et al., 2001). Os resultados obtidos foram utilizados para estimativas geotermométricas.

A etapa de tratamento dos dados químicos incluiu o recálculo das fórmulas estruturais dos principais minerais félsicos (plagioclásio e feldspato alcalino) e máficos (clinopiroxênios, anfibólios e biotita) dos granitos alcalinos dos domínios RPS e SJC, a partir das análises quantitativas (WDS) compiladas obtidas via microsonda eletrônica (vide referências na Tab. I-1 para condições analíticas). Análises químicas disponíveis para alguns minerais acessórios (e.g., granada, titanita, epídoto, magnetita) não são discutidas neste trabalho, embora tenham sido compiladas e eventualmente tratadas para embasar discussões e interpretações.

A fórmula estrutural dos piroxênios e a partição $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ foram calculadas na base de 4 cátions totais e 6 oxigênios, de acordo com o método de Droop (1987). Os anfibólios foram classificados segundo as novas recomendações da IMA (cf. Hawthorne et al., 2012). Contudo, optou-se por calcular a partição $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ pelo método de Schumacher (1997), adotando-se as estimativas máximas de Fe^{3+} (Gualda e Vlach, 2005). Para a biotita, a fórmula estrutural foi computada na base de 22 oxigênios, assumindo-se todo ferro presente como Fe^{2+} (Dymek, 1983). Nos feldspatos, as proporções catiônicas foram calculadas na base de 32 oxigênios, considerando $\text{Fe}_{\text{total}} = \text{Fe}^{3+}$ (Deer et al., 2013).

Após a etapa de compilação e tratamento, os dados químicos foram utilizados para estimar parâmetros intensivos de cristalização (P , T , $f\text{O}_2$) para os granitos alcalinos dos domínios RPS e SJC. Os resultados e discussões são apresentados no capítulo VII na forma de um artigo científico no corpo desta dissertação. A Tabela I-2 lista os geotermômetros e geobarômetros utilizados para as estimativas. Para os geobarômetros baseados no conteúdo de Al em anfibólio, foram consideradas apenas análises com valores da razão $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ entre 0,4–0,65, conforme Anderson e Smith (1995). O geobarômetro de Yang (2017) estima a pressão de colocação de magmas graníticos a partir de equações polinomiais baseadas nos conteúdos normativos de quartzo (Qz), albita (Ab) e ortoclásio (Or). Este geobarômetro ainda carece de calibrações e testes mais robustos. Por exemplo, Dou et al. (2018) propõem uma série de cuidados que devem ser tomados ao se utilizar tal geobarômetro. Adicionalmente a essas sugestões, nossos testes mostraram resultados mais robustos e de melhor significado geológico ao se usar as quantidades normativas de Qz, Ab e Or corrigidas pelos conteúdos de anortita (An) normativa, de acordo com a proposta de Blundy e Cashman (2001).

Estimativas de temperatura baseadas nos teores de Zr em titanita foram obtidas com o geotermômetro Zr-em-titanita de Hayden et al. (2008). Tal geotermômetro considera a $a\text{SiO}_2$ e $a\text{TiO}_2$ no momento da cristalização da titanita. Dada a natureza supersaturada das rochas investigadas (e conseqüentemente a presença de quartzo), a $a\text{SiO}_2$ foi fixada em 1,0. Já para $a\text{TiO}_2$, adotou-se um valor estimado de 0,7, de acordo com Clairbone et al. (2010).

Temperaturas magmáticas de *liquidus*, *solidus* e de cristalização de clinopiroxênio, anfibólio, biotita e zircão foram também obtidas através de múltiplas simulações de cristalização com o programa *rhyolite-MELTS* (Gualda et al., 2012). O programa calcula a assembleia mineral cristalizada, a composição do líquido em equilíbrio e uma série de variáveis termodinâmicas para cada intervalo de temperatura pré-definido, a partir da $T_{liquidus}$. As simulações foram feitas com pressão constante, estimadas a partir dos geobarômetros listados na Tabela I-2, em intervalos de 5 °C a partir da $T_{liquidus}$. Duas amostras de cada plúton foram modeladas. Dada a semelhança petrográfica e química dos plútons Caxexa, Serra do Algodão, Boqueirão e Olho D'Água, optou-se por modelar apenas amostras do Plúton Caxexa. Um mínimo de H₂O de 4,0% foi considerado nos cálculos para os plútons portando anfibólio e/ou biotita (cf., Naney, 1983; Dall'Agnol et al., 1999; Klimm et al., 2003; Bogaerts et al., 2006). Para o plúton Caxexa, um teor mínimo de 2,5% de H₂O foi estimado de acordo com Holtz et al. (2001).

Os modelamentos das temperaturas de cristalização de zircão com o *rhyolite-MELTS* foram baseados nos trabalhos de Moecher et al. (2014) e Burk (2017). Para cada intervalo de 5°C calculou-se o parâmetro catiônico M [(Na+K+2Ca)/(Al*Si); Watson e Harrison, 1983; Miller et al., 2003] a partir das composições modeladas do líquido em equilíbrio (*melt*). Com os valores de M pode-se predizer as temperaturas de saturação em zircão (T_{satZr}) para cada 5°C do intervalo de cristalização usando a relação (Watson e Harrison, 1983):

$$Zr_{M,T} = 496000 \exp\{[3.8 + (0.85 * (M - 1))] - 12900/T(K)\}.$$

As concentrações de Zr foram calculadas usando a equação:

$$Zr_{M,T} = C_0/F,$$

onde C_0 corresponde ao conteúdo de Zr (ppm) em rocha total e F é a fração de líquido (*melt*) remanescente a cada temperatura. Os modelamentos assumem que o Zr é incompatível em outras fases minerais até que a saturação em zircão seja alcançada. Desta forma, a temperatura na qual o zircão inicia sua cristalização é atingida quando $Zr_{M,T} = Zr_{líquido(melt)}$.

Tabela I-1. Plútons alcalinos dos Domínios Rio Piranhas-Seridó, São José do Campestre e Zona Transversal com as respectivas idades, referências, litologias principais e número de análises de litoquímica e química mineral. Legenda – Ma: milhões de anos, af: feldspato alcalino, hbl: hornblenda, bt: biotita, fels: feldspato, pl: plagioclásio, cpx: clinopiroxênio, ep: epídoto, ttn: titanita, qz: quartzo, grt: granada, Na-cpx: clinopiroxênio sódico, Na-anf: anfibólio sódico.

Contexto Geotectônico	Plúton	Idade	Referências	Litologia predominante ^(a)	Litoquímica (nº análises)	Química Mineral (nº análises)
Domínio Rio Piranhas-Seridó	Serra Negra do Norte	547±47 Ma	Campos (1997); Campos et al. (2000)	hbl-bt sieno-monzogranitos, álcali-fels granitos	29	Af(18); pl(25); anf(17); bt(11); cpx(3); ep(9)
	Flores	553 ± 11 Ma	Maia et al. (2006); Galindo et al. (2012); Souza et al. (2016)	bt monzogranitos	15	pl(4); bt(4)
Domínio São José do Campestre	Japi	599± 3 Ma	Hollanda (1998); Hollanda et al. (1999); Souza et al. (2016)	hbl-cpx sieno-monzogranitos	19	Af(1); pl(1); anf(3); cpx(2)
	Caxexa	578 ± 14 Ma	Nascimento (2000); Nascimento et al. (2003)	cpx-álcali-fels granitos	21	Af(19); cpx(25); grt(8); ttn(5)
	S.Algodão/Boqueirão/Olho d'Água	529 ± 54 Ma	Nascimento et al. (1998); Nascimento et al. (2010)	cpx-álcali-fels granitos e sienitos, qz-álcali-fels sienitos	15	Af(25); pl(4); cpx(9); grt(4)
Complexo Serrinha-Pedro Velho	Solânea/Cabeçudo ^(b)	572 ± 8 Ma	Nascimento (2000); Guimarães et al. (2009); Lima et al. (2016)	bt-hbl sieno-monzogranitos	5	af(14); bt(11)
DOMÍNIO ZONA TRANSVERSAL ^(c) :						
Terreno Alto Pajeú	Queimadas	570 ± 24 Ma	Almeida et al. (2002); Guimarães et al. (2004)	bt-hbl monzogranitos	6	pl(8); anf(6); bt(6)
	Pilõezinhos	566 ± 3 Ma	Lima et al. (2016, 2017)	bt-hbl sieno-monzogranitos	6	pl(5); anf(8); bt (8)
	Solidão	630 ± 6 Ma	Guimarães et al. (2004); Melo (2004); Guimarães et al. 2013	cpx-hbl monzogranitos a granodioritos	2	-
	Serra Branca	575 ± 14 Ma	Guimarães et al. (2004); Melo (2004)	bt granodioritos a monzogranitos	2	pl(7); bt(9)

^{a)} usada na comparação. Vários desses corpos possuem fácies subordinadas com rochas monzoníticas, monzodioríticas e dioríticas; ^{b)} Esses granitos, embora inseridos no DRN, são cogenéticos e mostram maior similaridade com granitos intrusivos no APT. Foram portanto, agrupados com os granitoides do DZT para efeitos de comparação; ^{c)} dados compilados para comparação regional preliminar

Tabela I-1. continuação

Contexto Geotectônico	Plúton	Idade	Referências	Litologia predominante ^(a)	Litoquímica (nº análises)	Química Mineral (nº análises)
Terreno Alto Pajeú	Serra do Velho Zuza	538 ± 23 Ma	Guimarães et al. (2004); Melo (2004)	bt sienogranitos	2	-
	Pereiro	543 ± 7 Ma	Guimarães et al. (2004); Melo (2004)	bt sienogranitos	2	-
	Açude Caroá	-	Guimarães et al. (2004); Melo (2004)	hbl-bt granodioritos a quartzo-dioritos	2	anf(4)
	Serra do Boqueirão	-	Guimarães et al. (2004); Melo (2004)	hbl-bt granodioritos	1	anf(5)
	Pocinhos	592 ± 5 Ma*	Sampaio (2005), *Archanjo e Fetter (2004)	hbl-bt sienogranitos	3	pl(16); anf(5); bt(16)
Terreno Alto Moxotó	Bravo	581 ± 2 Ma	Lages et al. (2016)	bt monzo-sienogranitos	8	pl(11); anf(8)
	Prata	512 ± 30 Ma	Guimarães et al. (2004, 2005)	hbl-bt sieno-monzogranitos	4	-
	Serra da Engabelada	512 ± 30 Ma	Guimarães et al. (2005)	bt sienogranitos	1	-
	Serra da Barra	560 ± 5 Ma	Santos (2012); Santos (2013)	bt sieno- a monzogranitos	9	-
Terreno Piancó-Alto Brígida	Catingueira	573 ± 14 Ma*	Ferreira e Sial (1986); Sial (1986); Galindo e Sá (2000); *Souza et al (2017)	bt ± Na-cpx ± Na-anf álcali-fels granitos	16	cpx(4)
	Campo Grande (dique)	-	Ferreira e Sial (1986)	Na-cpx quartzo álcali-fels sienitos a granitos	1	-
	Serra dos Macacos (dique)	-	Ferreira e Sial (1986)	Na-cpx quartzo álcali-fels sienitos a granitos	4	-
	Santo Antônio/Minador (dique)	-	Ferreira e Sial (1986)	Na-cpx quartzo álcali-fels sienitos a granitos	4	anf(4); cpx(3)
	Urtiga (dique)	-	Sial e Ferreira (1988)	Na-cpx quartzo álcali-fels sienitos a granitos	1	-

Tabela I-2. Geobarômetros e geotermômetros utilizados para os plútons em estudo (Serra Negra do Norte, Japi, Flores, Caxexa, Serra do Algodão, Serra do Boqueirão e Olho D'Água). *Temperaturas modeladas de saturação dos minerais.

GEOBARÔMETROS	Abreviações	SNN	Flores	Japi	Cx, SA, SB e OD
Yang (2017) - Qz-Ab-Or normativo	Yang2017	✓	✓	✓	✓
Hammarstrom e Zen (1986) - Al-em-hornblenda	HZ1986	✓		✓	
Johnson e Rutherford (1989) - Al-em-hornblenda	JR1989	✓		✓	
Schmidt (1992) - Al-em-hornblenda	S1992	✓			
Mutch et al (2016) - Al-em-hornblenda	M2016	✓		✓	
Putirka (2008) - clinopiroxênio-líquido	P2008				✓
GEOTERMÔMETROS					
Watson e Harrison (1983) - saturação em zircão	Tsat_{zr}	✓	✓	✓	✓
Gualda et al. (2012) - Rhyolite-MELTS <i>liquidus</i>	T_{liquidus}	✓	✓	✓	✓
Gualda et al. (2012) - Rhyolite-MELTS cristalização de zircão*	T_{zr Melts}	✓	✓	✓	✓
Gualda et al (2012) - Rhyolite-MELTS cristalização de biotita*	T_{Bt Melts}	✓	✓		
Gualda et al (2012) - Rhyolite-MELTS cristalização de clinopiroxênio*	T_{Cpx Melts}	✓		✓	✓
Gualda et al (2012) - Rhyolite-MELTS cristalização de anfibólio*	T_{Hbl Melts}			✓	
Gualda et al. (2012) - Rhyolite-MELTS <i>solidus</i>	T_{solidus}	✓	✓	✓	✓
Harrison e Watson (1984) - saturação em apatita	TSat_{ap}	✓	✓	✓	✓
Putirka (2008) - clinopiroxênio-líquido	TCpx P08	✓			✓
Ridolfi et al (2010) - cristalização de anfibólio	THbl R2010	✓		✓	
Hayden et al (2008) - Zr-em-titanita	TZr_{ttn}				✓
Qz-Ab-Or normativo (sistema haplogranítico)	T Qz-Ab-Or	✓	✓	✓	✓

CAPÍTULO II. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

II.1 Província Borborema

A Província Borborema, definida por Almeida et al. (1977, 1981), constitui uma unidade geotectônica com uma área de aproximadamente 500.000 km², formada como resultado da convergência dos crátons do Amazonas, Oeste Africano-São Luís e São Francisco-Congo, durante a amalgamação do supercontinente Gondwana Oeste em ~600 Ma (cf. Guimarães et al., 2009 e referências citadas). Está localizada no nordeste brasileiro, limitada a sul pelo Cráton do São Francisco e uma parte da bacia Tucano-Jatobá. A norte e leste é coberta por sedimentos de bacias costeiras mesozoicas do Nordeste brasileiro (Bacias Potiguar, Pernambuco-Paraíba e Sergipe-Alagoas) e a oeste pelos sedimentos fanerozoicos da Bacia do Parnaíba. Compõe-se essencialmente por um embasamento de idade arqueana a paleoproterozoica, metassupracrustais e um intenso e variado magmatismo neoproterozoico.

A província é compartimentada em diversos domínios tectonoestratigráficos e terrenos delimitados por falhas ou zonas de cisalhamento (Fig. II-1). A partir dos trabalhos pioneiros de Brito Neves (1975), Almeida et al. (1976) e Santos e Brito Neves (1984), diversos modelos e propostas foram apresentados neste sentido. Delgado et al. (2003) fizeram a integração de modelos e propostas prévias e propuseram a separação da província em três segmentos tectônicos fundamentais: (1) Subprovíncia Setentrional; (2) Zona Transversal e (3) Externa ou Meridional. Dentre esses três segmentos tectônicos são reconhecidos nove domínios tectônicos com base em dados litoestratigráficos, estruturais, geocronológicos e isotópicos (Jardim de Sá, 1994; Jardim de Sá et al., 1992; Brito Neves et al., 2000; Medeiros, 2004; Van Schmus et al., 1995, 2003, 2008, 2011; Santos, 1996; 1999; Santos e Medeiros, 1999; Santos et al., 2000, 2010): Domínios (1) Médio Coreaú, (2) Ceará Central, (3) Jaguaribeano, (4) Rio Piranhas-Seridó, e (5) São José do Campestre na Subprovíncia Setentrional; (6) Zona Transversal; e (7) Riacho do Pontal, (8) Pernambuco-Alagoas e (9) Sergipano na Subprovíncia Externa ou Meridional.

Os plútons graníticos estudados nesta dissertação se inserem no contexto da Subprovíncia Setentrional, sendo intrusivos em rochas dos Domínios São José do Campestre e Rio Piranhas-Seridó, os quais serão detalhados a seguir.

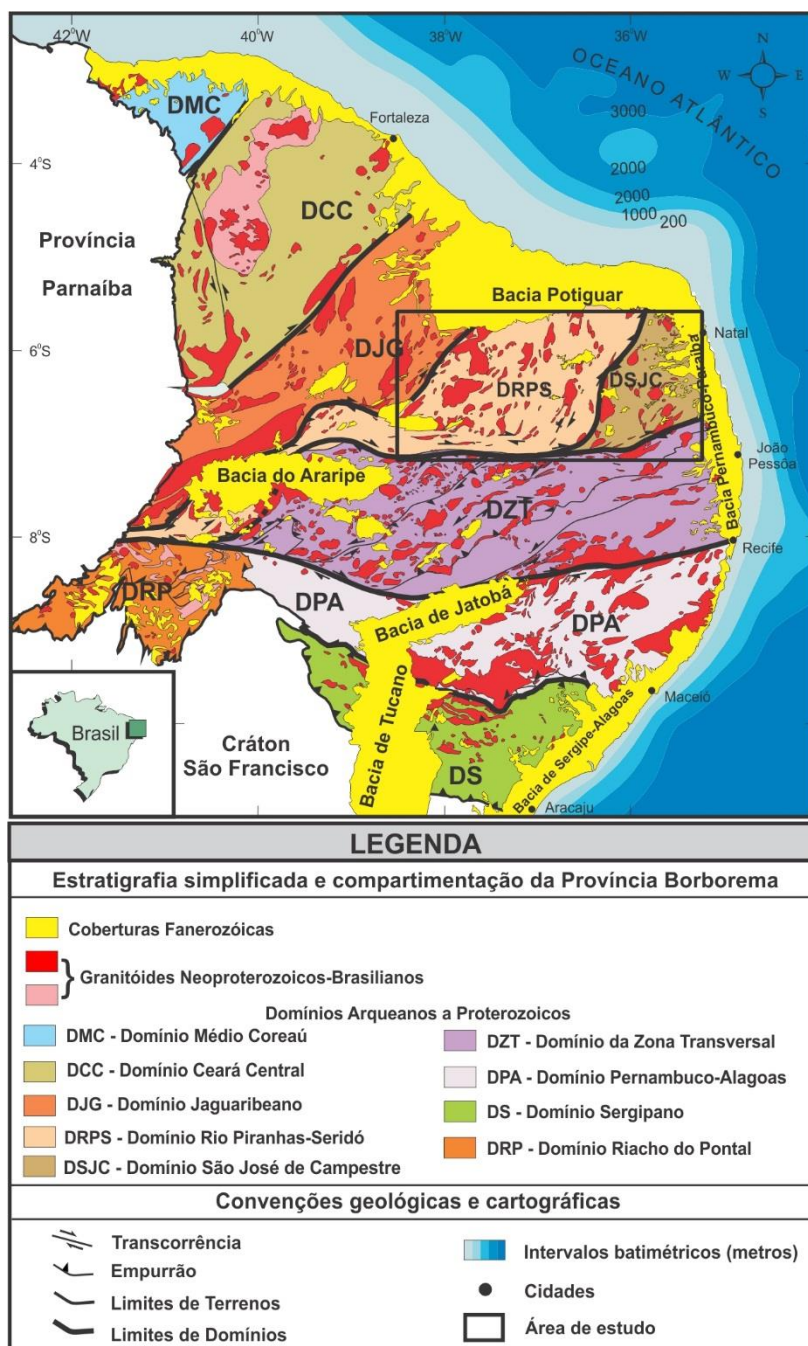


Figura II-1. Compartimentação dos Domínios da Província Borborema e bacias adjacentes. O polígono marca a região onde estão localizados os plútons da área de estudo, vistos em detalhe na figura II-2. Fonte: adaptado de Medeiros (2004).

II.1.1 Domínio Rio Piranhas-Seridó

O Domínio Rio Piranhas-Seridó (DRPS) é delimitado a oeste pela Zona de Cisalhamento Portalegre, que o separa do Domínio Jaguaribeano, e a leste pela Zona de Cisalhamento Picuí-João Câmara, que o separa do Domínio São José do Campestre (Fig. II-2). O embasamento do DRPS inclui metavulcanossedimentares, ortognaisses e migmatitos riacianos do Complexo Caicó, com idades entre 2,1 – 2,25 Ga (Hackspacher et al., 1990; Legrand et al., 1991; Jardim de Sá, 1994; Souza et al., 2007; 2016) e ortognaisses e migmatitos siderianos do Complexo Arábia, com idades em torno de 2,46 Ga (Costa e Dantas, 2014; Costa et al., 2015). Este embasamento é sobreposto por rochas metassupracrustais ediacaranas do Grupo Seridó, constituído da base para o topo pelas formações Jucurutu (paragnaisses, mármore, calciossilicáticas e BIFs), Equador (quartzitos e metaconglomerados) e Seridó (mica xistos) (Jardim de Sá e Salim, 1980; Jardim de Sá, 1994; Van Schmus et al., 2003; Hollanda et al., 2015).

II.1.2 Domínio São José do Campestre

O Domínio São José do Campestre (DSJC) é delimitado a oeste pela Zona de Cisalhamento Picuí-João Câmara (Fig. II-2). É formado por um núcleo de rochas de idade paleo-neoarqueanas (metatonalito Bom Jesus – 3,4 Ga, Complexos Presidente Juscelino, Brejinho e Senador Elói de Souza), circundado por gnaisses paleoproterozoicos (Complexos João Câmara, Santa Cruz e Serrinha-Pedro Velho). As rochas arqueanas correspondem principalmente a ortognaisses e migmatitos de afinidade TTG (Dantas, 1997; Dantas et al. 2004; 2013; Souza et al., 2016). Litotipos do Grupo Seridó também ocorrem de forma subordinada.

II.1.3 O Magmatismo ediacarano-cambriano

O magmatismo ediacarano-cambriano (635 – 541 ± 1 Ma) é uma importante feição geológica dos DRPS e DSJC, sendo representado por diversos *stocks*, batólitos e diques. Nascimento et al. (2015) agruparam estas rochas, com base em critérios petrográficos, litoquímicos e geocronológicos, em seis suítes denominadas: (1) shoshonítica, (2) cálcio-alcalina de alto K porfírica, (3) cálcio-alcalina de alto K equigranular, (4) cálcio-alcalina, (5) alcalina e (6) alcalina Charnoquítica. Dessas, a mais representativa em termos de volume e área aflorante é a suíte cálcio-alcalina de

alto K porfírica, que engloba essencialmente hornblenda-biotita granitos porfíricos em intrusões de dimensões batolíticas (e.g., Campos et al., 2016).

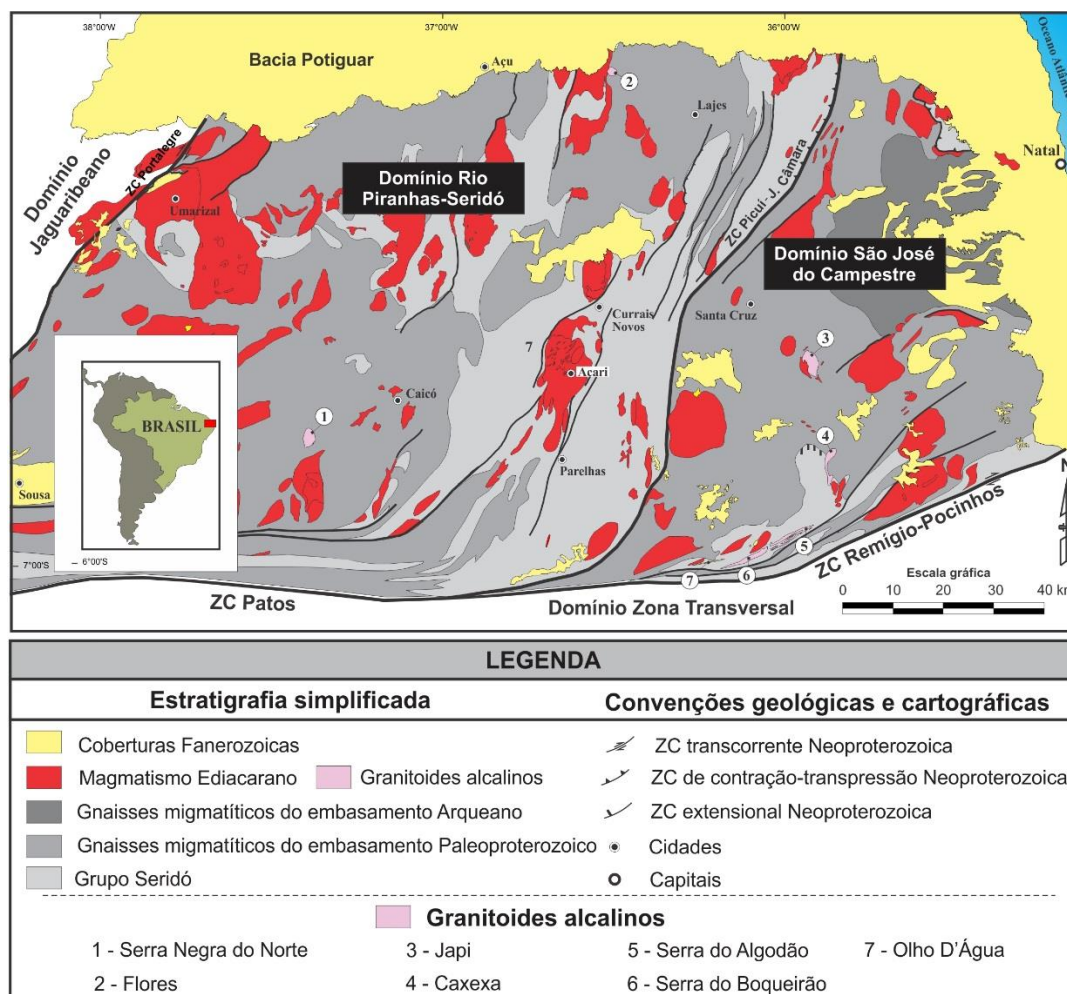


Figura II-2. Esboço geológico dos Domínios Rio Piranhas-Seridó e São José do Campestre, Subprovíncia Setentrional, NE da Província Borborema, com ênfase no magmatismo ediacarano (corpos em vermelho e rosa). Os granitoides alcalinos, foco do estudo, aparecem em rosa e são identificados pelos números de 1 a 7. ZC: Zona de cisalhamento. Fonte: Modificado de Nascimento et al. (2015).

Os plútons graníticos estudados nesta dissertação (Serra Negra do Norte, Flores, Japi, Caxexa, Serra do Algodão, Serra do Boqueirão e Olho D'Água) correspondem à suíte alcalina nos DRPS e DSJC. A seguir, apresenta-se um resumo das principais características desta suíte. Um maior detalhamento de seus aspectos petrográficos, litoquímicos e de química mineral serão apresentados nos capítulos IV, V e VI, respectivamente.

II.1.3.1 Suíte Alcalina

Conforme definida por Nascimento et al. (2015), a suíte alcalina engloba os corpos Caxexa, Japi, fácies alcalina do plúton Japi, Serra do Algodão, Serra do Boqueirão, Olho D'Água e Serra Negra do Norte. Recentemente, Souza (2016) e Souza et al. (2017) reconheceram assinaturas de tipo-A para o *stock* Flores, anteriormente inserido na suíte cálcio-alcalina de alto K equigranular. Por esta razão, esta dissertação o incorpora à suíte alcalina.

Esta suíte é composta, de forma geral, por álcali-feldspato granitos, quartzo álcali-feldspato sienitos, sienogranitos e monzogranitos. São rochas de textura fina a média, equigranulares, às vezes com camadas magmáticas ainda preservadas. A depender do plúton, os principais minerais máficos variam de egrina-augita/augita sódica e hedenbergita, a hornblenda e biotita. Granada do tipo andradita é um máfico acessório importante nos plútons Caxexa, Serra do Algodão e Serra do Boqueirão. O plagioclásio é geralmente albita (An_{0-10}), sendo relativamente mais rico em cálcio ($An > 5$) quando associado à granada (Nascimento et al., 1998). Os feldspatos que ocorrem são ortoclásio e microclínio. Os acessórios mais comuns são titanita, apatita, zircão, allanita, magnetita e ilmenita.

II.1.4. Domínio da Zona Transversal

Diversos corpos de granitos de tipo-A contemporâneos à suíte alcalina são também intrusivos em rochas do Domínio da Zona Transversal (DZT, Tabela I-1). Uma comparação química preliminar entre as ocorrências do DZT e a suíte alcalina nos DRPS e DSJC é apresentada nos capítulos V e VI.

O DZT (Fig. II-3) é um segmento crustal de direção E-W limitado a norte e oeste pelo Lineamento Patos, a sul pelo Lineamento Pernambuco e a leste por bacias costeiras. O DZT engloba os terrenos São José do Caiano, Piancó-Alto Brígida, Alto Pajeú, Alto Moxotó e Rio Capibaribe, limitados por zonas de cisalhamento (Santos, 1996; 1999; Santos e Medeiros, 1999; Brito Neves et al., 2000; Medeiros, 2004; Santos et al., 2010; Van Schmus et al., 2011). O magmatismo de tipo-A tem maior importância nos terrenos Piancó-Alto Brígida, Alto Moxotó e Alto Pajeú (e.g., Guimarães et al., 2004, 2005).

O Terreno Piancó-Alto Brígida situa-se na adjacência sul do Lineamento Patos, entre os terrenos São José do Caiano e Alto Pajeú. É formado por rochas

metassedimentares e metavulcânicas intrudidas por plutônicas neoproterozoicas (Silva-Filho et al., 1985; Medeiros, 1995; 2004; Medeiros e Sá, 2009). Neste terreno o magmatismo de tipo-A é representado principalmente pelo plúton Catingueira, corpos satélites e diques (cf., Tab. I.1). Os litotipos variam entre álcali-feldspato granitos e sienitos de afinidade peralcalina, com clinopiroxênios cálcico-sódicos e anfibólios sódicos como máficos principais (Ferreira e Sial, 1986; Sial e Ferreira, 1988; Galindo e Sá, 2000; Cunha, 2018).

O Terreno Alto Pajeú é limitado ao norte pelo Lineamento Patos e ao sul pela zona de cisalhamento São José dos Cordeiros. É composto por sequências tonianas/Cariris Velhos (~1,0 Ga), metagranitoides estaterianos, supracrustais e granitoides neoproterozoicos (Santos 1995; Brito Neves et al., 2000; Cavalcante et al. 2016). Por sua vez, o Terreno Alto Moxotó localiza-se abaixo do Terreno Alto Pajeú, sendo, portanto, limitado a norte pela zona de cisalhamento São José dos Cordeiros. É constituído por gnaisses e migmatitos riacianos, sequências orosinianas, metagranitoides estaterianos, rochas gabro-anortosíticas e plutônicas neoproterozoicas (Santos e Medeiros, 1999; Brito Neves et al., 2000; Lages e Marinho, 2012; Brito Neves et al. 2015, Cavalcante et al., 2016). Granitoides com assinatura tipo-A nos terrenos Alto Pajeú e Alto Moxotó incluem principalmente sieno- e monzogranitos e granodioritos metaluminosos a levemente peraluminosos, com biotita e hornblenda como máficos principais (cf., Tab. I.1).

Recentemente, Brito Neves et al. (2016) propuseram a existência de um arco magmático eoediacarano (ca. 635–580 Ma) na porção norte da ZT para explicar o intenso magmatismo nesta região, principalmente de caráter cálcio-alcálico de alto K (“tipo Itaporanga”), mas também incluindo o magmatismo de tipo-A.

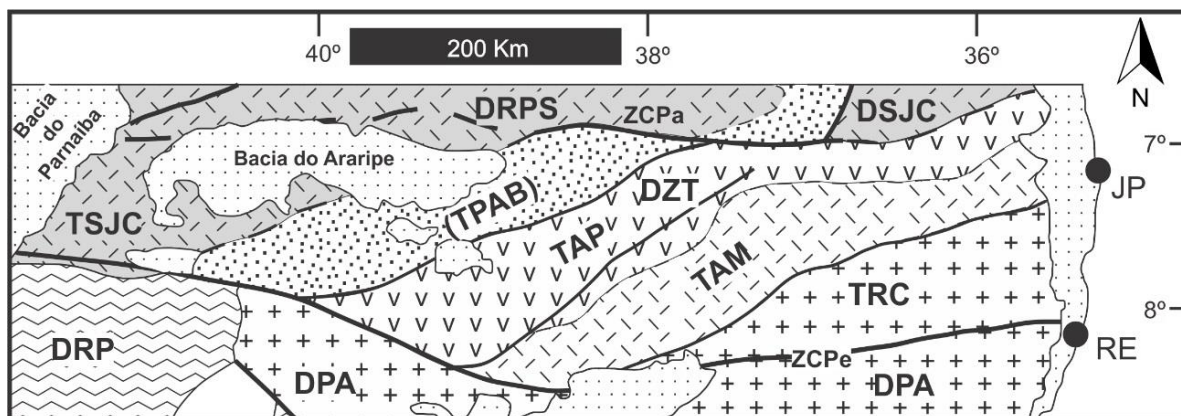


Figura II-3. Terrenos do Domínio Zona Transversal segundo Van Schmus et al. (2011). DRPS = Domínio Rio Piranhas-Seridó; DSJC = Domínio São José do Campestre; TSJC = Terreno São José do Caiano; DZT = Domínio Zona Transversal; DPA = Domínio Pernambuco-Alagoas; DRP = Domínio Riacho do Pontal; TPAB = Terreno Piancó-Alto Brígida; TAP = Terreno Alto Pajeú; TAM = Terreno Alto Moxotó; TRC = Terreno Rio Capibaribe. Falhas e zonas de cisalhamento: ZCPa = Zona de Cisalhamento Patos; ZCPe = Zona de Cisalhamento Pernambuco. Cidades: JP = João Pessoa; RE = Recife. Fonte: Retirado de Van Schmus et al. (2011).

CAPÍTULO III. GEOLOGIA DOS CORPOS ESTUDADOS

Apresenta-se a seguir um resumo do contexto geológico local de cada plúton estudado neste trabalho.

III.1 Stock Flores

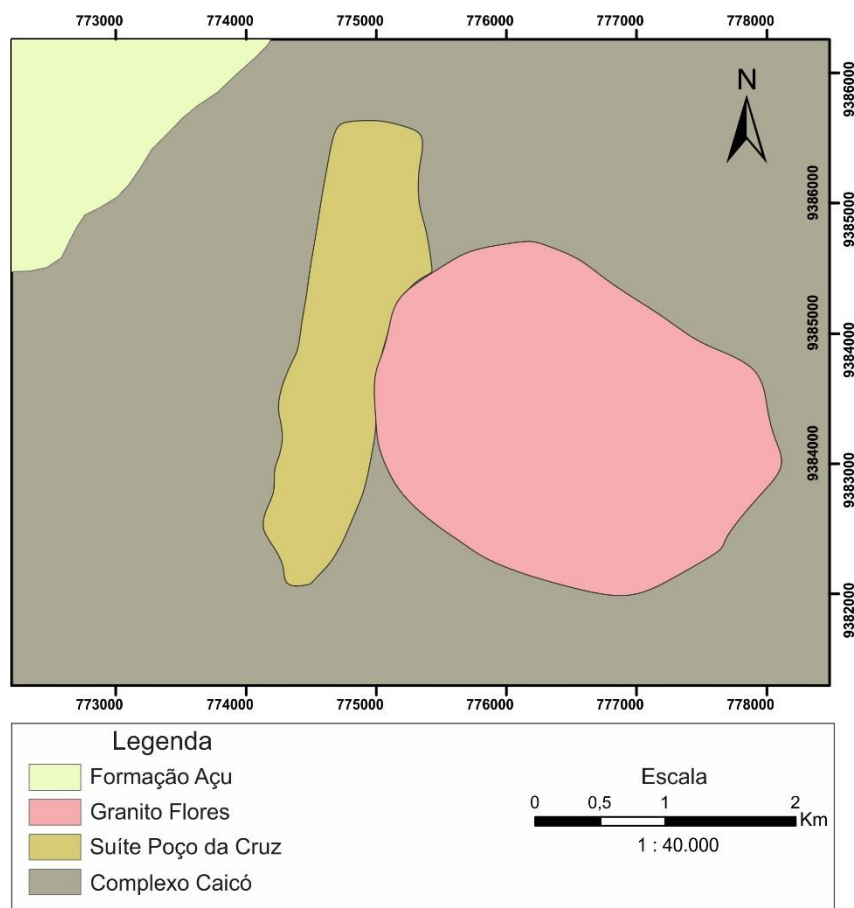


Figura III-1. Mapa geológico simplificado do Stock Flores.

O Stock granítico Flores (Maia, 2004; Maia et al., 2006; Souza, 2016; Souza et al., 2017) está localizado na porção centro-norte do DRPS. Trata-se de um corpo subcircular levemente alongado na direção NW, com $\sim 8 \text{ km}^2$ de área aflorante (Fig. III-1). É petrograficamente homogêneo, composto por rochas graníticas de cores cinzentas a rosadas, com texturas equigranulares e granulação fina a média. O corpo é intrusivo em ortognaisses migmatíticos paleoproterozoicos relacionados ao Complexo Caicó, e em *augen* gnaisses da suíte Poço da Cruz em sua borda NW. Os granitos são cortados por diques pegmatíticos de espessuras variáveis e possuem

feições de *mixing* e *mingling* e enclaves do tipo *schlieren* elipsoidais que corroboram com interpretações de estruturas magmáticas formadas por convecção magmática causadas por plumas termais (Souza et al., 2017).

III.2 Plúton Serra Negra do Norte

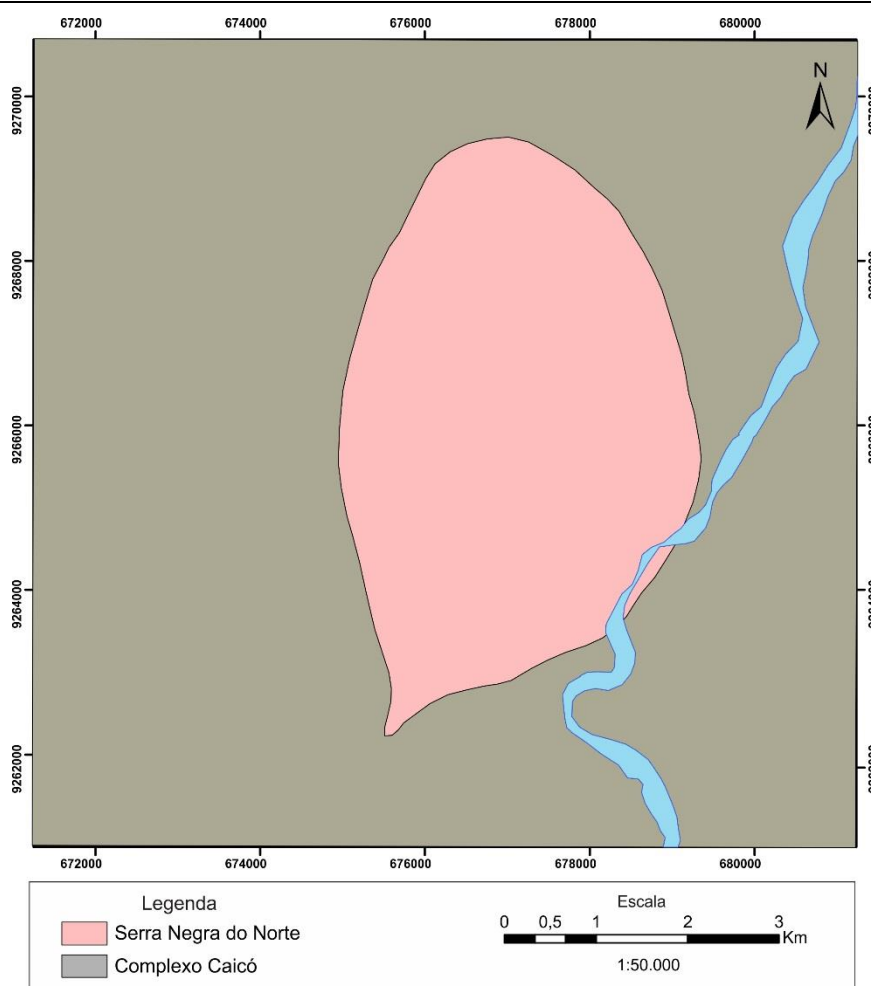


Figura III-2. Mapa geológico simplificado do plúton Serra Negra do Norte intrusivo no embasamento gnáissico migmatítico paleoproterozóico do Complexo Caicó.

O plúton Serra Negra do Norte (Campos, 1997; Campos et al., 2000) está localizado na parte centro-sul do DRPS (Fig. III-2), intrusivo no embasamento gnáissico-migmatítico paleoproterozoico do Complexo Caicó. Possui uma forma levemente elíptica, com eixo maior apontando para o norte, e sua área aflorante é de ~48 km². São estruturas comuns as foliações de fluxo magmático e *schlierens*. Campos (1997) reconheceu três fácies petrográficas: a principal é formada por hornblenda-biotita monzo-sienogranitos (1) que são cortados por monzogranitos róseos com hornblenda (2) e diques micrograníticos (3). Os monzo-sienogranitos

principais contêm enclaves microgranulares félsicos centimétricos de formas ovaladas, cujas dimensões aumentam em direção a borda do corpo. Os enclaves possuem composição semelhante ao granito hospedeiro.

III.3 Plúton Japi

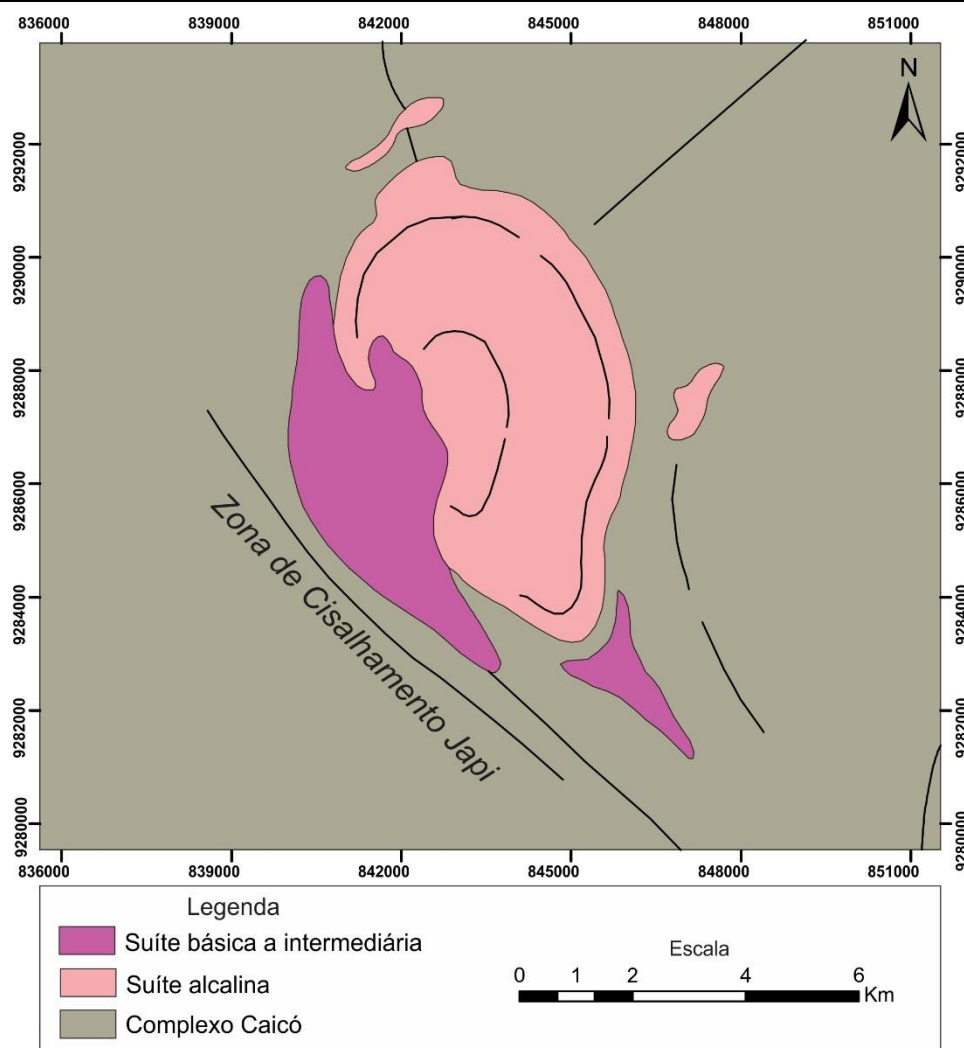


Figura III-3. Mapa geológico simplificado do plúton Japi, com ênfase nas duas suítes principais que o compõem: a suíte alcalina e a básica a intermediária.

O Plúton Japi (Hollanda, 1998; Hollanda et al., 1999) está localizado na porção central do DSJC (Fig. III-3). Trata-se de um corpo elipsoidal em conjunto com *sheets* concêntricos na porção mais a norte, e um *stock* subcircular na porção sul, compreendendo ~60 km² de área aflorante. O plúton está alojado em rochas do Complexo Caicó e sua colocação foi influenciada pela Zona de Cisalhamento Japi, de cinemática transcorrente sinistral (Jardim de Sá et al., 1999). Quatro suítes ígneas

compõem este plúton (Hollanda, 1996): suítes alcalina (principal), básico-intermediária (gabro-norito a granodiorito), de granitos porfiríticos e uma suíte de leucomicrogranitos. As três últimas suítes exibem relações sin a tardi-tectônicas, enquanto a suíte alcalina apresenta características de sintectonismo a um evento tectono-metamórfico regional de idade brasileira (M_3/D_3 ; Holanda et al., 1999; Souza et al., 2006). A suíte alcalina compõe as cristas das serras e a estrutura anelar principal que caracterizam o plúton Japi. As rochas desta suíte estão bem deformadas, em especial junto às bordas da intrusão e correspondem principalmente a sienogranitos e subordinadamente quartzo álcali-feldspato sienitos e quartzo sienitos hololeucocráticos a leucocráticos, com textura equigranular fina. Os máficos principais incluem clinopiroxênios e anfibólios cálcicos.

III.4 Plúton Caxexa

O Plúton Caxexa (Nascimento, 2000; Nascimento et al., 2003) está localizado na parte centro-sul do DSJC, intrusivo na interface milonítica entre os gnaisses migmatíticos do Complexo Caicó e os micaxistos do Grupo Seridó, e sua colocação foi controlada pela Zona de Cisalhamento Remígio-Pocinhos (de cinemática transtraccional dextrogira), ao longo da qual se encontra o corpo (Jardim de Sá et al., 1999; Nascimento et al., 2003). O plúton aflora por ~50 km² e possui forma alongada na direção N-S, com uma inflexão para NE em sua porção norte (Fig. III-4). Em termos petrográficos, compõe-se de rochas graníticas hololeucocráticas, homogêneas, com textura equigranular fina. Feições de acamamento magmático são relativamente comuns. Clinopiroxênios cálcico-sódicos ou cálcicos são os máficos principais. Destaca-se ainda a ocorrência de granada do tipo andradita nas rochas onde o clinopiroxênio é cálcico (e.g., Nascimento, 2000; Nascimento et al., 2003).

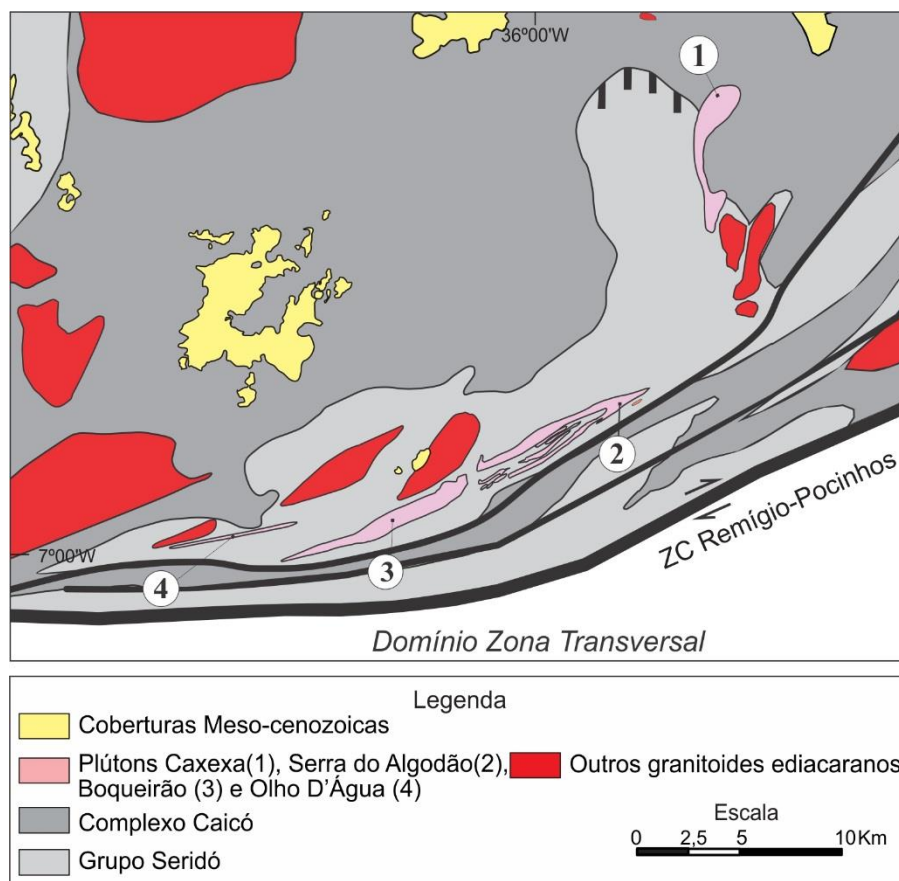


Figura III-4. Mapa geológico simplificado dos plútons Caxexa (1), Serra do Algodão (2), Serra do Boqueirão (3) e Olho D'Água (4). ZC: Zona de cisalhamento. Fonte: Modificado de Nascimento et al. (2015).

III.5 Plútons Serra do Algodão, Serra do Boqueirão e Olho D'Água

Assim como o Plúton Caxexa, os plútons Serra do Algodão, Serra do Boqueirão e Olho D'Água (Nascimento, 1998; Nascimento et al., 2003; Nascimento et al., 2010) encontram-se alojados ao longo da Zona de Cisalhamento Remígio-Pocinhos (Fig. III-4), na porção mais a sul do DSJC, cortando rochas do embasamento gnáissico-migmatítico e micaxistos (Grupo Seridó). São corpos de ~30 km², com formas alongadas na direção NE-SW, paralelas aos cisalhamentos que limitam o setor extensional (a norte) do setor transcorrente (a sul) da Zona de Cisalhamento Remígio-Pocinhos (Jardim de Sá et al., 1999). Os corpos são caracterizados por foliação em alto ângulo contendo lineações com caimento suave e cinemática transcorrente dextral (Trindade et al. 1995; Nascimento et al., 2003). Os litotipos principais são semelhantes ao Plúton Caxexa e incluem álcali-feldspato granitos e quartzo álcali-feldspato sienitos com clinopiroxênios cálcico-sódicos ou cálcicos como máficos principais. Andradita também ocorre nos granitos onde o clinopiroxênio é cálcico.

CAPÍTULO IV. CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA

As semelhanças e contrastes mineralógicos e petrográficos entre os plútons da suíte alcalina nos domínios SJC e RPS serão descritas neste capítulo. Algumas especificidades são apresentadas na Tabela IV.1.

Visto a semelhança de contexto geológico, petrografia, mineralogia e litoquímica entre os plútons Serra do Algodão (SA), Serra do Boqueirão (SB) e Olho D'Água (OD), optou-se por representá-los como um único grupo de amostras (SA, SB e OD). Além disso, estes plútons também foram agrupados com o plúton Caxexa, que possui aspectos petrográficos muito semelhantes. Algumas semelhanças petrográficas também são observadas entre os plútons Serra Negra do Norte e Japi. Já o *stock* Flores apresenta características um pouco mais contrastantes.

Em linhas gerais, os litotipos predominantes são rochas graníticas hololeucocráticas a leucocráticas, com índice de cor (IC) < 13%. No plúton Serra Negra do Norte, amostras com $15 < IC < 18\%$ são descritas localmente (Campos, 1997). Possuem textura predominantemente equigranular com granulação fina a média. Feições estruturais de acamamento magmático são ocasionais (e.g, plúton Caxexa). Os plútons Caxexa, SA, SB e OD são formados essencialmente por álcali-feldspato granitos e quartzo álcali-feldspato sienitos, enquanto sieno- e monzogranitos são as rochas predominantes nos plútons Serra Negra do Norte e *stock* Flores (Fig. IV-1). No plúton Japi, os dados modais disponíveis para sua suíte alcalina apontam para sieno- e monzogranitos. Contudo, Hollanda (1998) argumenta que, dada a composição essencialmente albítica do plagioclásio, os dados normativos de quartzo (Q), feldspato alcalino (A) e plagioclásio (P) refletem com maior precisão a classificação dos litotipos. Esta dissertação segue a sugestão de Hollanda (1998) e utiliza os dados normativos CIPW e posterior cálculo das composições de Qz-Ab-Or para o plúton Japi no diagrama QAP, segundo a proposta de Le Maitre (1976) da Fig. IV-1. O mesmo indica a predominância de sienogranitos, além de quartzo álcali-feldspato sienitos e quartzo sienitos subordinados (Fig. IV-1).

IV. 1 Mineralogia Félsica

A mineralogia félsica essencial nos plútons Caxexa, Japi, SA, SB e OD inclui, além de quartzo, microclínio e albita com teores da molécula An <10 %. No plúton Serra Negra do Norte, o plagioclásio é do tipo albita nas fácies hornblenda-biotita granito (GN) e microgranito (microGr), e varia entre oligoclásio sódico (An < 20%) a albita (An < 10%) na fácies granito róseo com hornblenda (GrN). Já no *stock* Flores, o plagioclásio é tipicamente um oligoclásio sódico, com teores de An entre 12-13%.

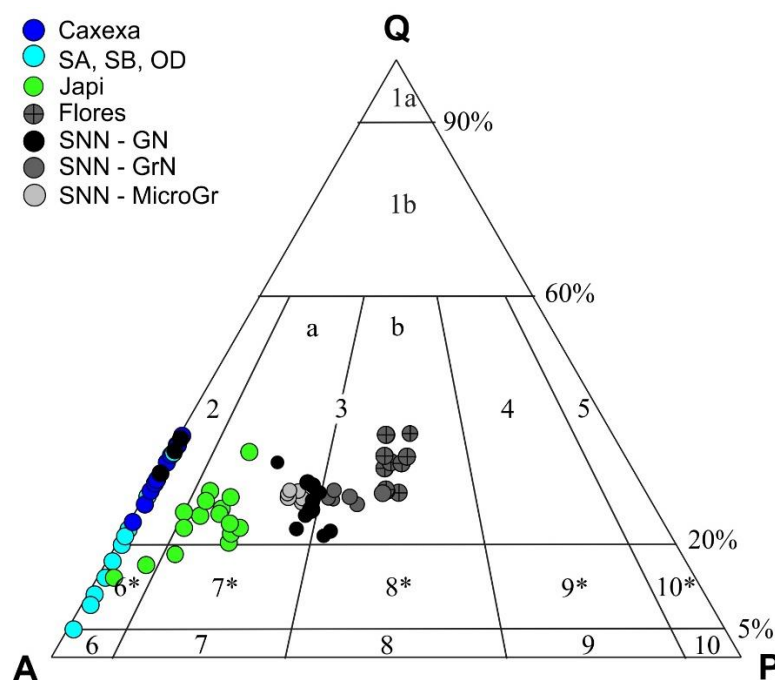


Figura IV-1. Diagrama modal quartzo (Q) – feldspato alcalino (A) – plagioclásio (P) (Streckeisen, 1976) para os plútons da suíte alcalina dos domínios DJSC e DRPS da Província Borborema. Campos onde plotam amostras correspondem a: 2= álcali-feldspato granito; 3a= sienogranito; 3b= monzogranito; 6= álcali-feldspato sienito; 6*= quartzo álcali-feldspato sienito; 7*= quartzo sienito. Legenda: SA: Serra do Algodão; SB: Serra do Boqueirão; OD: Olho D'Água; SNN: Serra Negra do Norte; GN: Hornblenda-biotita granito; GrN: granito róseo com hornblenda; MicroGr: microgranito. Dados modais (e normativos no caso do plúton Japi) compilados das referências listadas na Tabela I.1.

O feldspato potássico (microclínio) apresenta maclas do tipo “tartan”, texturas pertíticas e micropertíticas e localmente do tipo *chessboard* (Flores). Intercrescimentos granofíricos são encontrados no *stock* Flores. Cristais poiquilíticos são eventualmente encontrados no plúton Serra Negra do Norte.

O quartzo ocorre na matriz ou destacado como cristais maiores que podem estar estirados exibindo textura do tipo *ribbon* (plútons SA, SB, OD e Japi) ou recristalizado (mosaico poligonal; plútons Caxexa, Serra Negra do Norte e *stock*

Flores) e exibindo extinção ondulante. Além disso, também ocorre nas formas vermiculares e goticulares associado às texturas mirmequítica e granofírica, a primeira sendo observada no Flores e Serra Negra do Norte; a segunda somente no Flores (Figuras IV-2 e IV-3).

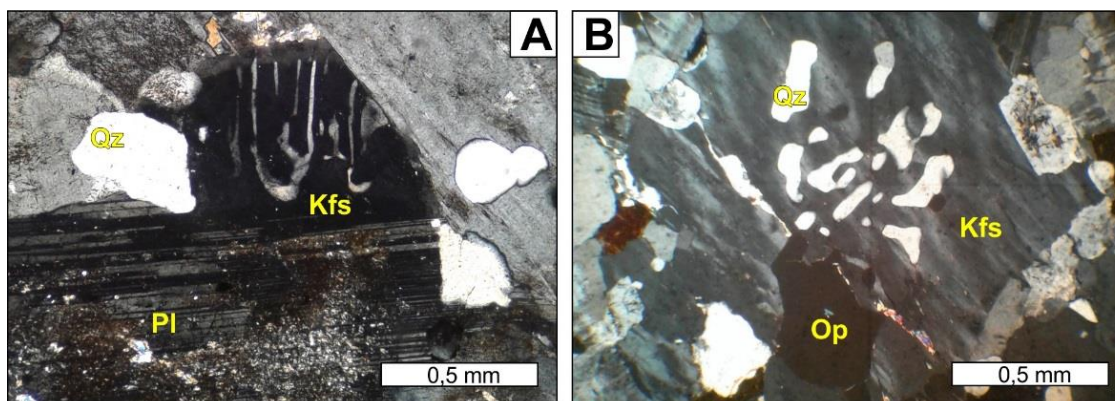


Figura IV-2. Aspectos texturais do plúton Flores ao microscópio petrográfico, destacando a assembleia félsica. A – Textura mirmequítica desenvolvida no contato do K-feldspato (Kfs) com o plagioclásio (Pl) sericitizado. B - K-feldspato (Kfs) mostrando textura granofírica com quartzo (Qz). Notar também grão de mineral opaco (Op). Fotomicrografias obtidas com polarizadores cruzados.

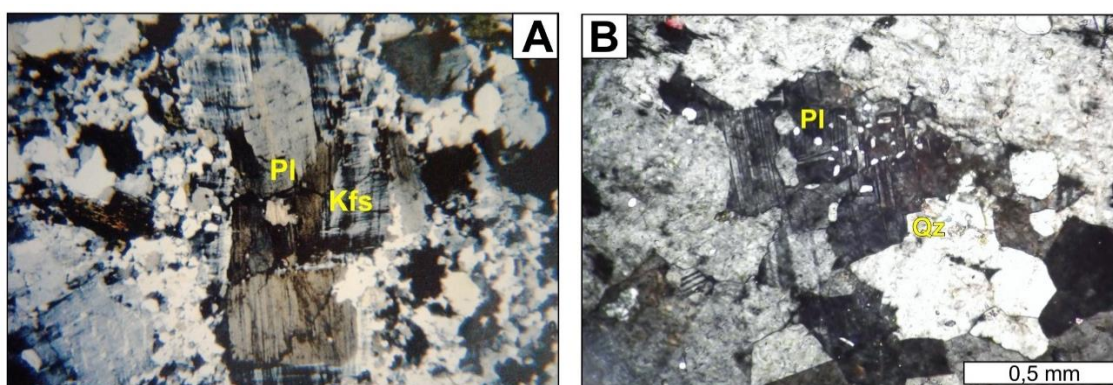


Figura IV-3. Aspectos texturais do plúton Serra Negra do Norte ao microscópio petrográfico, destacando a assembleia félsica. A – Textura do tipo anti-rapakivi com cristal de plagioclásio (Pl) manteado por K-feldspato (Kfs). Ampliação de 10x. Fonte: retirada de Campos (1997). B – Plagioclásio (Pl) com intercrescimento mirmequítico caracterizado por quartzo (Qz) genticular. Notar ainda grãos de quartzo euédricos em contato com plagioclásio. Fotomicrografias obtidas com polarizadores cruzados.

IV.2 Mineralogia máfica

Os plútons alcalinos intrusivos no DSJC (Japi Caxexa, SA, SB e OD) possuem clinopiroxênios cálcicos e sódico-cálcicos como o máfico principal; anfibólio é fase acessória em alguns desses plútons (Japi, SA). Por outro lado, nos corpos alojados em rochas do DRPS, biotita (*stock* Flores e plúton Serra Negra do Norte) e/ou anfibólio (Serra Negra do Norte) são os máficos dominantes, enquanto piroxênio é acessório

apenas no Serra Negra do Norte. A mineralogia máfica e suas texturas são descritas em maior detalhe para cada plúton a seguir.

IV.2.1 Plútons Caxexa, SA, SB e OD

A mineralogia máfica dos plútons Caxexa, SA, SB e OD é composta por clinopiroxênio como máfico principal, além de titanita, opacos, $\pm$ andradita, allanita, zircão, apatita e anfibólio (este último somente no plúton SA).

Nos granitos dos plútons Caxexa, SA, SB e OD, o clinopiroxênio pode ser do tipo hedenbergita ou egirina-augita (cf. cap. VI). A ocorrência de hedenbergita está associada a presença de andradita (Fig. IV-4); quando esta não ocorre, o clinopiroxênio é do tipo egirina-augita. O clinopiroxênio apresenta inclusões de opacos e, raramente de titanita. Carbonato forma-se como produto de alteração pós-magmática. Nos plútons SA ocorre a transformação do clinopiroxênio para actinolita, evidenciada por restos de piroxênio no interior deste mineral e inclusões de opacos resultante da reação.

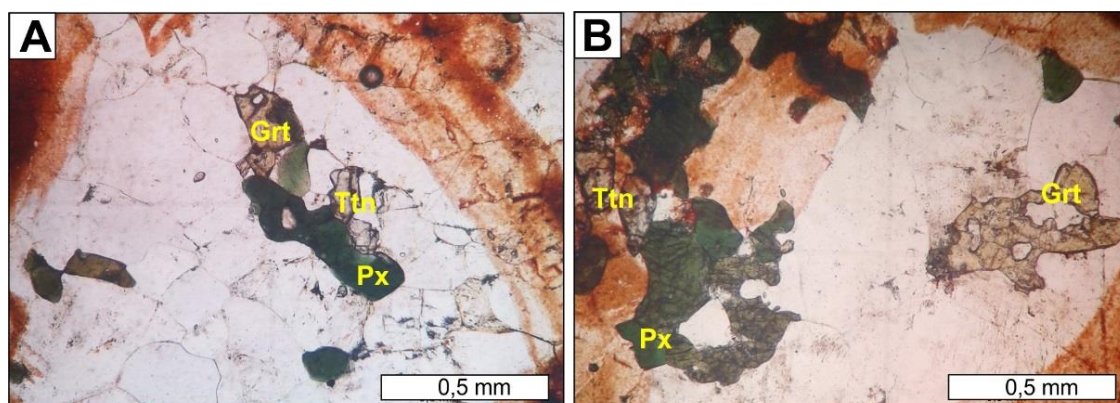


Figura IV-4. Detalhes texturais da mineralogia máfica nos plúton Caxexa. A- Cristais de hedenbergita (Px), andradita (Grt) e titanita (Ttn) formando a paragénese máfica típica deste plúton. B – Cristais de hedenbergita, titanita subédrica e andradita com textura em atol, intersticiais em meio a quartzo e feldspato alcalino. Fotomicrografias em nicóis paralelos. Manchas em vermelho são de marcador permanente.

A andradita, quando presente, pode ocorrer sob duas formas texturais: i) com hábito intersticial ou em atol, não associada a hedenbergita, com inclusões de plagioclásio e quartzo; ii) associada a hedenbergita, com contatos interdigitados ou interlobados, sugerindo algum tipo de reação desta com o clinopiroxênio.

A titanita ocorre na forma euédrica a subédrica, por vezes na forma losangular perfeita. Ocorre inclusa em quartzo e feldspatos. Os minerais opacos são magnetita,

hematita e ilmenita. Esta última aparece bordejada por titanita, evidenciando processo de esfenitização. Zircão e apatita ocorrem como cristais euédricos, inclusos em quartzo, feldspatos e clinopiroxênio. A allanita é rara e normalmente ocorre inclusa nos cristais de quartzo.

IV.2.2 Japi

A mineralogia máfica é composta essencialmente por clinopiroxênio e/ou anfibólio. Titanita, epidoto, biotita, apatita, zircão e opacos são fases acessórias.

O clinopiroxênio é esverdeado, do tipo augita sódica, segundo Hollanda (1998). Ocorre como cristais euédricos a subédricos. É anédrico quando substituído por anfibólio. As principais inclusões são de minerais opacos e plagioclásio.

Quanto aos anfibólios, duas variedades são reconhecidas: hornblenda e hastingsita. A hornblenda aparece como cristais primários, euédricos a subédricos, com inclusões de opacos, titanita, biotita, epidoto, apatita e zircão. Alguns cristais aparecem transformados para clorita em reações pós-magmáticas. A hastingsita aparece tipicamente substituindo o clinopiroxênio.

A titanita ocorre como cristais euédricos. A biotita mostra evidências de transformações hidrotermais/pós-magmáticas, e muitos cristais estão substituídos por clorita, epidoto e finos opacos ao longo dos planos de clivagem. Os opacos ocorrem em duas gerações. Uma primária, representada por cristais euédricos, eventualmente com coroas de titanita (esfenitização); e uma geração secundária, formada a partir de reações hidrotermais de substituição da biotita, clinopiroxênios e anfibólios. Apatita e zircão ocorrem como cristais euédricos alongados, inclusos nas fases máficas principais.

IV.2.3 Stock Flores

A mineralogia máfica deste *stock* é composta por biotita como fase principal, além de titanita, allanita, apatita, zircão, opacos e fluorita.

A biotita (Fig. IV-5) ocorre como placas euédricas a subédricas, muitas já em processo de cloritização (Fig. IV-5B). Minerais opacos e zircão ocorrem como inclusões.

Os minerais opacos primários são euédricos a subédricos, muitos manteados por titanita (Fig. IV-5A). Opacos secundários ocorrem como resultado da alteração hidrotermal da biotita. A titanita apresenta-se na forma euédrica a subédrica, como cristais losangulares. A allanita aparece como cristais zonados, parcial a totalmente metamictizados (Fig IV-5B). A apatita ocorre como pequenos cristais alongados inclusos em quartzo e plagioclásio. O zircão aparece como cristais euédricos a subédricos, prismáticos, geralmente incluso em plagioclásio e biotita. A fluorita ocorre intersticial a quartzo e feldspatos, ou associada à biotita.

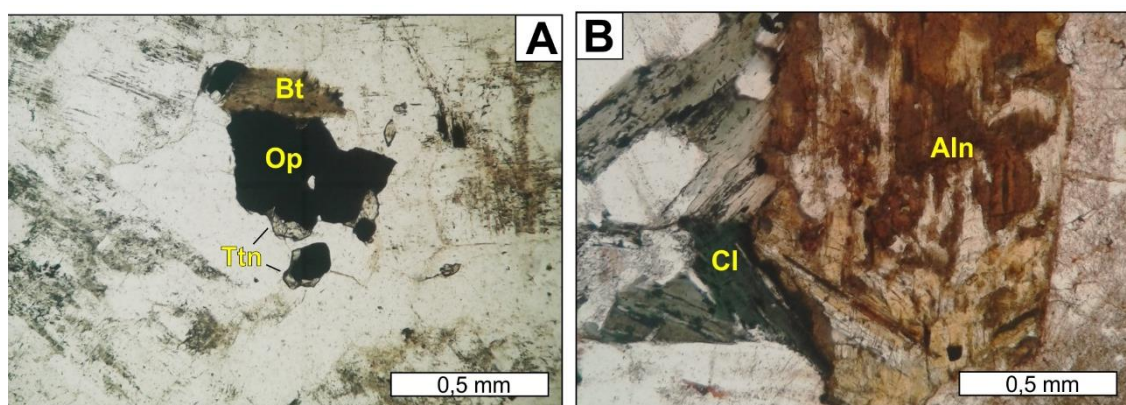


Figura IV-5. Aspectos texturais do stock Flores. A – Detalhe de cristais de biotita (Bt), opacos (op) e titanita (Ttn), estes últimos formados em processo de esfenitização em meio a quartzo e feldspatos. B – Cristal de allanita (Aln) em processo de metamictização ao lado de pseudomorfos de biotita totalmente substituídos por clorita (cl) e finos cristais de opacos. Fotomicrografias em nicóis paralelos.

IV.2.4 Serra Negra do Norte

A mineralogia máfica inclui anfibólio e biotita como fases principais, além de titanita, zircão, apatita, magnetita e raros clinopiroxênio, epidoto primário e allanita.

O anfibólio é mais abundante nas rochas da fácies hornblenda-biotita granito (GN). Aparece em menores quantidades na fácies granito róseo com hornblenda (GrN) e é raro nos microgranitos (microGr). Possui inclusões de zircão, apatita, magnetita, quartzo, plagioclásio e, raramente, de titanita. Na fácies GN, pode apresentar extinção do tipo *patch*, bordas corroídas e muitas inclusões de biotita, apatita, magnetita, quartzo e plagioclásio, conferindo-lhe aspecto poiquilítico.

A biotita ocorre em todas as fácies, especialmente na GN e microGr. Forma placas subédricas, com inclusões ocasionais de apatita, zircão e opacos. Pode aparecer inclusa no anfibólio, mas também intercrescida com o mesmo (Fig. IV-6A e Fig. IV-6B).

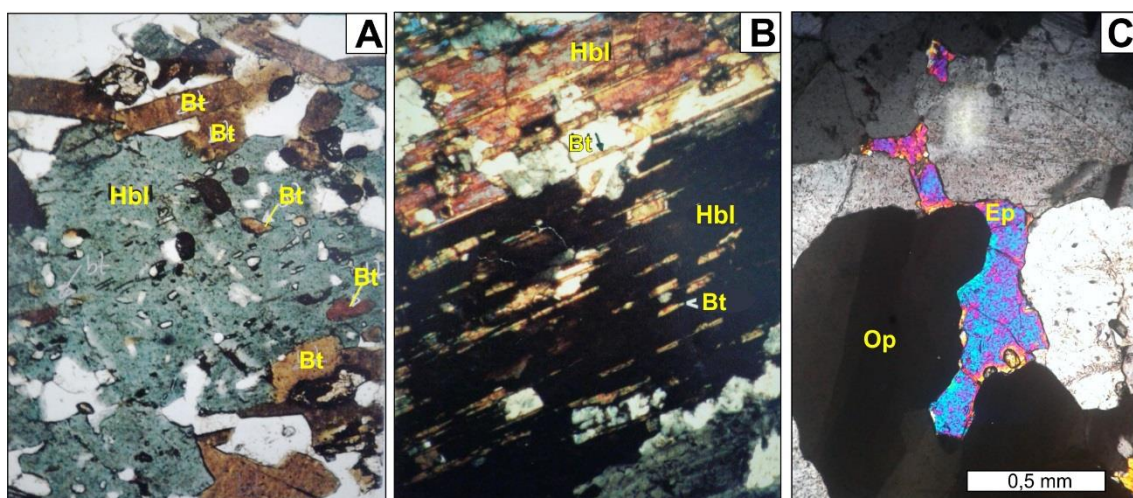


Figura IV-6. Aspectos texturais do plúton Serra Negra do Norte. A – Paragênese máfica composta por hornblenda (Hbl) e biotita (Bt). B- Destaque para o intercrescimento entre hornblenda e biotita e a textura poiquilítica da hornblenda. C – Epidoto (ep) intersticial no contato com mineral opaco (op). Fotomicrografias a nicóis paralelos (A) e cruzados (B e C). Fotomicrografias A e B com ampliação de 75x retiradas de Campos (1997).

O clinopiroxênio é subédrico. Na fácies GN é do tipo diopsídio e ocorre associado à biotita e anfibólio. No microgranito é do tipo augita e forma-se ocasionalmente.

A titanita aparece em todas as fácies, mas principalmente na fácies GN. Forma cristais euédricos ou anédricos e pode estar associada a anfibólio e opacos, ou mais raramente à biotita. Quartzo e magnetita ocorrem como inclusões.

O zircão é idiomórfico e está incluso em quartzo, plagioclásio, hornblenda e biotita. Já a apatita possui formas prismáticas e aciculares, como cristais isolados ou inclusos em anfibólio, quartzo e raramente na titanita.

A allanita forma cristais euédricos a subédricos, parcial a totalmente metamictizados. Aparece por vezes manteada por epidoto. Este, por sua vez, ocorre em pequenas quantidades e é mais abundante na fácies GrN. É euédrico quando associado ou incluso em anfibólio e biotita, ou anédrico como produto da saussuritização do plagioclásio (Fig. IV-6C).

IV.3 Sequências de cristalização

As sequências de cristalização mineralógica dos plútons estão representadas na Figura IV-7.

Fases Minerais	Estágio Magmático	Estágio Tardi a pós magmático
Apatita	—	
Zircão	—	
Allanita	—	
Opacos	—	
Titanita	—	
Clinopiroxênio	Hedenbergita/Aegirina-aufita	carbonato+biotita+op
Granada	?	andradita
Hornblenda*	—	
Microclínio	—	m.branca
Albita	—	
Quartzo	—	

*ocorre somente em uma lâmina do SA.

Fases Minerais	Estágio Magmático	Estágio Tardi a pós magmático
Apatita	—	
Zircão	—	
Allanita	—	
Opacos	—	
Titanita	—	clorita+m.branca+op
Biotita	—	ep.+m.branca
Oligoclásio	—	
Microclínio	—	
Quartzo	—	
Fluorita	—	

Fases Minerais	Estágio Magmático	Estágio Tardi a pós magmático
Apatita	—	
Zircão	—	
Opacos	—	opacos + Fe-hastingsita
Clinopiroxênio	—	
Titanita	—	
Anfibólio	hornblenda	
Biotita	—	clorita+ep.+opacos
Oligoclásio	—	ep+m.branca
Microclínio	—	
Quartzo	—	

Fases Minerais	Estágio Magmático	Estágio Tardi a pós magmático
Apatita	—	
Zircão	—	
Allanita	—	
Epídoto	—	
Opacos	—	
Clinopiroxênio	—	
Anfibólio	—	
Biotita	—	
Titanita	—	ep+m.branca
Oligoclásio-albita	—	
Microclínio	—	
Quartzo	—	

- Caxexa, SA, SB e OD
- Japi
- Flores
- SNN

Figura IV-7. Sequências de cristalização mineralógica dos plútons estudados. Legenda – op: opacos; m.branca: mica branca; ep.: epidoto.

Tabela IV-1. Aspectos petrográficos dos plútons estudados. Legenda: ZCRP - Zona de Cisalhamento Remígio-Pocinhos; RPS – Rio Piranhas-Seridó; SJC – São José do Campestre; SA,SB, OD – Serra do Algodão, Serra do Boqueirão, Olho D'Água;

DOMÍNIO	RPS		SJC		
PLÚTON	Serra Negra do Norte	Flores	Japi	Caxexa	SA, SB, OD
CONTEXTO TECTÔNICO	Pós-orogênico	Pós-orogênico	Zona de cisalhamento Japi	Proximidade com a ZCRP	Inseridos na ZCRP
LITOTIPOS	Sienogranitos, álcali-feldspato granitos e monzogranitos	Monzogranitos	Sienogranitos, quartzo álcali-feldspato sienitos, quartzo sienitos	Álcali-feldspato granitos	Álcali-feldspato granitos, Álcali-feldspato sienitos e quartzo-álcali feldspato sienitos
ESTRUTURAS	acamamento magmático, <i>schlieren</i>	<i>Schlieren</i> , sem foliação.	magmático, por vezes exibindo aspecto milonítico	acamamento magmático	Foliações e acamamentos magmáticos
MINERALOGIA Félsica (F), Máfica (M) e Acessória (A)	F: Quartzo, feldspato alcalino, plagioclásio M: piroxênio (diopsídio e augita), anfibólio (actinolita e Fe-edenita), biotita A: titanita, zircão, apatita, allanita, epidoto e magnetita	F: Plagioclásio (An<13), feldspato alcalino, quartzo. M: biotita A: opacos, titanita, allanita, apatita, zircão e fluorita	F: microclínio, plagioclásio e quartzo; M: piroxênio (augita), anfibólio (hornblenda e Fe-hastingsita) e opacos A: titanita, biotita, epidoto, apatita e zircão	F: microclínio, albita (An<4), quartzo M: piroxênio (egirina-augita e hedenbergita), A: titanita, granada (andradita), opacos, zircão, apatita e allanita.	F: albita (An<8), microclínio, quartzo M: titanita, opacos, piroxênio (egirina-augita) A: apatita, zircão, granada (andradita), allanita, anfibólio (actinolita e hornblenda, em apenas uma lâmina do SA) e biotita.
TEXTURAS	Poiquilítica (microclínio e anfibólio), mirmequita, metamictização (allanita)	<i>Synneusis</i> , mirmequita, pertita, granofírica, metamictização (allanita), <i>chessboard</i> (microclínio)	Mortar, <i>ribbon</i> , mirmequita, pertita, esfenitização	Micropertita, esquelética e poiquilítica (granada)	Poiquilítica (plagioclásio), mirmequita, mortar, mesopertita, <i>ribbon</i> , uralitização

CAPÍTULO V. LITOQUÍMICA

Este capítulo apresenta os resultados da comparação litoquímica dos sete corpos estudados por meio de diagramas Harker para elementos maiores, elementos menores, diagramas de classificação e de séries magmáticas.

Visto a semelhança de contexto geológico, mineralógico, petrográfico e litoquímico entre os plútons Serra do Algodão, Serra do Boqueirão e Olho D'Água, optou-se por mantê-los agrupados em um único grupo de amostras (SA, SB e OD), tal como no Capítulo IV.

Para o plúton Serra Negra do Norte será utilizada a abreviação SNN. As três fácies deste plúton são individualizadas nas discussões: GN (hornblenda-biotita granito), GrN (granito róseo com hornblenda) e MicroGr (microgranito).

Ao final deste capítulo realiza-se também uma comparação dos plútons do DRN com os plútons alcalinos situados no Domínio Zona Transversal (DZT). As abreviações utilizadas incluem: SJC-Cx quando se tratar dos plútons do Domínio São José do Campestre: Caxexa, SA, SB e OD; SJC-JP, referente ao plúton Japi também inserido no DSJC; AMT/APT quando fizer referência aos plútons dos Terrenos Alto Moxotó e Alto Pajeú e PAB para os plútons do Terreno Piancó-Alto Brígida.

V.1 Diagramas de variação

V.1.1. Elementos maiores

Foram construídos diagramas de variação do tipo Harker para diferentes elementos, tendo SiO_2 (% em peso) como índice de diferenciação. Os dados mostram que são rochas bastante evoluídas com teor de SiO_2 variando entre 66 - 77%, sendo que os menores valores são referentes à fácies GN (hornblenda-biotita granito) do plúton SNN.

Em todos os diagramas (Fig. V-1) é possível observar que a fácies GN (plúton SNN) tende a se separar do restante de amostras dos outros plútons. Da mesma forma, ocorre com as amostras do stock Flores nos diagramas contendo Al_2O_3 , Fe_2O_{3t} , Na_2O e TiO_2 .

Nos diagramas de Al_2O_3 , Fe_2O_{3t} , K_2O , MgO , CaO e TiO_2 todos os plútons definem *trends* negativos. A fácies GN do SNN apresenta maiores teores de MgO , média de 1,06%, enquanto que as outras amostras possuem média de 0,16%. Os plútons SA, SB, OD e Caxexa, possuem os menores valores deste óxido. Fracionamento de feldspatos, piroxênio, biotita, apatita e minerais opacos refletem os *trens* negativos observados.

As amostras do Flores detêm os menores valores de Al_2O_3 (média de 13,5%) e os maiores de Fe_2O_{3t} (2,35%), este em conjunto com amostras da fácies GN do plúton SNN (1,73%).

A soma de álcalis ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) varia entre 6,2% e 11,7% e é sempre menor que o valor de Al_2O_3 . No diagrama do Na_2O ocorre dispersão das amostras com a variação de SiO_2 . Os maiores valores de Na_2O ocorrem no plúton Caxexa (média de 5,01%) e os menores valores no *stock* Flores (média de 3,31%).

O CaO apresenta *trend* negativo com aumento de SiO_2 para amostras do SNN, Japi, e Flores, o que indica fracionamento de plagioclásio, anfibólio, piroxênio, epidoto e titanita. SA, SB, OD e Caxexa apresentam *trend* levemente positivo, o que pode estar relacionado ao teor de anortita muito baixo no plagioclásio destes corpos. Neste diagrama é possível inferir uma linha de separação nos valores de CaO que, grosso modo, divide as amostras em dois grupos: (i) grupo formado pelos plútons SNN, Japi e *stock* Flores, que possuem os maiores valores (médias de 1,17; 1,03 e 0,99%, respectivamente) e (ii) grupo formado pelos plútons SA, SB, OD e Caxexa, detentores dos menores valores (médias de 0,44 e 0,69%, respectivamente).

As amostras do Plúton Caxexa tendem a se separar em dois grupos nos diagramas de CaO e Na_2O . Tal separação pode estar relacionada à ocorrência ou não de granada nestas rochas, que também está associada a uma mudança do tipo de piroxênio (mais detalhes no capítulo de química mineral).

A fácies GN do Plúton SNN e o *stock* Flores detêm os maiores valores de TiO_2 (média de 0,31 e 0,21%, respectivamente). Todos os plútons apresentam valores muito baixos ($<0,1\%$) de P_2O_5 , impossibilitando a visualização de *trends*.

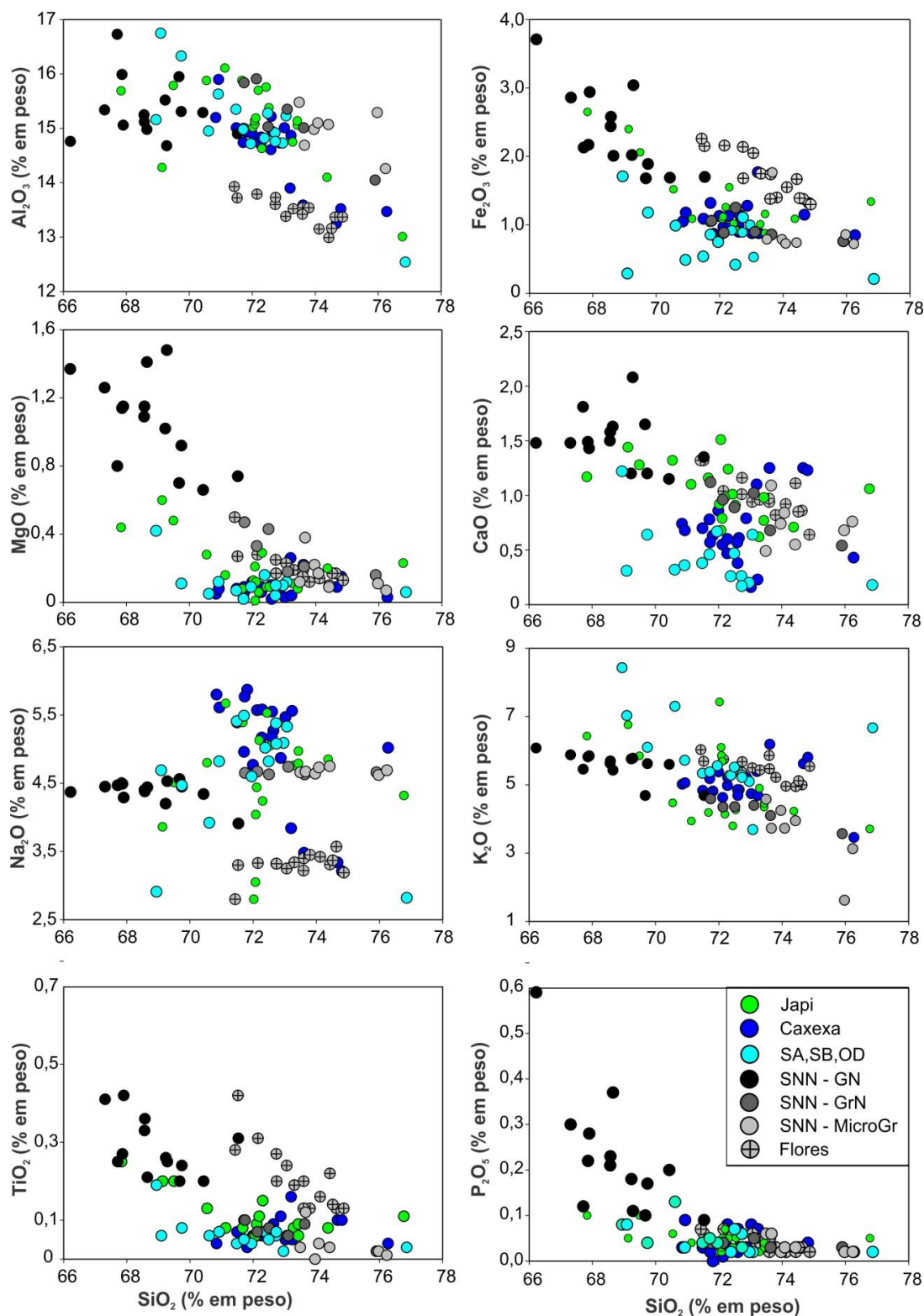


Figura V-1. Diagramas de variação do tipo *Harker* para elementos maiores dos granitos alcalinos nos domínios DRPS e DSJC da Província Borborema. Legenda: SA – Serra do Algodão; SB – Serra do Boqueirão; OD – Olho D'Água; SNN – Serra Negra do Norte; fácies do SNN: GN – hornblenda-biotita granito; GrN – granito róseo com hornblenda; MicroGr – microgranito.

V.1.2. Elementos traços

Nos diagramas de Harker para elementos traços, num geral, observa-se dispersão (Fig. V-2). Com exceção do Zr, que mostra *trends* negativos principalmente para os plútons SNN, Japi e *stock* Flores, indicando saturação neste elemento, o que tem implicações importantes para a geotermometria (Watson e Harrison, 1983; Harrison e Watson, 1984; Lee e Bachmann, 2014). Nos plutons Caxexa, SA, SB e OD, os teores de Zr são baixos e suas variações não são bem marcadas com o aumento da diferenciação magmática, o que pode sugerir magmas inicialmente subsaturados em Zr (Siégel et al., 2018). Cabe ainda mencionar que os teores anormalmente altos no SNN (> ~500 ppm) são interpretados por Campos (1997) como resultado da presença de cumulos de zircão.

O *stock* Flores e a fácies GN do plúton SNN apresentam a mesma ordem de valores e serem os mais enriquecidos nos elementos Rb e Nb. Nos demais diagramas, o *stock* Flores acompanha todas as fácies do plúton SNN, com exceção dos diagramas de Ba e Sr, onde o Flores detém os menores valores. Estes dois corpos formam um grupo que se distingue dos demais em todos os diagramas dos elementos traços.

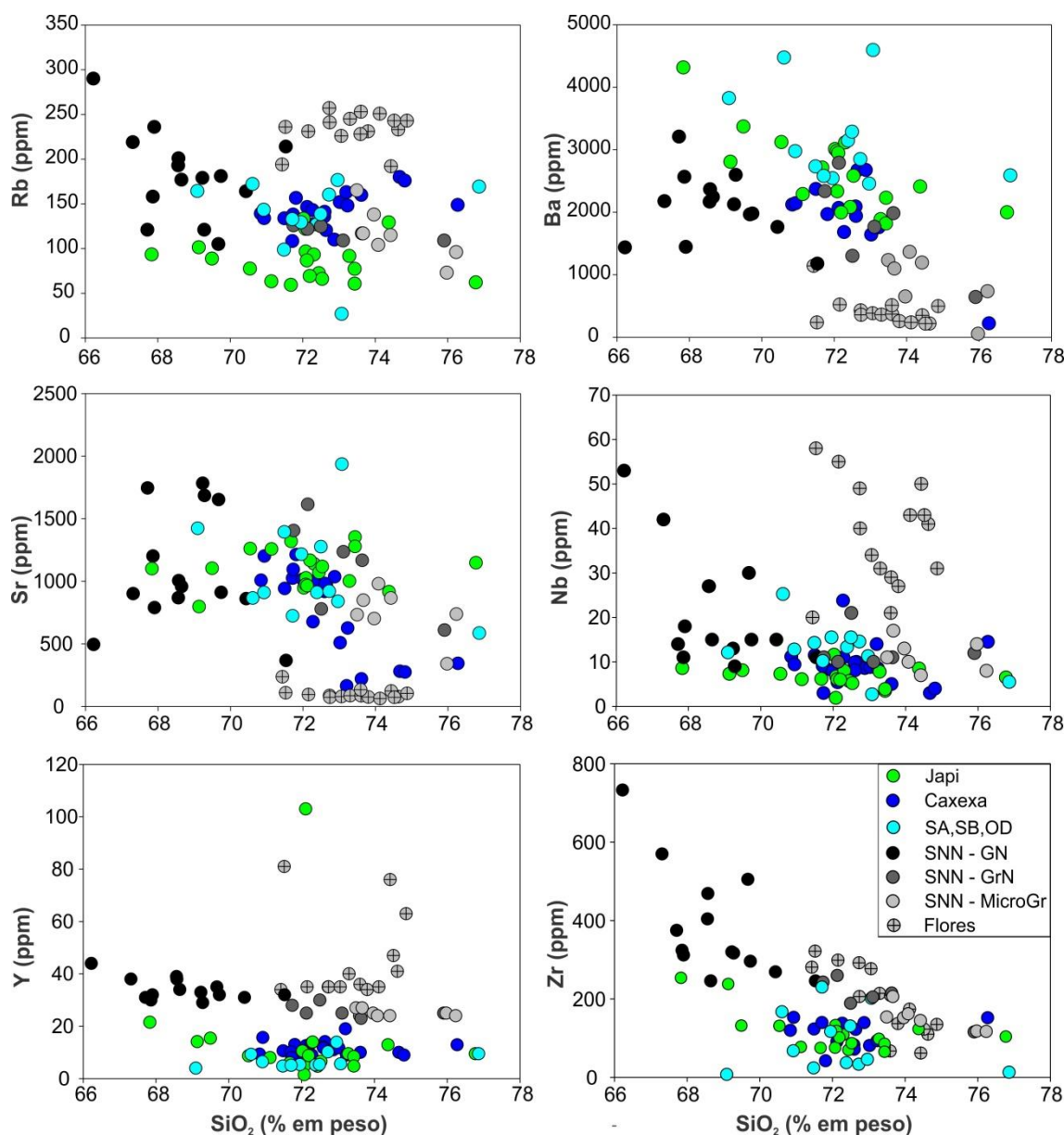


Figura V-2. Diagramas de variação do tipo *Harker* para elementos traços. Legenda: SA – Serra do Algodão; SB – Serra do Boqueirão; OD – Olho D'Água; SNN – Serra Negra do Norte; GN – hornblenda-biotita granito; GrN – granito róseo com hornblenda; MicroGr – microgranito.

V.1.3 Elementos Terras Raras

A Figura V-3 apresenta os padrões de elementos terras-raras (ETR) normalizados ao condrito de Evensen et al. (1978) para os plútons estudados. As rochas apresentam relativo enriquecimento de ETR leves em relação aos ETR pesados, com os maiores valores de ETR totais (variando de 45,6 a 554,4 ppm em

todos os plútons) nos plútons Flores e fácies GN do SNN (valores médios respectivos 320,2 e 115,8 ppm). Estes também mostram anomalias negativas a levemente positivas de Eu (média de Eu/Eu^* variando de 0,30 a 1,42), contrastando com os demais plútons, com anomalias positivas bem marcadas (média de Eu/Eu^* 1,74 a 2,33). De fato, anomalias positivas de Eu são recorrentes nos plútons estudados, com exceção do *stock* Flores, com anomalias negativas bem marcadas. Anomalias positivas de Eu não são características típicas de granitos de tipo-A. No caso dos plútons alcalinos do DRN, pode ser explicada por três motivos que serão detalhados posteriormente: i) fracionamento de plagioclásio na fonte; e/ou ii) altas condições de fugacidade e iii) altas concentrações de Ba e Sr.

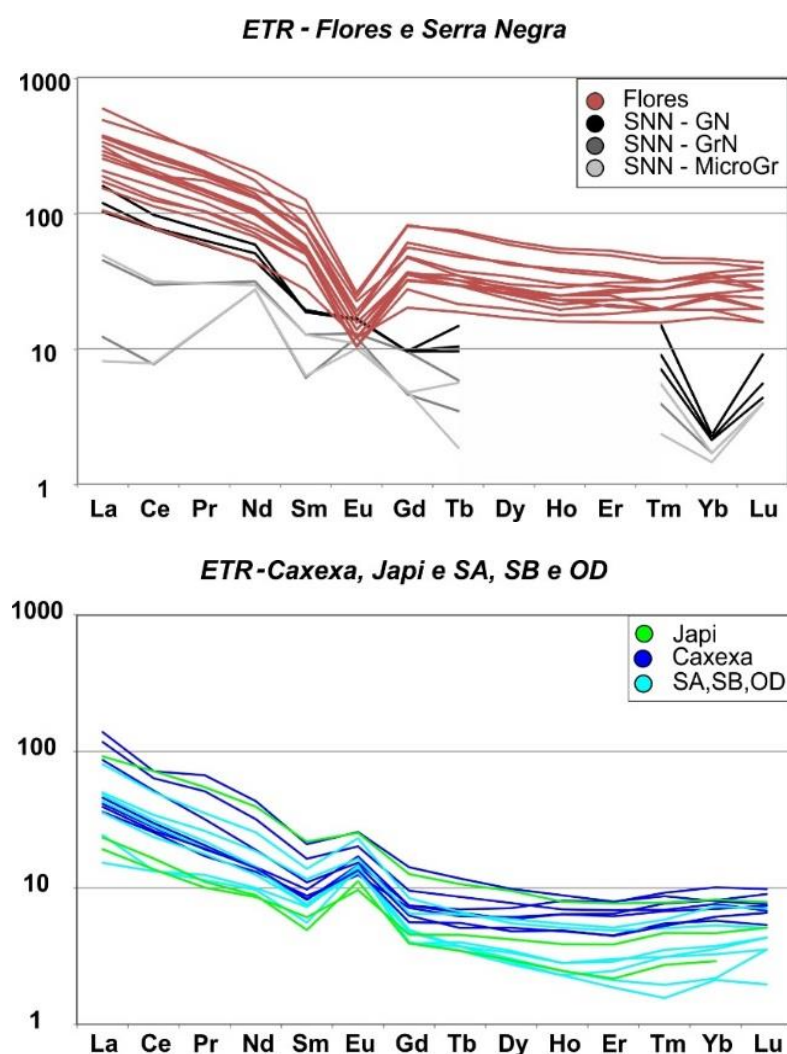


Figura V-3. Padrão dos Elementos Terras Raras normalizados com o condrito de Evensen et al. (1978).

Considerando um ambiente mais oxidante de cristalização, a anomalia positiva de Eu dos plútons Japi, Caxexa, SA, SB e OD pode ser explicada pelo excesso de Eu^{3+} (mais oxidante e incompatível com a estrutura do plagioclásio), ao invés de Eu^{2+} . Condições de oxidação ligadas à questão da anomalia de Eu são reportadas na literatura, tal como em Slagstad et al. (2004) e Ragland (1989). Ao analisarmos os dados petrográficos do plúton Flores, percebe-se que este corpo apresenta composições modais relativamente maiores de plagioclásio quando comparados aos outros corpos e maiores teores de anortita (chegando a 13%, quando nos outros corpos raramente ultrapassa 8%). A influência do fracionamento do plagioclásio no plúton Flores e sua anomalia negativa ficam melhor explicadas nos diagramas da Figura V-4. Neste diagrama, Hafnadottir (2014), representa o trend de fracionamento do plagioclásio com base na diminuição das razões Sr/Nd , Eu/Eu^* e Sr/Eu^* . De todos os plútons, segundo este diagrama, o que mais fracionou plagioclásio foi o Flores.

Sial e Ferreira (1988) também verificaram anomalias positivas de Eu no plúton Catingueira (terreno Piancó-Alto Brígida) e sugerem que possam representar cumulos de feldspato. Além disto, Birk et al. (1979) relatam que o fracionamento de Eu^{2+} é evitado quando se tem altas concentrações de Sr e Ba (Birk et al., 1979).

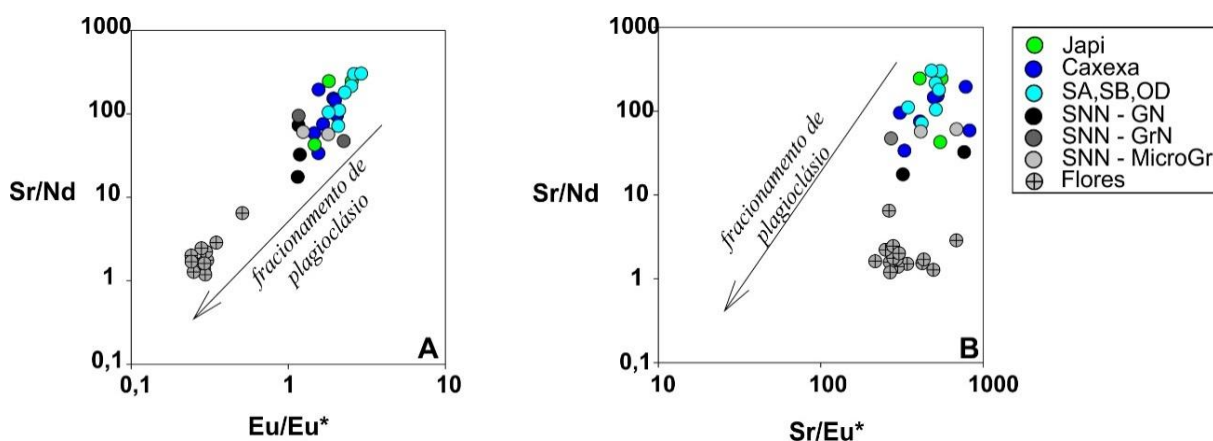


Figura V-4. Diagramas de Hafnadottir (2014) considerando Eu/Eu^* e Sr/Eu^* vs. os valores de Sr/Nd das amostras. A seta indica o *trend* de fracionamento do plagioclásio.

A anomalia negativa de Yb no SNN pode ser explicada pelo fracionamento de anfibólio, mas também pode refletir a retenção de granada no líquido (Campos, 1997).

Também se reportam condições menos oxidantes para rochas que apresentam anomalia negativa de Yb (Hsu e Crozaz, 1995).

Considerando-se apenas as paragêneses minerais de magmas oxidados (titanita+magnetita±hematita) e as anomalias de Eu, pode-se dizer que todos os corpos foram formados em ambientes com altas fugacidades de oxigênio, com o *stock* Flores sendo o menos oxidado. Uma discussão mais aprofundada da fugacidade de oxigênio destes plútons é apresentada no Capítulo VII.

V.2. Diagramas de séries magmáticas

V.2.1 Saturação em alumina

No índice de saturação em alumina, segundo classificação de Shand, no diagrama de Maniar e Piccoli (1989), tem-se que o caráter das rochas estudadas é, em sua grande maioria, peraluminoso a metaluminoso (Fig. V-5). No caso do plúton Japi e *stock* Flores, a razão molar A/CNK é quase sempre maior que 1.

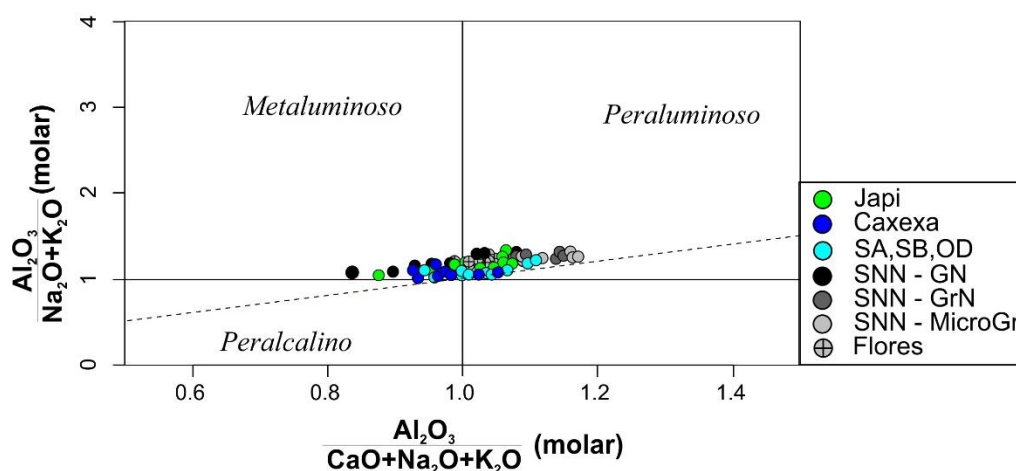


Figura V-5. Índice de saturação em alumina, segundo classificação de Shand, no diagrama de Maniar e Piccoli (1989) para os sete corpos estudados. Legenda: SA – Serra do Algodão; SB – Serra do Boqueirão; OD – Olho D'Água; SNN – Serra Negra do Norte; GN – hornblenda-biotita granito; GrN – granito róseo com hornblenda; MicroGr – microgranito.

V.2.2 Diagramas discriminantes de séries magmáticas

Na Figura V-6 é apresentado o diagrama TAS (Total Álcalis-Sílica) para rochas plutônicas, segundo Wilson (1989) e linha de subdivisão dos campos alcalino/subalcalino por Miyashiro (1978). Além disso, a este diagrama foi adicionado

o campo de rochas alcalinas saturadas sódicas e ultrapotássicas definido por Nardi (2016). Todas as rochas apresentam neste diagrama afinidade alcalina e são classificadas como álcali granitos e subordinadamente sienitos.

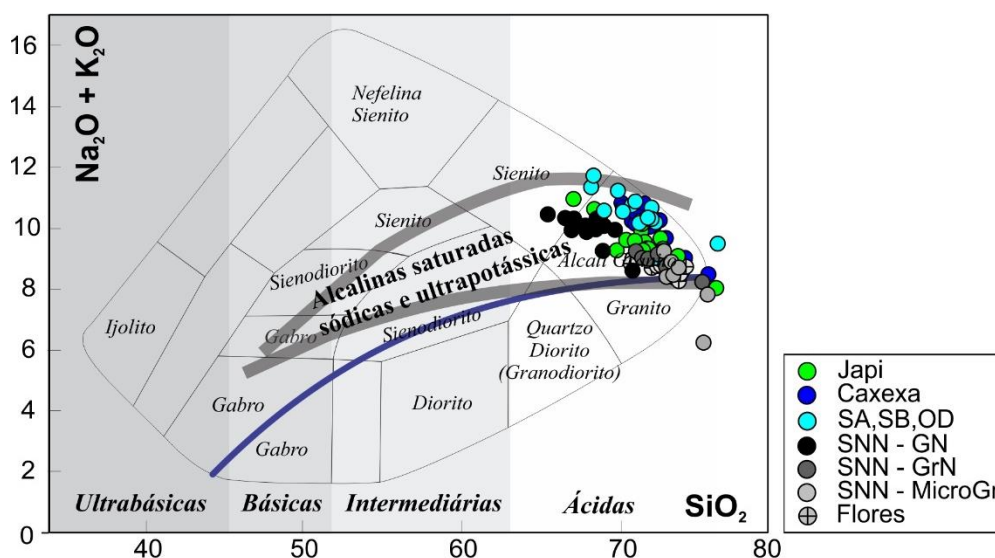


Figura V-6. Diagrama Total-Álcali Sílica para rochas plutônicas, segundo Wilson (1989). A Linha azul separa os campos das rochas alcalinas (acima da linha azul) das subalcalinas (abaixo da linha azul) e foi definida por Miyashiro (1978). As linhas grossas cinzas sombreadas representam o campo das rochas alcalinas saturadas sódicas e ultrapotássicas definidas por Nardi (2016). Legenda: SA – Serra do Algodão; SB – Serra do Boqueirão; OD – Olho D'Água; SNN – Serra Negra do Norte; GN – hornblenda-biotita granito; GrN – granito róseo com hornblenda; MicroGr – microgranito.

O conjunto de rochas estudado possui afinidade alcalina bem marcada em diagramas como R1-R2 (De La Roche et al., 1980), TAS (Lameyre, 1987), Wright (1969) e Sylvester (1989) (Figs. VI-7 e VI-8). A exceção ocorre nas amostras da fácies hornblenda-biotita granito (GN) do SNN, que apresentam caráter mais transicional entre as rochas alcalinas e cálcio-alcalinas nos diagramas de Rogers e Greenberg (1981) e Sylvester (1989) (Fig. V-9).

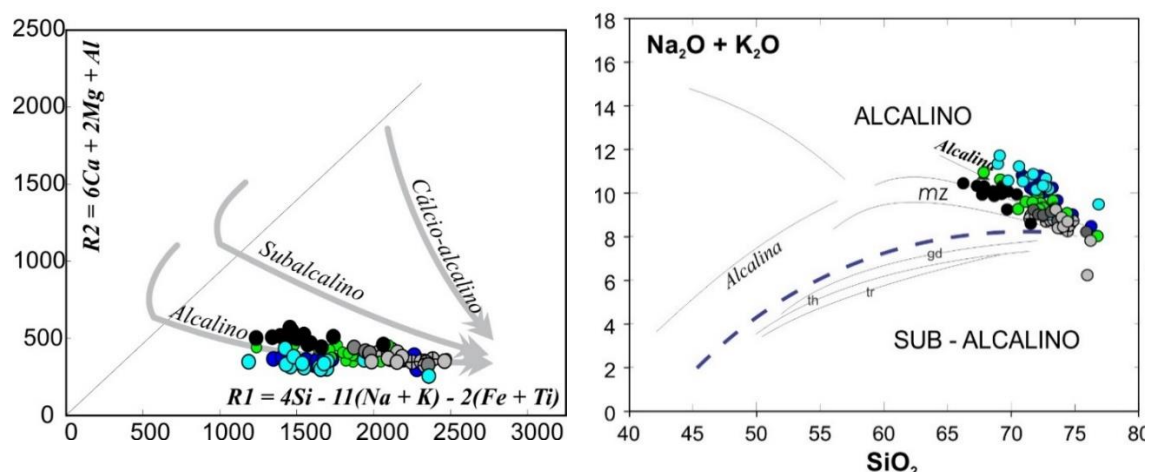


Figura V-7. À esquerda, diagrama catiônico R1-R2 de De La Roche et al. (1980), onde em R1 são considerados os cátions Si, Na, K, Fe, Ti e em R2 os cátions Ca, Mg e Al. À direita, diagrama TAS para rochas plutônicas de Lameyre (1987), onde a linha tracejada azul separa os campos das rochas alcalinas e subalcalinas pelos dados de Myashiro (1978). Legenda na Figura V-8.

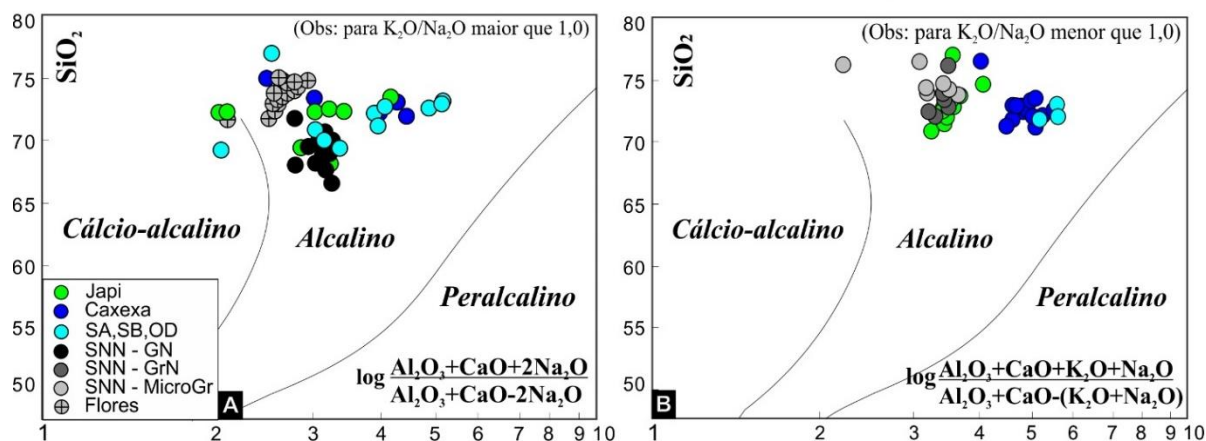


Figura V-8. Diagramas com índice de Wright (1969) para todos os plútons estudados versus SiO₂ (% em peso). Em A, tem-se o diagrama para quando $2,5 < K_2O/Na_2O > 1$, e em B, quando a razão $K_2O/Na_2O < 1$. Legenda: SA – Serra do Algodão; SB – Serra do Boqueirão; OD – Olho D’Água; SNN – Serra Negra do Norte; GN – hornblenda-biotita granito; GrN – granito róseo com hornblenda; MicroGr – microgranito.

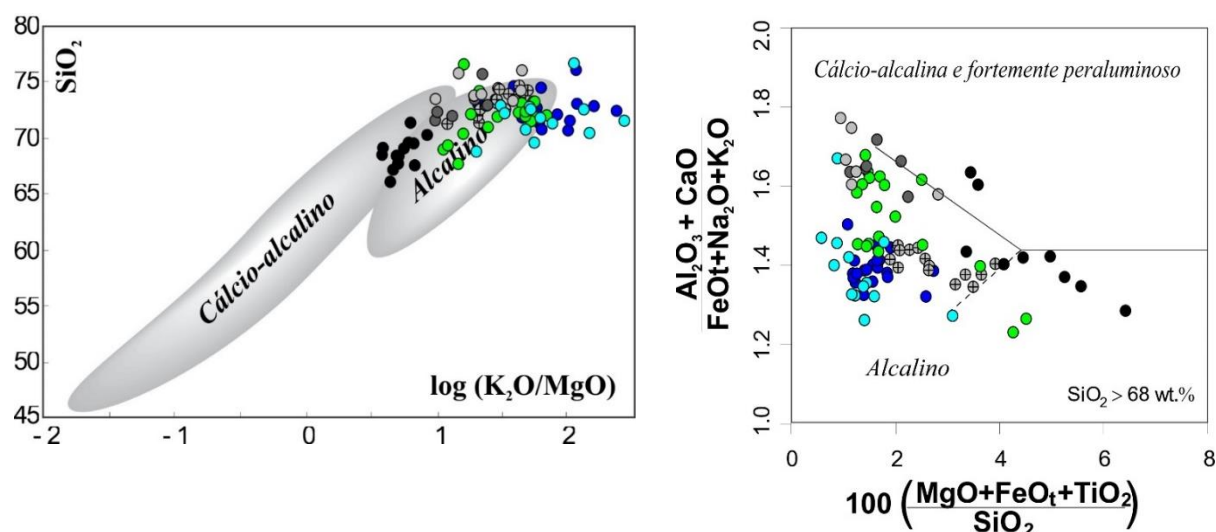


Figura V-9. À esquerda, diagrama de Rogers e Greenberg (1981) onde são considerados o $\log (K_2O/MgO)$ vs. teor de $SiO_2\%$ (peso). À direita, diagrama de Sylvester (1989) para discriminação do campo de rochas alcalinas e cálcio-alcalinas e fortemente peraluminosas, onde são considerados os óxidos em porcentagem em peso. Legenda no diagrama abaixo.

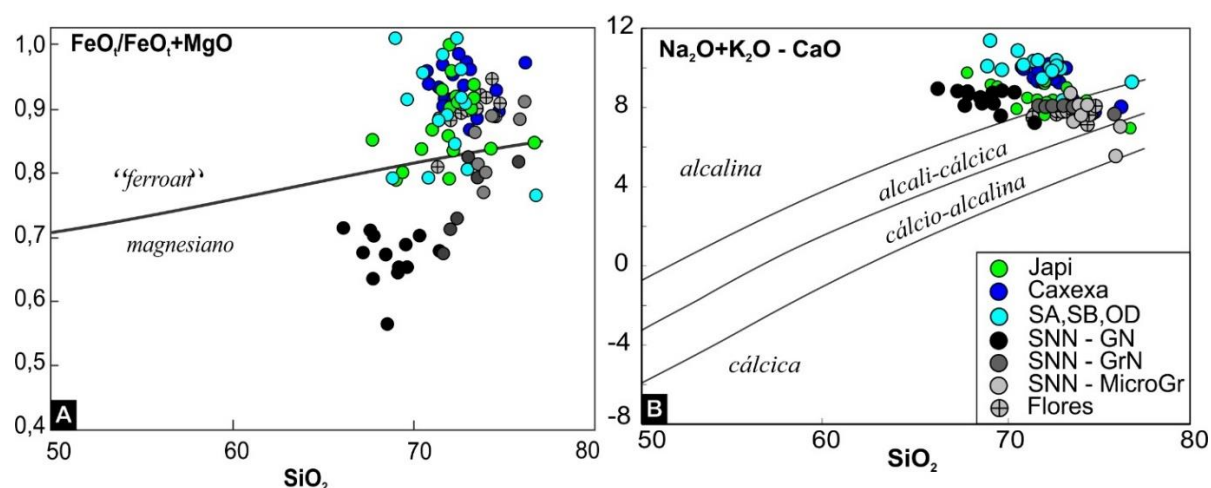


Figura V-10. Diagramas de Frost *et al.* (2001). À esquerda, teor de $SiO_2\%$ (peso) versus $\#Fe$, separando os campos das rochas “ferroanas” e magnesianas. À direita, teor de $SiO_2\%$ (peso) vs. Na_2O+K_2O-CaO onde estão separadas as séries alcalina, álcali-cálcica, cálcica-alcalina e cálcica, segundo os limites estabelecidos por Peacock (1934). Legenda: SA – Serra do Algodão; SB – Serra do Boqueirão; OD – Olho D’Água; SNN – Serra Negra do Norte; GN – hornblenda-biotita granito; GrN – granito róseo com hornblenda; MicroGr – microgranito.

Na proposta de classificação de Frost *et al.* (2001), as rochas possuem caráter predominantemente “ferroano” (Fig. V-10A) e variam de alcalina a álcali-cálcica (Fig. V-10B). Novamente como exceção, as amostras da fácies hornblenda-biotita granito (GN) e granito róseo com hornblenda (GrN), ambas do plúton SNN, embora mostrem assinatura predominantemente alcalina a álcali-cálcica (Fig. V-10B), possuem os menores valores de $\#Fe$ ($FeO/FeO+MgO$), o que resulta num caráter mais

magnesiano para este plúton (Fig. V-10A). É notável ainda no diagrama da Figura V-10B a distinção de duas trajetórias evolutivas: uma para os granitos dos plútons Caxexa, SA, SB e OD, e outra que engloba os plútons SNN, Japi e stock Flores. Tais trajetórias são também observadas no diagrama modal QAP da Figura IV-1.

As características químicas desses granitos mostram semelhança com granitos de tipo-A, tal como visualizado nos diagramas discriminantes de Whalen et al., (1987) (Fig. V-11), especialmente quando se considera elementos maiores. Nestes mesmos diagramas, quando são considerados os elementos traços percebe-se que o SNN sempre cai no campo dos granitos tipo-A. Por outro lado, os plútons Caxexa, SA, SB e OD por vezes aparecem no campo de transição entre os granitos de tipo-A e os granitos de tipo I e S, o que pode estar ligado à natureza sin-colisional desses plútons.

Nardi e Bitencourt (2009) propuseram diagramas onde são consideradas razões entre os álcalis *versus* #Fe e, ainda alguns elementos traços *versus* Ga/Al para classificar granitos como de tipo-A e granitos “não tipo-A”. Quando plotadas nesses diagramas, as análises litoquímicas disponíveis confirmam a assinatura “tipo-A” para os plútons estudados (Fig. V-12).

Adicionalmente, Nardi e Bitencourt (2009) definiram uma série de condições a serem observadas para classificar um dado granito como “tipo-A”:

(i) ter associação genética com rochas magmáticas de afinidade alcalina sódica ou ultrapotássica;

(ii) Possuir valores de $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ e $(\text{FeOt}/ \text{FeOt}+\text{MgO})$ em rocha total, respectivamente igual ou maior que 9% e 0.9;

(iii) ter composições peralcalinas, por exemplo, com piroxênios ou anfibólios sódicos modais, ou com $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/ \text{Al}_2\text{O}_3 > 1.0$;

(iv) razão $(10000 \cdot \text{Ga})/\text{Al} > 2.6$ e $\text{Ce}+\text{Y}+\text{Nb}+\text{Zr} > 340$ ppm (Whalen et al. 1987) plotando no campo intraplaca do diagrama $(\text{Nb}+\text{Y})$ *versus* Rb de Pearce et al. (1984).

A condição (ii) é atendida por todos os plútons, com exceção do SNN, que atende à condição da soma de álcalis >9%, mas os valores de $\text{FeOt}/\text{FeOt}+\text{MgO}$ são quase sempre menores que 0,9 (Fig. V-10A). Na condição (iii), apesar dos plútons não terem composições peralcalinas, os piroxênios que ocorrem nestes corpos satisfazem

a razão $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) / \text{Al}_2\text{O}_3 > 1.0$, com exceção do SNN. A (iv) condição é atendida somente para as fácies do SNN, que possui sempre os maiores valores da razão $(10000 \cdot \text{Ga}) / \text{Al} > 2.6$. Já a soma $\text{Ce} + \text{Y} + \text{Nb} + \text{Zr} > 340$ ppm é atendida pelo plúton SNN e stock Flores.

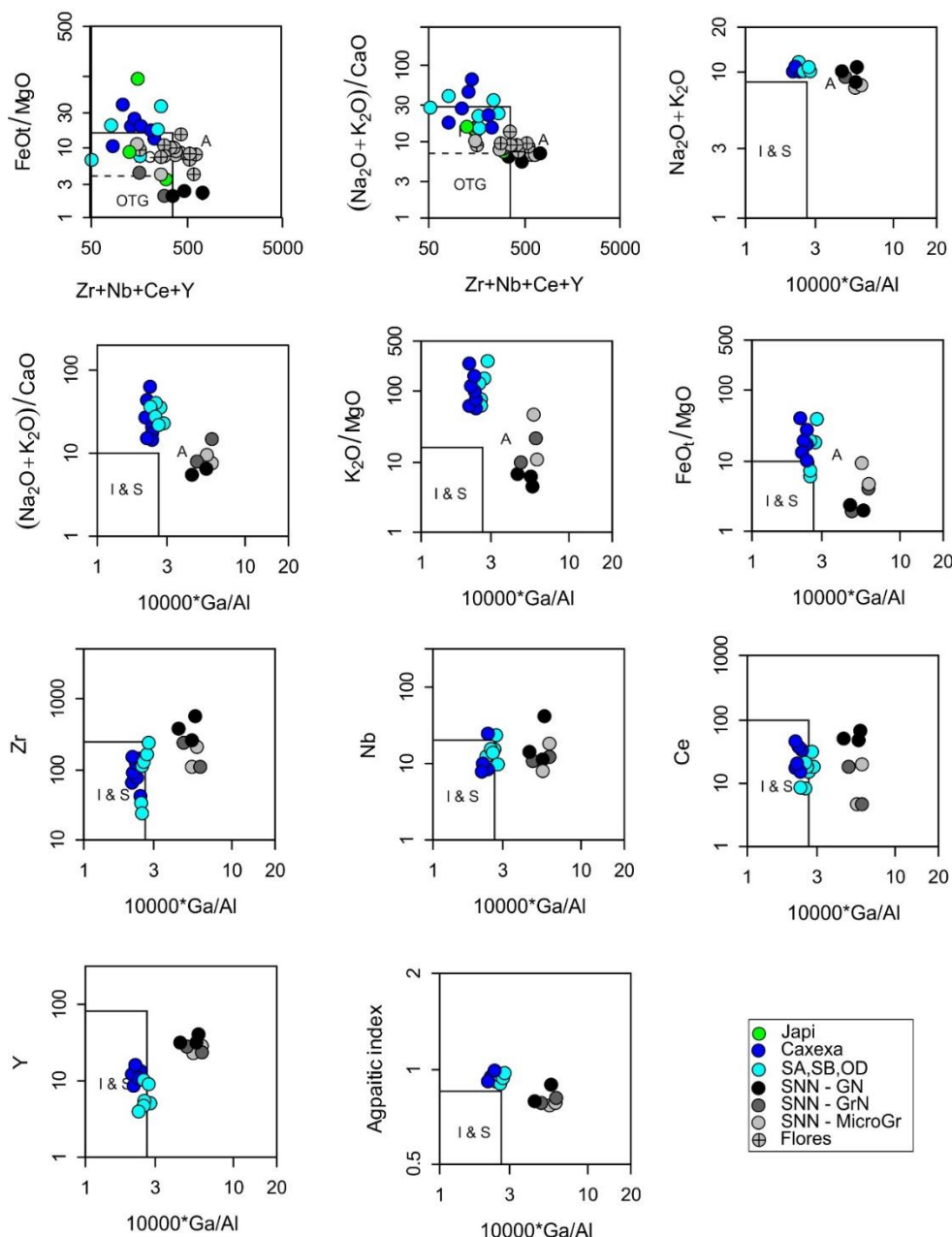


Figura V-11. Diagramas de Whalen et al. (1987) separando os campos dos granitos tipo-A dos granitos tipo I e S e consideradas as razões de Ga/Al versus diversos óxidos. Legenda: SA – Serra do Algodão; SB – Serra do Boqueirão; OD – Olho D’Água; SNN – Serra Negra do Norte; GN – hornblenda-biotita granito; GrN – granito róseo com hornblenda; MicroGr – microgranito.

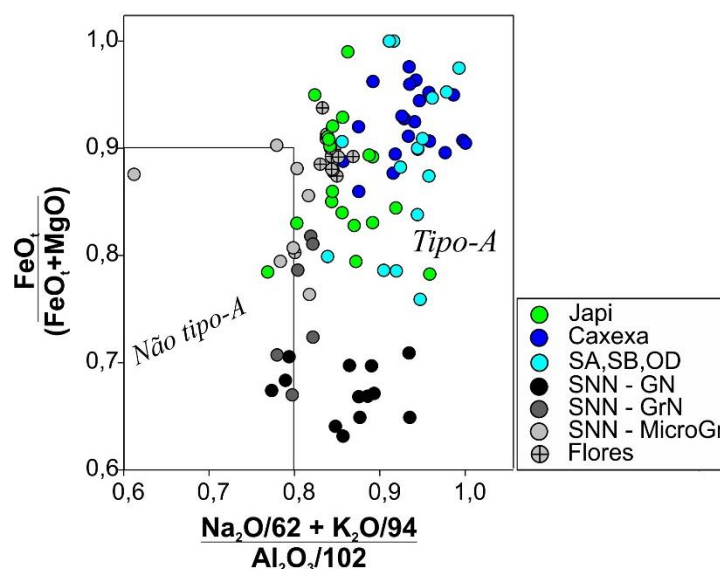


Figura V-12. Diagrama discriminante de granitos tipo-A de Nardi e Bitencourt (2009). Legenda: SA – Serra do Algodão; SB – Serra do Boqueirão; OD – Olho D'Água; SNN – Serra Negra do Norte; GN – hornblenda-biotita granito; GrN – granito róseo com hornblenda; MicroGr – microgranito.

Em resumo, as rochas estudadas mostram assinaturas alcalinas a álcali-cálcicas e outras particularidades químicas comuns a granitos de tipo-A bem marcadas. O plúton SNN é uma exceção, pois embora tenha uma assinatura química predominantemente alcalina a álcali-cálcica, diversas amostras já se aproximam de composições cálcio-alcalinas e seu caráter é francamente mais magnesiano. Tais fatos sugerem que o SNN possui composições transicionais, mais próximas a granitos tipo-I cordilheiranos.

Todavia, as amostras do SNN ora apresentam comportamento alcalino ora apresentam comportamento cálcio-alcalino, e até mesmo na transição entre estas séries. Isso pode estar relacionado com o enriquecimento em MgO e CaO nas fácies menos evoluídas deste plúton, principalmente na fácies hornblenda-biotita granito (GN), que no diagrama de Frost et al. (2001) aparece como magnesiana.

V.3 Comparação com os plútons alcalinos do DZT

Tendo visto a caracterização litoquímica de cada corpo e comparação entre os sete plútons do Domínio Rio Grande do Norte, neste item será feita uma comparação

preliminar destes plútons com os granitos alcalinos do domínio da Zona Transversal (DZT), com ênfase para os corpos alojados nos terrenos Piancó-Alto Brígida (PAB), Alto Moxotó (AMT) e Alto Pajeú (AMT). Para tal, os plútons foram agrupados segundo a Tabela V-II. Cabe mencionar que o plúton Solânea aflora no Complexo Serrinha-Pedro Velho (SPV), mas se assemelha com diversos corpos contemporâneos e próximos nos terrenos AMT/APT. Por essa razão foi agrupado neste conjunto.

Tabela V-II. Agrupamento dos plútons segundo os Domínios ou Terrenos em que ocorrem.

Grupo	Terreno	Plútons	Referências bibliográficas
SNN	RPS-SN	Serra Negra do Norte	Campos, 1997
Flores	RPS-FI	Flores	Maia, 2004
SJC-Cx	SJC	Caxexa	Nascimento, 2000
	SJC	Serra do Boqueirão	Nascimento, 1998
	SJC	Serra do Algodão	Nascimento, 1998
	SJC	Olho d'Água	Nascimento, 1998
SJC-JP	SJC	Japi	Hollanda, 1998
AMT/APT	AMT	Bravo	Guimarães et al. 2004
	AMT	Prata	Guimarães et al. 2005, Guimarães et al. 2004
	AMT	Serra da Engabelada	Guimarães et al. 2005
	AMT	Serra da Barra	Santos, 2012
	APT	Queimadas	Almeida et al., 2002
	APT	Serrote Santo Antônio	Guimarães et al. 2005
	APT	Pilõezinhos	Lima et al. 2017
	APT	Serra Branca	Santos, 2013, Guimarães et al. 2004
	APT	Serra do Velho Zuza	Melo, 2004, Guimarães et al. 2004
	APT	Pereiro	Melo, 2004, Guimarães et al. 2004
	APT	Açude do Caroá	Melo, 2004
	APT	Boqueirão	Melo, 2004
	APT	Solidão	Sial e Ferreira, 1988
	APT	Pocinhos	Sampaio, 2005
	SPV	Solânea	Lima et al. 2016
PAB	PAB	Catingueira	Ferreira e Sial, 1986
	PAB	Campo Grande	Ferreira e Sial, 1986
	PAB	Santo Antônio/Minador	Ferreira e Sial, 1986
	PAB	Macacos	Ferreira e Sial, 1986
	PAB	Urtiga	Ferreira e Sial, 1986

Quando o conjunto de dados é analisado em diagramas litoquímicos, é possível reconhecer ao menos três grupos de amostras (Figs. V-13 e V-14). O primeiro grupo é formado pelos plútons Caxexa, SA, SB e OD (SJC-Cx) e corpos do PAB; o segundo pelo plúton Japi e as diferentes fácies do SNN e o terceiro grupo formado pelo *stock* Flores e os granitos de tipo-A dos Terrenos Alto Moxotó (AMT) e Alto Pajeú (APT).

De uma maneira geral, os granitos do PAB são os mais enriquecidos em álcalis totais, já adquirindo assinatura peralcalina. Guardam afinidades químicas com os plútons Caxexa, SA, SB e OD. Em comum, todos estão alojados ao longo de zonas de cisalhamento, o que é confirmado pelo diagrama de ambientação tectônica de Pearce et al. (1984), onde plotam no campo dos granitos sin-colisionais + arco vulcânico (Fig. VI-15B). Os granitos dos terrenos AMT/APT possuem menores teores de álcalis e maiores de CaO (Fig. VI-14). Como resultado mostram afinidade predominantemente álcali-cálcica (a cálcio-alcalina), assemelhando-se ao *stock* Flores. Os plútons Japi e SNN mostram composições intermediárias entre os dois grupos anteriores. Com exceção do SNN, com caráter mais magnesiano, todos os demais granitos são relativamente enriquecidos em Fe, uma característica de granitos de tipo-A (Frost e Frost, 2011; Fig. V-15A).

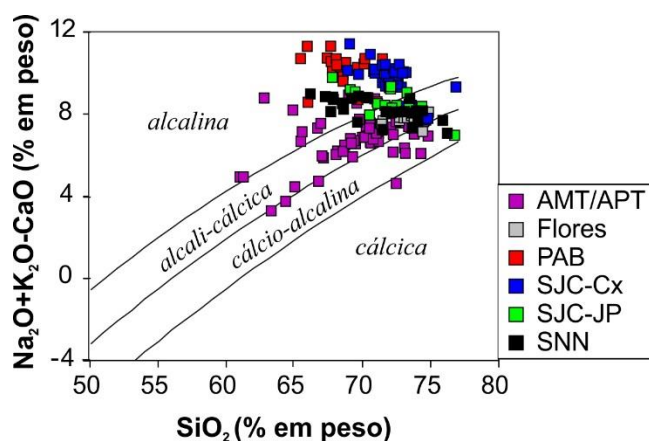


Figura V-13. Teor de SiO₂% (peso) vs. Na₂O+K₂O-CaO onde estão separadas as séries alcalina, álcali-cálcica, cálcica-alcalina e cálcica, segundo os limites estabelecidos por Peacock (1934) no diagrama de Frost et al. (2001). Legenda: AMT/APT – Terrenos Alto Moxotó/Alto Pajeú; PAB – Piancó Alto Brígida; SJC-Cx – São José do Campestre: Caxexa+SA+SB+OD; SJC-JP- São José do Campestre: Japi; SNN – Serra Negra do Norte.

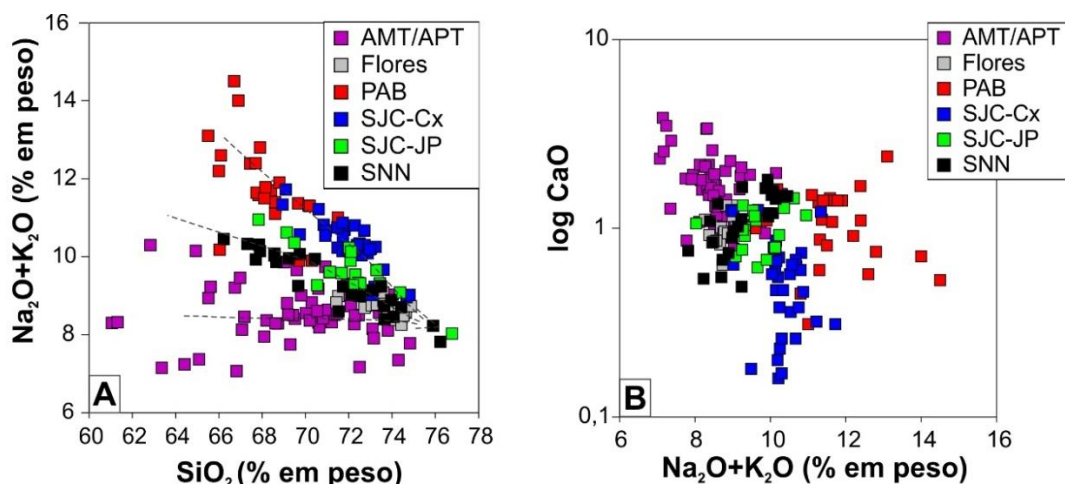


Figura V-14. A. Diagrama Total-álcalis vs. SiO_2 (ambos % em peso); as linhas tracejadas representam os trends distintos de evolução das rochas. B. Diagrama $\log \text{CaO}$ (em ppm) vs. Total-álcalis (% em peso).

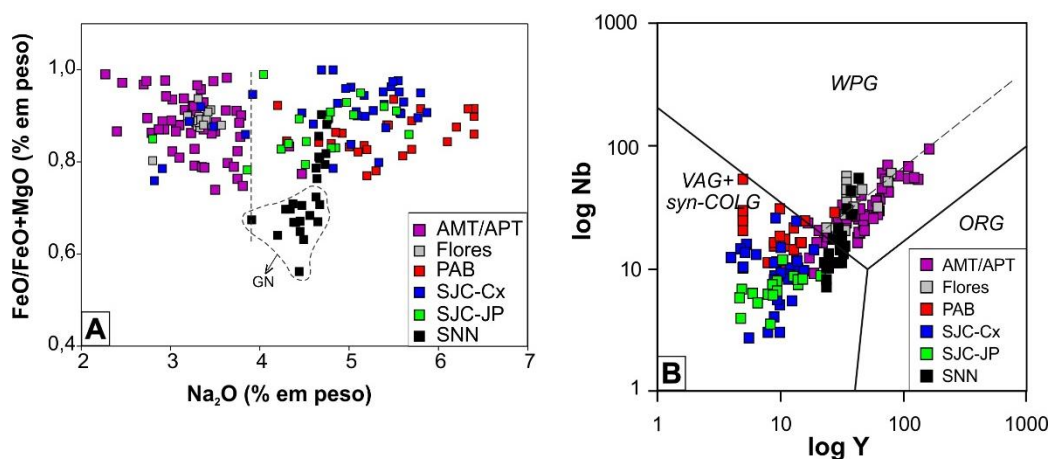


Figura V-15. A. Diagrama de $\# \text{Fe}$ vs. Na_2O (ambos em % em peso); a linha reta tracejada separa as amostras em termos de conteúdo de Na_2O e a linha tracejada circundando as amostras do SNN-GN evidencia os baixos valores de $\# \text{Fe}$ destas amostras. B. Diagrama de Pearce et al. (1984), onde tem-se $\log \text{Nb}$ vs. $\log Y$; WPG: Granitos intra-placa, VAG+syn-COL: Granitos de arco vulcânico e sin-colisionais e ORG: granitos de cordilheira oceânica.

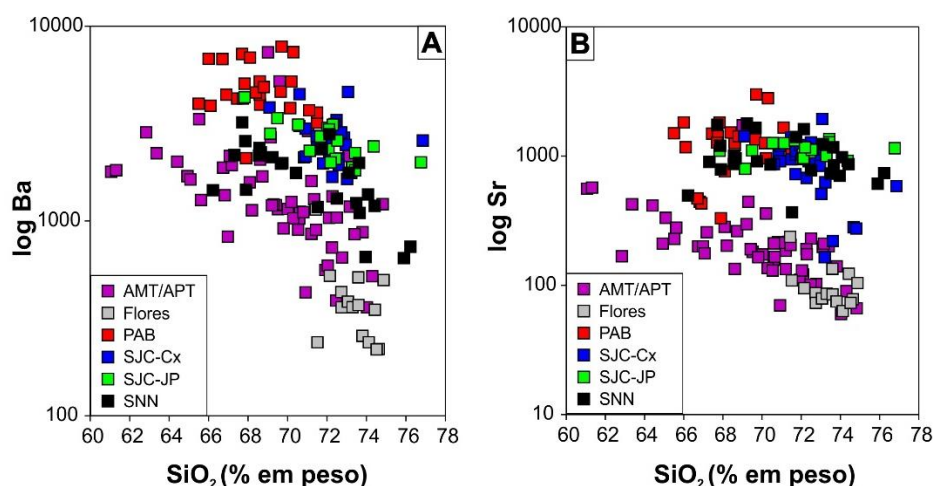


Figura V-16. A. Diagrama log Ba (ppm) vs. SiO_2 (% em peso). B. diagrama log Sr vs. SiO_2 (% em peso).

Os elementos traços Sr e Ba são também úteis para diferenciar os grupos de granitos (Fig. VI-16). Os teores são maiores para os grupos PAB, SJC e SNN. Um fator em comum entre estes corpos é a presença de anomalias positivas de Eu (Fig. V-3). Birk et al. (1979) relatam que o fracionamento de Eu^{2+} é evitado quando se tem altas concentrações de Sr e Ba. Por outro lado, o *stock* Flores mostra-se também como o mais empobrecido em Sr e Ba, o que reforça a interpretação de uma maior remoção/fracionamento de plagioclásio para este corpo. Esses dois grupos de amostras possuem assinatura de granitos intraplaca (Fig. V-15) e são os mais enriquecidos em ETR.

CAPÍTULO VI. QUIMISMO MINERAL

Este capítulo traz uma caracterização química dos principais minerais félsicos e máficos da suíte alcalina dos Domínios Rio Piranhas-Seridó (DRPS) e São José do Campestre (DSJC). Os dados são provenientes das referências listadas na Tabela I-2 e foram recalculados conforme descrito no Capítulo I, item I.3. São apresentados e discutidos dados para feldspatos, clinopiroxênios, anfibólios e biotita. Para fins de comparação preliminar, são também apresentados os dados disponíveis na literatura para esses minerais em granitos de tipo-A do Domínio da Zona Transversal (DZT) da Província Borborema.

VI. 1 Feldspatos

O feldspato predominante nos granitos de tipo-A do DSJC (plútons Caxexa, Serra do Algodão/Boqueirão e Japi) corresponde a uma albita com variações composicionais restritas, próximas ao membro-final ideal (Fig. VI-1). No plúton Caxexa as composições variam em torno de $An_{0-2}Ab_{95-100}Or_{0-5}$, com os maiores teores de Na registrados nas amostras sem andradita. Já nos plútons Serra do Algodão e Boqueirão, a albita apresenta teores ligeiramente mais elevados de Ca, e suas composições variam entre $An_{5-9}Ab_{90-99}Or_{1-2}$. Para o plúton Japi, a quantidade de dados químicos é limitada (2 análises). Correspondem a albita com composição homogênea entre $An_{2-5}Ab_{94-96}Or_1$.

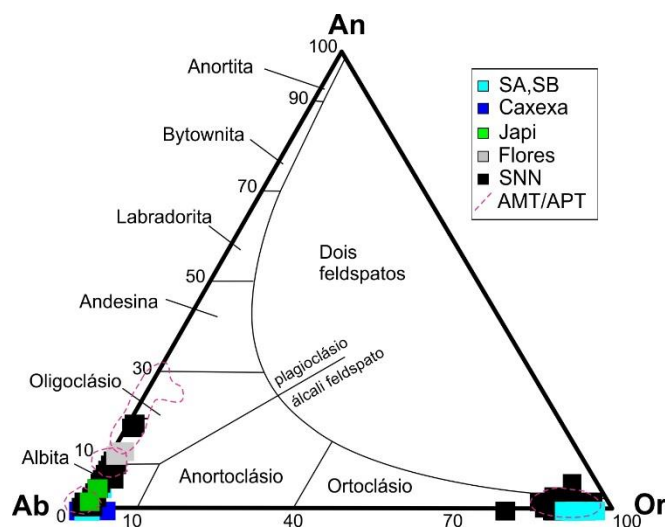


Figura VI-1. Diagrama triangular (Ab) Albita- (An) Anortita- (Or) Ortoclásio para feldspatos de granitos de tipo-A dos domínios DJSC, DRPS e DZT da Província Borborema. As linhas tracejadas são referentes aos campos que os feldspatos dos terrenos Alto Moxotó e Alto Pajeú (AMT/APT), no DZT. Adaptado de Smith (1974).

Nos granitos de tipo-A intrusivos no DRPS (plúton Serra Negra do Norte e *stock* Flores), o plagioclásio varia de albita a oligoclásio (Fig. VI-1). A albita é predominante no plúton Serra Negra do Norte, com composições entre $An_{1-9}Ab_{90-99}Or_{0-2}$. Oligoclásio é de ocorrência restrita, e suas composições variam entre $An_{10-19}Ab_{80-88}Or_{1-2}$. As composições mais cálcicas são encontradas na fácies microgranítica. Por outro lado, o plagioclásio do *stock* Flores corresponde a um oligoclásio sódico, com composições homogêneas entre $An_{12-13}Ab_{85-87}Or_{1-2}$.

Análises de feldspato potássico estão disponíveis apenas para os plútons Serra do Algodão/Boqueirão (DSJC) e Serra Negra do Norte (DRPS). As composições variam entre $An_0Ab_{3-9}Or_{91-97}$ e $An_{0-1}Ab_{2-11}Or_{88-97}$, respectivamente (Fig. VI-1).

Comparativamente, nos granitos de tipo-A dos terrenos Alto Moxotó e Alto Pajeú (AMT/APT) no DZT, o plagioclásio é em geral mais cálcico e corresponde a oligoclásio, com composições variadas ao longo de todo espectro composicional ($An_{11-30}Ab_{68-89}Or_{0-6}$). Já o feldspato potássico varia entre $An_0Ab_{3-9}Or_{91-97}$ (Fig. VI-1).

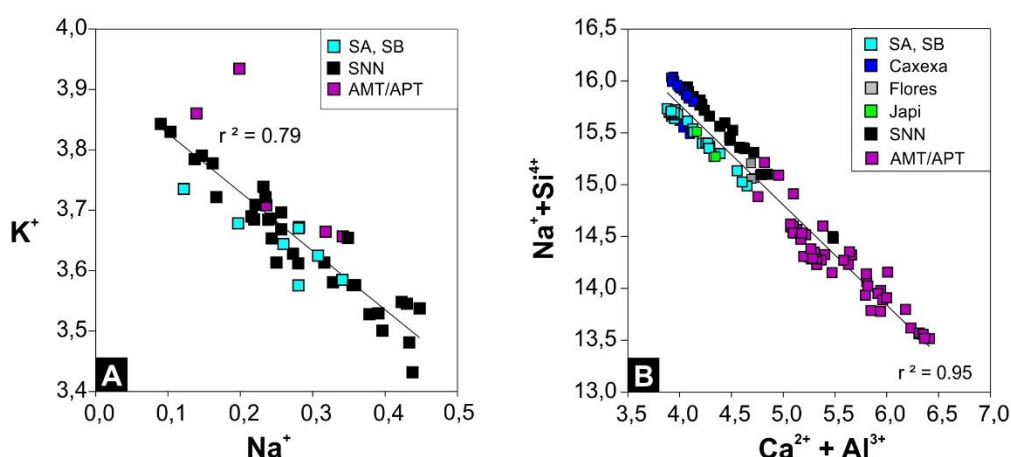


Figura VI-2. Diagramas catiônicos de substituição dos feldspatos de granitos de tipo-A dos domínios DJSC, DRPS e DZT da Província Borborema. A) substituição simples $\text{Na}^+ \leftrightarrow \text{K}^+$ (cpfu) para feldspatos potássicos (alcalinos). B) substituição acoplada $\text{Na}^+ + \text{Si}^{4+} \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{Al}^{3+}$ (cpfu) para plagioclásios. Plútons: Serra do Algodão (SA), Serra do Boqueirão (SB), Serra Negra do Norte (SNN). AMT/APT: granitos tipo-A dos terrenos Alto Moxotó e Alto Pajeú (DZT).

As substituições catiônicas típicas de feldspatos alcalinos ($\text{Na}^+ \leftrightarrow \text{K}^+$) e plagioclásios ($\text{Na}^+ + \text{Si}^{4+} \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{Al}^{3+}$) (Deer et al., 2013) explicam as principais variações composicionais observadas nos feldspatos dos granitos de tipo-A estudados (Figs. VI-2A e VI-2B). A substituição acoplada da figura VI-2B ressalta o contraste composicional entre o oligoclásio dos granitos do DZT e a albita/oligoclásio no DSJC e DRPS. Destaca ainda a individualização de dois grupos composicionais de albita: uma com teores levemente mais baixos de Na, correspondente aos plútons Serra do Algodão/Boqueirão e Japi, além de cristais do plúton Caxexa em assembleias minerais com andradita; e outra com teores mais elevados de Na, englobando o plúton Serra Negra do Norte e amostras do plúton Caxexa onde a andradita é ausente.

Adicionalmente às variações composicionais descritas, destaca-se também o comportamento do Fe^{3+} , que tende a apresentar teores mais elevados na albita dos plútons Caxexa e Serra do Algodão/Boqueirão. Curiosamente, o aumento se dá de forma aproximadamente exponencial com a diminuição do Al, a partir do oligoclásio nos granitos do DZT, em direção a albita dos plútons do DJSC (Fig. VI-3).

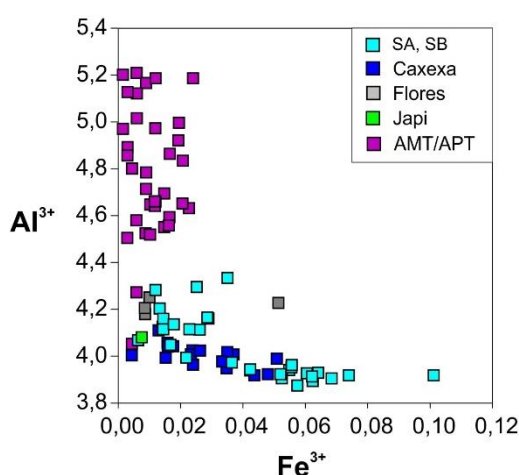


Figura VI-3. Diagrama catiônico Fe^{3+} versus Al^{3+} (cpfu) para feldspatos de granitos de tipo-A dos domínios DJSC, DRPS e DZT da Província Borborema. Plútons: Serra do Algodão (SA), Serra do Boqueirão (SB), Serra Negra do Norte (SNN). AMT/APT: granitos tipo-A dos terrenos Alto Moxotó e Alto Pajeú (DZT).

VI. 2 Clinopiroxênios

Dados de química mineral de clinopiroxênios estão disponíveis para os plútons Caxexa, Serra do Algodão, Japi (DSJC) e Serra Negra do Norte (DPRS). Comparativamente, apresentam-se também dados de clinopiroxênios dos granitos peralcalinos Catingueira e Santo Antônio, no terreno Piancó-Alto Brígida (PAB) do DZT.

Nos granitos dos plútons Japi e Serra Negra do Norte os clinopiroxênios são cálcicos e se classificam como diopsídio e augita, com composições entre $\text{Wo}_{48-51}\text{En}_{33-36}\text{Fs}_{16}$ (Japi) e $\text{Wo}_{32-49}\text{En}_{31-50}\text{Fs}_{18-25}$ (Serra Negra do Norte). Por outro lado, os plútons Caxexa e Serra do Algodão possuem clinopiroxênios cálcicos do tipo hedenbergita, com composições em torno de $\text{Wo}_{50-53}\text{En}_{10-17}\text{Fs}_{32-39}$ (Caxexa) e $\text{Wo}_{50-51}\text{En}_{13-17}\text{Fs}_{33-36}$ (Serra do Algodão), além de variedades cálcico-sódicas que se classificam como egirina-augita, com composições entre $\text{Eg}_{40-48}\text{Jd}_{0-2}\text{WEF}_{53-58}$ (Caxexa) e $\text{Eg}_{30-31}\text{Jd}_{3-4}\text{WEF}_{65-67}$ (Serra do Algodão), onde WEF = wollastonita + enstatita + ferrossilita. Neste último caso, a egirina-augita aparece em amostras que não contêm andradita. Quando esta granada é formada, o clinopiroxênio em paragênese é a hedenbergita (cf., Nascimento, 2000; Nascimento et al., 2000; 2003).

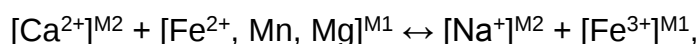
Nos granitos do PAB o clinopiroxênio se classifica como egirina-augita, com composições entre $\text{Eg}_{16-19}\text{Jd}_{2-3}\text{WEF}_{77-82}$ (Catingueira) e $\text{Eg}_{29-34}\text{Jd}_{12-15}\text{WEF}_{54-55}$ (Santo Antônio). Contudo, chama a atenção os altos teores das moléculas WEF nos cristais do plúton Catingueira, a despeito de sua afinidade peralcalina. De fato, suas composições são algo transicionais entre piroxênios do tipo QUAD e Ca-Na na classificação de Morimoto (1988), com valores dos parâmetros Q ($\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Fe}^{2+}$) e J (2Na) entre 1,5–1,63 e 0,36–0,44 cátions por fórmula unitária (cpfu), respectivamente. Entende-se, desta forma, que correspondem a variações composicionais entre Na-hedenbergita e egirina-augita.

Ao longo do eixo diopsídio-hedenbergita, as principais variações composicionais são controladas pela substituição simples (Deer et al., 2013):



tal como pode ser verificado no diagrama da Figura VI-4A para os plútons Japi e Serra Negra do Norte, e em menor escala para a hedenbergita dos plútons Caxexa e Serra do Algodão, onde as variações são mais restritas. Neste mesmo diagrama, a boa correlação negativa para o clinopiroxênio dos granitos do PAB (Catingueira e Santo Antônio) confirma o entendimento de que se tratam de composições transicionais entre Na-hedenbergita e egirina-augita.

Em direção às composições cálcico-sódicas, o aumento nos teores de Na é acompanhado também pelo incremento de Fe^{3+} (molécula Eg = egirina), o que indica a atuação da substituição acoplada (Bonin e Giret, 1984; Deer et al., 2013):



tal como confirmado pela boa correlação negativa para as análises de egirina-augita dos plútons Caxexa, Serra do Algodão e granitos do PAB no diagrama da Figura VI-4B.

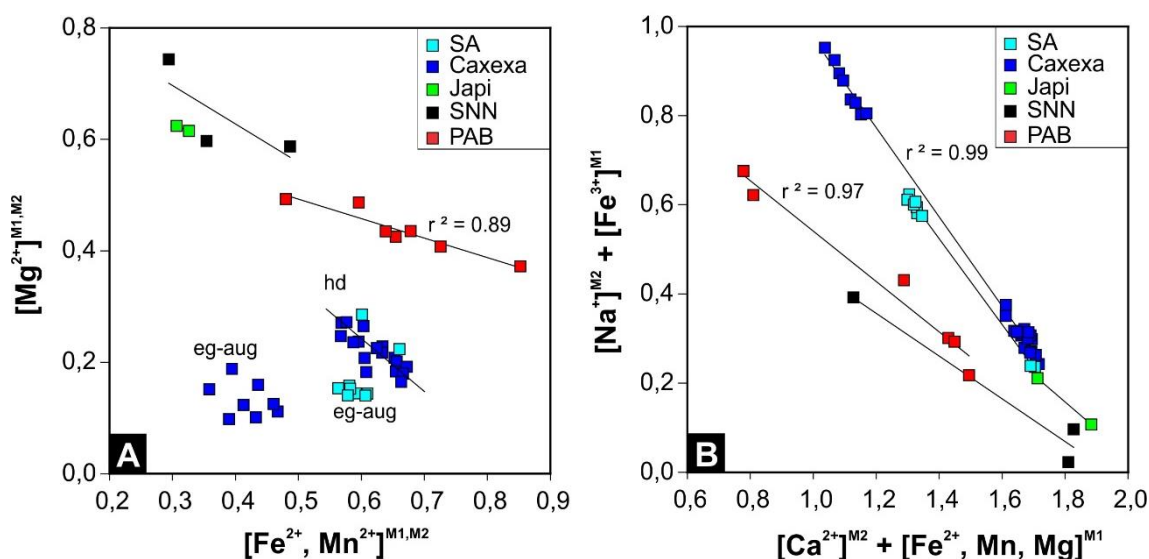


Figura VI-4. Diagramas de substituições catiônicas para piroxênios de granitos de tipo-A dos domínios DJSC, DRPS e DZT da Província Borborema. A) Substituição catiônica simples $[Mg^{2+}]^{M1,M2} \leftrightarrow [Fe^{2+}, Mn^{2+}]^{M1,M2}$ (cpfu). B) Substituição catiônica acoplada $[Ca^{2+}]^{M2} + [Fe^{2+}, Mn, Mg]^{M1} \leftrightarrow [Na^{+}]^{M2} + [Fe^{3+}]^{M1}$ (cpfu). Plútons: Serra do Algodão (SA), Serra Negra do Norte (SNN). PAB: granitos tipo-A do terreno Piancó-Alto Brígida (DZT).

O diagrama ternário Na-Mg-(Fe²⁺,Mn) pode ser utilizado para se verificar trajetórias evolutivas para piroxênios de um mesmo plúton ou de plútons de uma mesma suíte (Fig. VI-5). Para os granitos estudados, infere-se uma trajetória evolutiva marcada inicialmente pelo enriquecimento progressivo em ferro, de forma mais clara para os piroxênios cálcicos dos plútons Serra Negra do Norte, Japi, Caxexa e Serra do Algodão, bem como para as composições transicionais entre Na-hedenbergita e egrina-augita do plúton Catingueira (PAB). Em um segundo estágio, a trajetória evolutiva prossegue com um enriquecimento em sódio, resultando nas composições mais evoluídas da egrina-augita dos plútons Caxexa e Serra do Algodão. Trajetórias como esta são descritas na literatura em diversas rochas alcalinas saturadas e supersaturadas ao redor do globo (cf., por exemplo, Bonin e Giret, 1984; Njonfang e Nono, 2003; Gualda e Vlach, 2007).

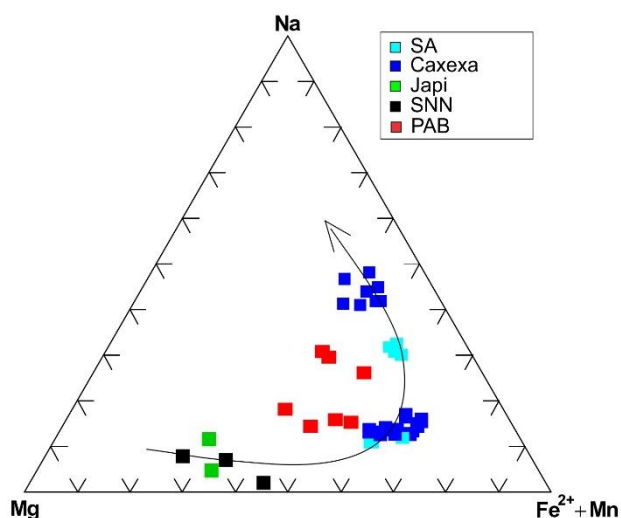


Figura VI-5. Diagrama catiônico Na-Mg-(Fe²⁺, Mn) (cpfu) para piroxênios de granitos de tipo-A dos domínios DJSC, DRPS e DZT da Província Borborema, ilustrando possível trend evolutivo para o conjunto dos dados. Plútons: Serra do Algodão (SA), Serra Negra do Norte (SNN). PAB: granitos tipo-A do terreno Piancó-Alto Brígida (DZT).

VI. 3 Anfibólios

Análises químicas de anfibólio estão disponíveis para plútons Japi e Serra Negra do Norte. Adicionalmente, são apresentadas para discussões comparativas as composições de anfibólios de granitos de tipo-A do DZT, intrusivos nos terrenos Piancó-Alto Brígida (PAB; dique Santo Antônio), Alto Moxotó e Alto Pajeú (AMT/APT), bem como no Complexo Serrinha Pedro Velho (SPV; plútons Solânea e Cabeçudo) no DSJC.

Os anfibólios são predominantemente cálcicos, com variações principalmente entre hornblenda, hastingsita e pargasita. Nos álcali-feldspato granitos e sienitos do PAB o anfibólio é sódico e corresponde a riebeckita. Contudo, a quantidade de dados disponíveis é limitada.

A nova sistemática de classificação de anfibólios recomendada pela IMA, apresentada no trabalho de Hawthorne et al. (2012), adota nomes-raízes que são modificados de acordo com variações composicionais de determinados elementos-chaves (e.g., Mg-hornblenda vs. ferro-ferri-hornblenda). A Figura VI-6 traz as composições dos anfibólios estudados distribuídos entre os principais nomes-raízes

de anfibólios cálcicos segundo Hawthorne et al. (2012). A nomenclatura completa desses anfibólios é apresentada na Tabela VI-1.

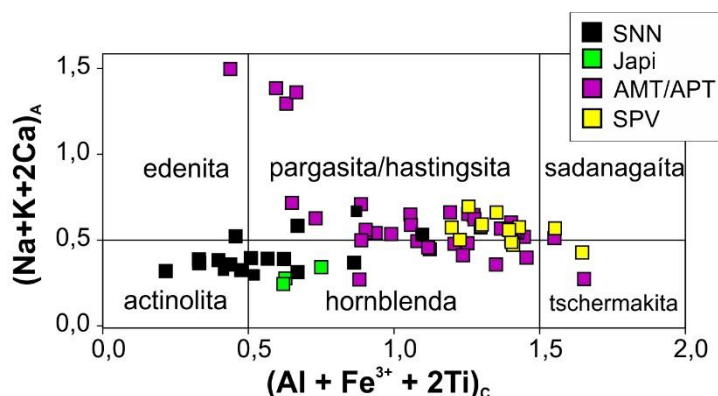


Figura VI-6. Classificação dos anfibólios cálcicos de granitos de tipo-A dos domínios DJSC, DRPS e DZT da Província Borborema segundo Hawthorne et al. (2012). SNN: Plúton Serra Negra do Norte. AMT/APT: granitos de tipo-A dos terrenos Alto Moxotó e Alto Pajeú (DZT). SPV: granitos tipo-A no Complexo Serrinha-Pedro Velho (DSJC).

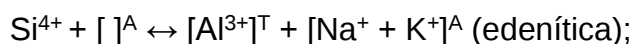
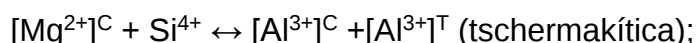
Tabela VI-1. Nomenclatura dos anfibólios estudados de acordo com Hawthorne et al. (2012).

Plúton ou Terreno	Anfibólios
Japi	Mg-ferri-hornblenda
Serra Negra do Norte	Mg-ferri-hornblenda e actinolita. Subordinadamente edenita, hastingsita/Mg-hastingsita
SPV	Predominantemente Ferro-ferri-hornblenda, hastingsita e pargasita ferro-potássica
AMT/APT	Predominantemente ferro-ferri hornblenda, variedades de pargasita (ferro-pargasita e pargasita ferro-potássica) e hastingsita/hastingsita potássica
PAB	Riebeckita e Mg-riebeckita

Os anfibólios nos plútons Japi e Serra Negra do Norte são, em linhas gerais, semelhantes, com Mg sempre maior que 2,0 cpfu e Al_{total} entre 0,476 – 1,658 cpfu. A razão $fe\#$ ($Fe/Fe+Mg$) varia entre 0,27 e 0,52. Em comparação, os anfibólios cálcicos em granitos dos terrenos AMT/APT são mais enriquecidos em Fe^{2+} ($0,55 < fe\# < 0,91$) e Al_{total} (1,38 – 2,44 cpfu), com Mg em geral $< 1,5$ cpfu. Os anfibólios dos plútons intrusivos no SPV (Solânea e Cabeçudos) mostram composições intermediárias entre os demais, com $fe\#$ entre 0,51 – 0,66 e teores de Al_{total} e Mg 1,79 – 2,32 e 1,18 – 1,89 cpfu, respectivamente.

No plúton Serra Negra do Norte, algumas análises correspondem a actinolita. Referem-se principalmente a bordas em torno de hornblenda e são caracterizadas pelos teores mais baixos de Al_{total} (0,476 – 0,692 cpfu). Campos (1997) e Campos et al. (2000) interpretam essa actinolita como de cristalização tardia e afetada por alterações em estágios pós-magmáticos/subsolidus.

As variações composicionais observadas, em especial nos teores de Al, Fe e Mg, são satisfatoriamente modeladas com as substituições tschermakítica e edenítica (e.g., Hammarstrom e Zen, 1986; Anderson e Smith, 1995; Deer et al., 2013):



tal como comprovam as boas correlações negativas nos diagramas das Figuras VI-7A e VI-7B. Para os anfibólios dos terrenos AMT/APT e SPV, a substituição tschermakítica é menos efetiva em controlar as variações de Al e Mg ($r^2 \sim 0,73$), sugerindo o envolvimento de outros vetores de troca catiônica, além de uma maior suscetibilidade da incorporação de Al com variações na temperatura por meio da substituição edenítica (cf., Fig. VI-7B; Anderson e Smith, 1995).

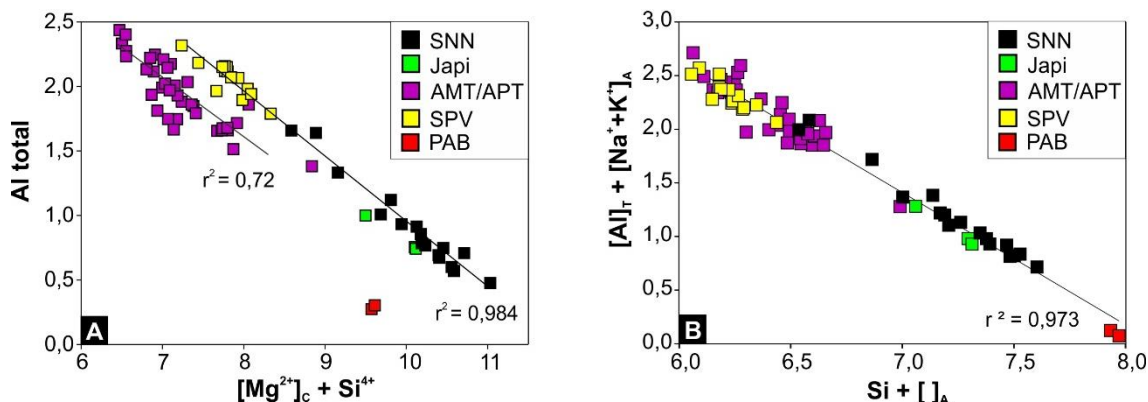


Figura VI-7. Diagramas de substituições catiônicas (cpfu) para os anfibólios de granitos de tipo-A dos domínios DJSC, DRPS e DZT da Província Borborema. A) Substituição tschermakítica, $[Mg^{2+}]_c + Si^{4+} \leftrightarrow Al_{total}$. B) Substituição edenítica $Si^{4+} + []^A \leftrightarrow [Al]_t + [Na^+ + K^+]^A$. SNN: Plúton Serra Negra do Norte. AMT/APT: granitos de tipo-A dos terrenos Alto Moxotó e Alto Pajeú (DZT). SPV: granitos tipo-A no Complexo Serrinha-Pedro Velho (DSJC). PAB: granitos tipo-A do terreno Piancó-Alto Brígida (DZT).

VI. 4 Biotita

Foram compilados dados químicos para a biotita do plúton Serra Negra do Norte e stock Flores. Para comparação, apresentam-se também as composições da biotita

presente em diversos granitos de tipo-A dos terrenos AMT/APT e SPV. De forma a completar a classificação tradicional da biotita (Fig. VI-8A), baseada nos teores de $fe\#$ ($Fe/Fe+Mg$) vs. $IVAl$ (Deer et al., 1996, 2013), adotou-se também a proposta de classificação de Tischendorf et al. (1997; Fig. VI-8B). Esta classificação é baseada em substituições envolvendo cátions de coordenação octaédrica e utiliza os índices $mgli$ [$= Mg - Li$] e $feal$ [$= Fe_{total} + Mn + Ti - Al^{VI}$]. Os conteúdos de Li foram estimados com base na equação $Li_2O = [2,7 / (0,35 + MgO)] - 0,13$ (Tischendorf et al., 1997).

A biotita presente no *stock* Flores e nos granitos dos terrenos AMT/APT é a mais enriquecida em ferro. Classifica-se como annita (Fig. VI-8A), ou Fe-biotita (*sensu* Tischendorf et al., 1997; Fig. VI-8B), com valores da razão $fe\#$ ($Fe/Fe+Mg$), entre 0,71 – 0,91 (~0,8 no *stock* Flores); os maiores valores registrados no plúton Pocinhos (Sampaio, 2005). Nos granitos do SPV, e de forma mais marcada no plúton Serra Negra do Norte, a biotita é mais magnesiânica. Neste último caso, classifica-se como annita a flogopita (Fig. VI-8A), ou Mg-biotita (*sensu* Tischendorf et al., 1997; Fig. VI-8B), com $0,38 < fe\# < 0,51$.

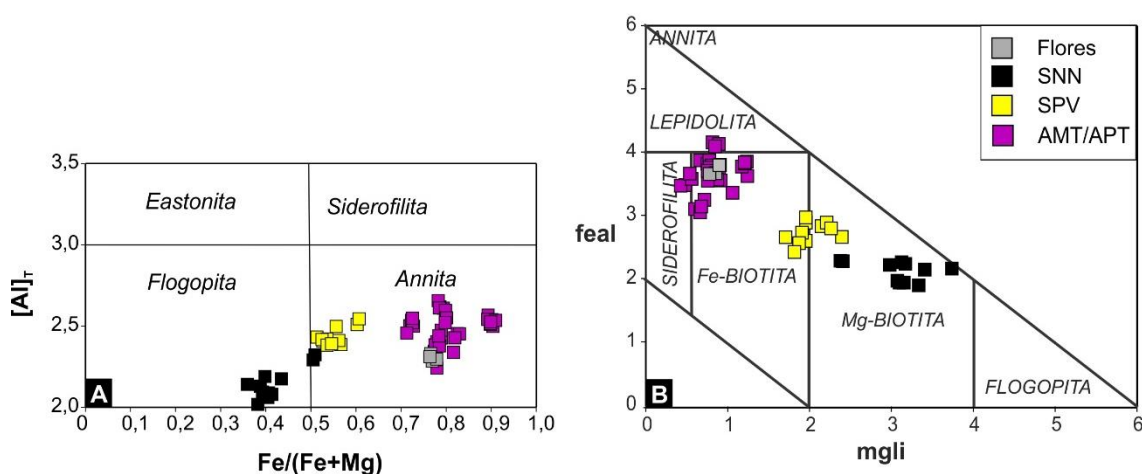


Figura VI-8. Diagramas classificatórios para biotita de granitos de tipo-A dos domínios DJSC, DRPS e DZT da Província Borborema. A) Diagrama de classificação catiônico $Fe/(Fe+Mg)$ versus Al^{IV} (cpfu) (Deer et al., 1996; 2013). B) Diagrama classificatório de Tischendorf et al. (1997) com base nos índices químicos $mgli$ [$= Mg - Li$] e $feal$ [$= Fe_{total} + Mn + Ti - Al^{VI}$]. SNN: plúton Serra Negra do Norte. AMT/APT: granitos de tipo-A dos terrenos Alto Moxotó e Alto Pajeú (DZT). SPV: granitos tipo-A no Complexo Serrinha-Pedro Velho (DSJC).

No diagrama da Figura VI-8A é também interessante notar as variações de $fe\#$ em relação aos conteúdos de $IVAl$. Enquanto no *stock* Flores e em granitos de tipo-A do DZT o aumento de Al se dá sob $fe\#$ aproximadamente constante, para o plúton Serra Negra do Norte e granitos do SPV nota-se um *trend* incipiente dados pelo

aumento concomitante do Al com a razão $fe\#$, o que indica diferentes condições redox de formação, como será discutido posteriormente. Vale mencionar que as análises com maiores teores de Al no Serra Negra do Norte referem-se a cristais de biotita em diques de microgranitos.

A Figura IV-9 traz o diagrama adaptado de Nachit et al. (2005), que utiliza a composição química da biotita por meio dos índices $Mg\#$ $[=MgO/(MgO + FeO + MnO)]$ e $Ti\#$ $[=10 \cdot TiO_2 / (10 \cdot TiO_2 + MgO + FeO + MnO)]$ para distinguir cristais magmáticos daqueles reequilibrados por processos tardios ou neoformados por fluidos hidrotermais. A biotita presente no stock Flores, bem como a maioria dos cristais de granitos do DZT plotam no campo da “biotita primária”, enquanto no plúton Serra Negra do Norte e granitos do SPV a biotita mostra composições indicativas de reequilíbrio tardi- a pós-magmático. Tal assinatura deve ser interpretada com cuidado. De fato, não se observam evidências de alteração hidrotermal mais intensa nas rochas do plúton Serra Negra do Norte e a biotita apresenta evidências texturais de coprecipitação com anfibólio, ou mesmo de cristalização anterior ao anfibólio, o que influenciará a partição Fe/Mg entre esses minerais. Neste sentido, verifica-se também que os anfibólios e a biotita do Serra Negra do Norte mostram variações composicionais que acompanham o quimismo da rocha-hospedeira (e.g., aumento concomitante de $fe\#$ em anfibólio e biotita com a razão $FeO/FeO+MgO$ em rocha-total). Ademais, Campos (1997) e Campos et al. (2000) calcularam o coeficiente de partição (K_D) de Mg/Fe para pares biotita-anfibólio no plúton Serra Negra do Norte. Os resultados mostraram uma variação do K_D entre 0,88-1,09, o que segundo os autores confirma a formação desses minerais em estágios magmáticos. Os valores de K_D próximos à unidade indicam ainda conteúdos de Mg aproximadamente iguais nos anfibólios e biotita coexistentes, o que apontam para condições mais oxidantes de formação.

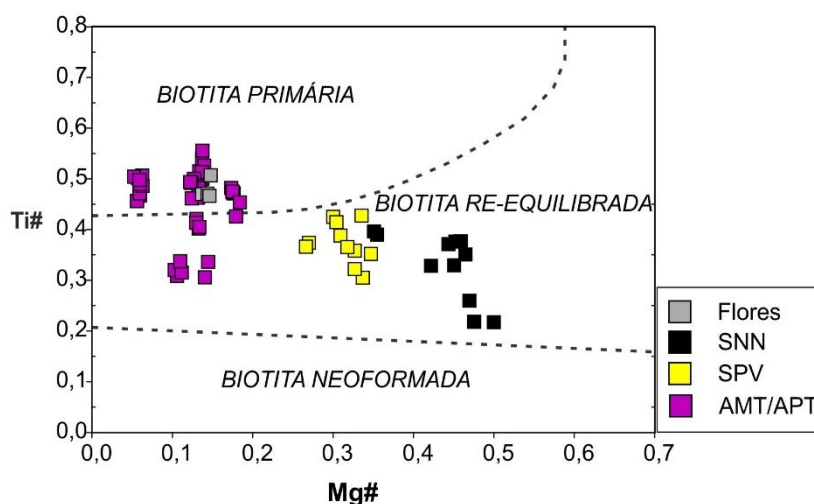


Figura VI-9. Diagrama binário $Mg\#$ $[=MgO/(MgO + FeO + MnO)]$ vs. $Ti\#$ $[=10 \cdot TiO_2 / (10 \cdot TiO_2 + MgO + FeO + MnO)]$ de Nachit et al. (2005), para biotita de granitos de tipo-A dos domínios DJSC, DRPS e DZT da Província Borborema. Este diagrama diferencia quimicamente cristais de biotita primária daqueles reequilibrados por processos tardios e cristais neoformados por fluidos hidrotermais. SNN: plúton Serra Negra do Norte. AMT/APT: granitos de tipo-A dos terrenos Alto Moxotó e Alto Pajeú (DZT). SPV: granitos tipo-A no Complexo Serrinha-Pedro Velho (DSJC).

Os diagramas catiônicos propostos por Nachit et al. (1985, ver também Stussi e Cuney, 1996) podem ser utilizados para se inferir sobre a natureza de um magma granítico através da composição de sua biotita (Fig. VI-10). Com base nos teores de Mg e Al_{total} verifica-se que a maioria das composições de biotita apontam para afinidades francamente subalcalinas de seus granitos hospedeiros. Exceções são a biotita dos granitos do SPV, em alguns granitos dos terrenos AMT/APT (plúton Serra Branca; Guimarães et al., 2004), e nos microgranitos do plúton Serra Negra do Norte, com composições de afinidades cálcio-alcalinas.

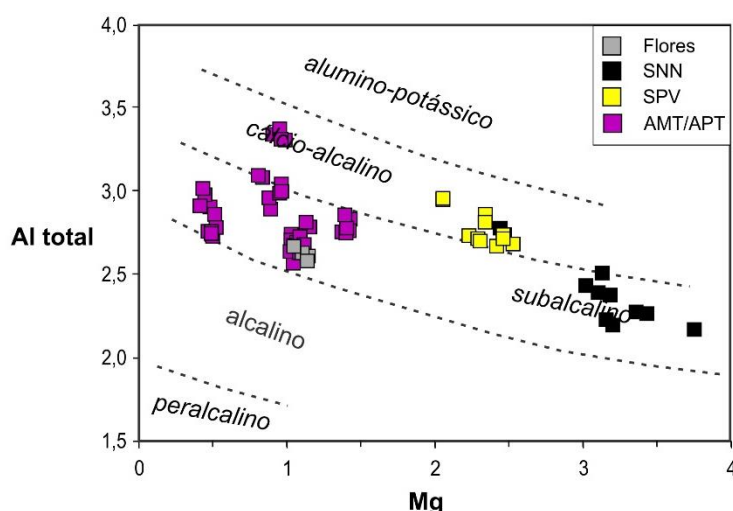


Figura VI-10. Variações composicionais da biotita de granitos de tipo-A dos domínios DJSC, DRPS e DZT da Província Borborema no diagrama catiônico Mg^{2+} vs. Al_{total} (cpfu). Limites e campos que refletem a natureza do magma original são de Nachit et al. (2005). SNN: plúton Serra Negra do Norte. AMT/APT: granitos de tipo-A dos terrenos Alto Moxotó e Alto Pajeú (DZT). SPV: granitos tipo-A no Complexo Serrinha-Pedro Velho (DSJC).

Para explicar as variações composicionais descritas acima, vários vetores de substituição simples e acoplada foram testados. Em linhas gerais, as variações são melhor modeladas pela substituição simples $(Fe^{2+}, Mn) \leftrightarrow Mg^{2+}$, além de uma substituição acoplada do tipo (Figs. VI-11A e VI-11B; Stussi e Cuney, 1996):

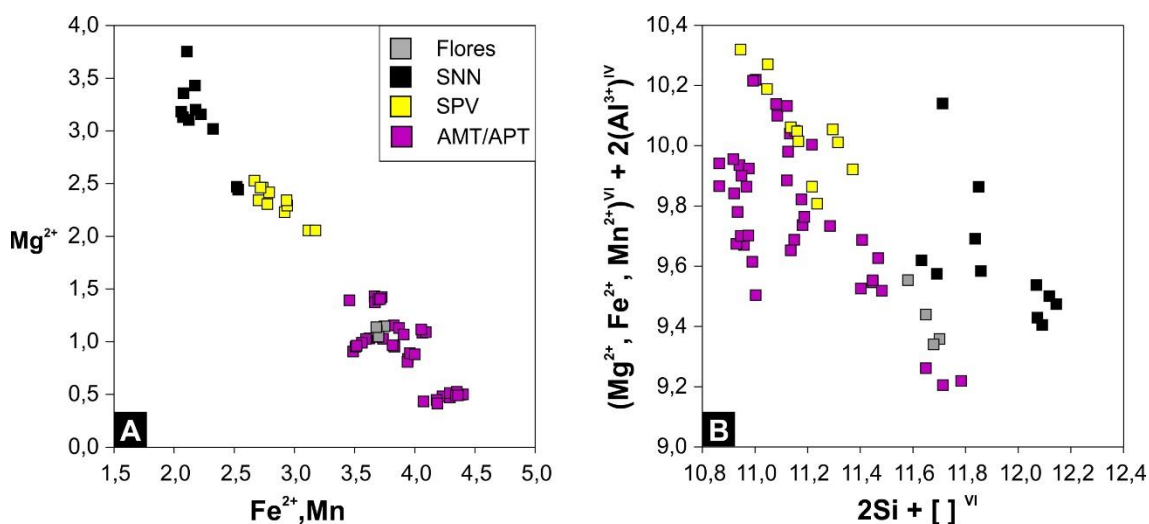
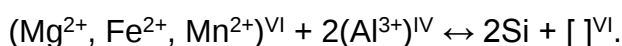
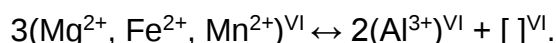


Figura VI-11. Diagrama de substituição catiônica para a biotita de granitos de tipo-A dos domínios DJSC, DRPS e DZT da Província Borborema. A) Substituição simples $(Fe^{2+}, Mn) \leftrightarrow Mg^{2+}$ (cpfu). B) Substituição acoplada do $(Mg^{2+}, Fe^{2+}, Mn^{2+})^{VI} + 2(Al^{3+})^{IV} \leftrightarrow 2Si + []^{VI}$ (cpfu). SNN: plúton Serra Negra do Norte. AMT/APT: granitos de

tipo-A dos terrenos Alto Moxotó e Alto Pajeú (DZT). SPV: granitos tipo-A no Complexo Serrinha-Pedro Velho (DSJC).

Segundo Stussi e Cuney (1996), tais substituições são as principais em biotita de granitos cálcio-alcálinos e alcalinos. Paralelamente, as variações entre os cátions de coordenação octaédrica, de forma mais clara no plúton Serra Negra do Norte, parecem também ser controladas pela substituição acoplada (Fig. VI-12A; Stussi e Cuney, 1996):



Para o Ti, observa-se um comportamento contrastante. No plúton Serra Negra do Norte e *stock* Flores, a entrada do Ti nos sítios octaédricos da biotita pode ser explicada pela saída do Mg através de uma substituição do tipo $\text{Ti}^{4+} \leftrightarrow 2\text{Mg}^{2+}$ (Fig. VI-12B). Contudo a mesma substituição não é efetiva nos demais granitos considerados, onde os teores de Mg permanecem constantes para diferentes conteúdos de Ti, o que aponta para outros tipos de substituições e/ou relações envolvidas.

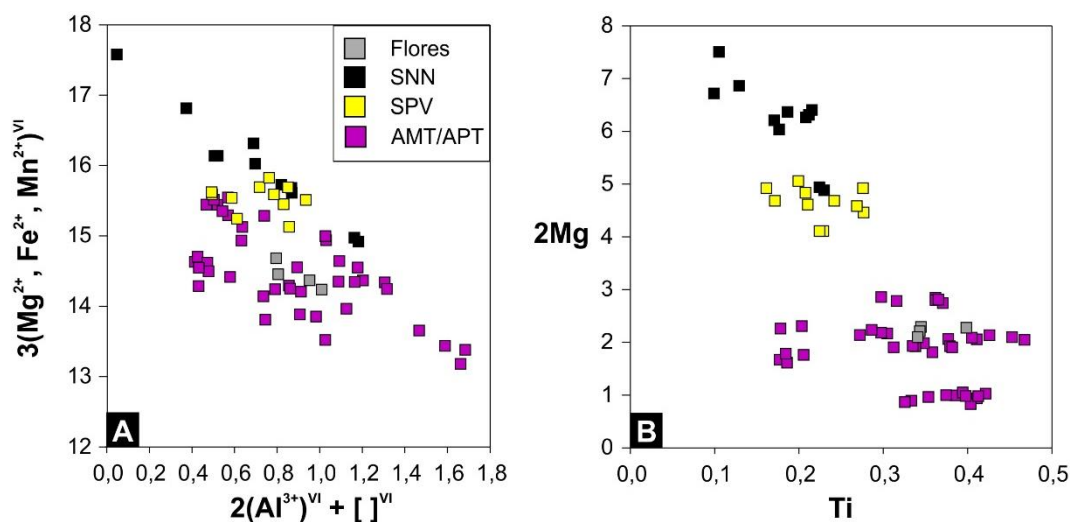


Figura VI-12. Diagramas de substituições catiônicas para a biotita de granitos de tipo-A dos domínios DJSC, DRPS e DZT da Província Borborema. A) Diagrama de substituição acoplada $3(\text{Mg}^{2+}, \text{Fe}^{2+}, \text{Mn}^{2+})^{\text{VI}} \leftrightarrow 2(\text{Al}^{3+})^{\text{VI}} + [\text{ }]^{\text{VI}}$ (cpfu). B) Diagrama de substituição simples $\text{Ti}^{4+} \leftrightarrow 2\text{Mg}^{2+}$ (cpfu). SNN: plúton Serra Negra do Norte. AMT/APT: granitos de tipo-A dos terrenos Alto Moxotó e Alto Pajeú (DZT). SPV: granitos tipo-A no Complexo Serrinha-Pedro Velho (DSJC).

CAPÍTULO VII. ARTIGO SUBMETIDO

Artigo submetido à revista Geologia USP, Série Científica

REAVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CRISTALIZAÇÃO DE GRANITOS ALCALINOS DOS DOMÍNIOS RIO PIRANHAS-SERIDÓ E SÃO JOSÉ DO CAMPESTRE, PROVÍNCIA BORBOREMA, NE DO BRASIL

Revaluation of the crystallization conditions of alkaline granites in the Rio Piranhas-Seridó and São José do Campestre Domains, Borborema Province, NE Brazil

Condições de cristalização de granitos alcalinos

Clarissa de Aguiar Dalan¹

(clarissa.dalan@gmail.com)

Frederico Castro Jobim Vilalva^{1,2}

(fredciv@ufrnet.br)

Marcos Antonio Leite Nascimento²

(marcos@geologia.ufrn.br)

¹Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Avenida Senador Salgado Filho, 3000, Caixa Postal 1596, Bairro Lagoa Nova, CEP 59078-970, Natal, RN;

²Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN.

RESUMO

As condições de cristalização (P , T , fO_2) de granitos de afinidade alcalina (tipo-A) nos domínios Rio Piranhas-Seridó e São José do Campestre (porção NE da Província Borborema) foram reavaliados a partir da aplicação múltipla de geobarômetros e geotermômetros clássicos, novas calibrações e modelagens de cristalização. Os corpos estudados são os plútons Caxexa, Serra do Algodão, Serra do Boqueirão, Olho D'Água, Japi e Serra Negra do Norte e o *stock* Flores. Os resultados revelaram pressões de alojamento entre 3,0–3,7 kbar (~11–14 km em profundidade), à exceção do plúton Japi, com pressões médias de 5,3 kbar (~20 km). Os modelamentos resultaram em temperaturas de *liquidus* entre 885–917 °C e 818 °C para o *stock* Flores, e *solidus* entre 660–700 °C. Quando presentes, clinopiroxênios, anfibólios e biotita se formam entre 813–822 °C, 728–751 °C e 750–789 °C, respectivamente. Dentre os acessórios, o geotermômetro Zr-em-titanita indica temperaturas da ordem de 780 °C (máximas de 830 °C) para o plúton Caxexa. A cristalização ocorreu sob condições essencialmente oxidantes para a maioria dos plútons ($+1,0 < \Delta_{QFM} < +2,1$; $+0,4 < \Delta_{NNO} < +1,5$), à exceção do *stock* Flores, formado sob condições levemente mais reduzidas ($\Delta_{QFM} \approx 0,0$; $\Delta_{NNO} \approx -0,6$). Os plútons associados a zonas de cisalhamento regionais são mais enriquecidos em álcalis e, em média mais profundos, reforçando o papel do controle estrutural na colocação e no contraste químico entre os granitos.

PALAVRAS-CHAVE: granitos alcalinos, geotermobarometria, Província Borborema

ABSTRACT

The crystallization conditions (P , T , fO_2) of granites of alkaline affinity (A-type) within the Rio Piranhas-Seridó and São José do Campestre domains (NE portion of the Borborema Province) were revaluated based on the application of multiple classical and new calibrations of geobarometers and geothermometers and crystallization modelling. The studied bodies are the Caxexa, Serra do Algodão, Serra do Boqueirão, Olho D'Água, Japi, and Serra Negra do Norte plutons, and the Flores *stock*. The results revealed emplacement pressures between 3.7–3.7 kbar (~11–14 km at depth), except for the Japi pluton, with an average pressure of 5.3 kbar (~20 km at depth). Crystallization modelling yielded liquidus temperatures in the range 885–917 °C, and 818 °C for the Flores *stock*, and solidus between 660–700 °C. When they are present, clinopyroxenes, amphiboles and biotite formed between 813–822 °C, 728–751 °C, and 750–789 °C, respectively. Among the accessories, the geothermometer Zr-in-titanite gave temperatures of about 780 °C (maximum of 830 °C). Crystallization took place under essentially oxidizing conditions for most of the plutons ($+1.0 < \Delta_{QFM} < +2.1$; $+0.4 < \Delta_{NNO} < +1.5$), except for the Flores *stock* formed under slightly more reduced conditions ($\Delta_{QFM} \approx 0.0$; $\Delta_{NNO} \approx -0.6$). Plutons related to regional shear zones are alkali-richer and, on average, deeper, reinforcing the role of structural control on the emplacement and on the chemical contrast among these granites.

KEYWORDS: alkaline granites, geothermobarometry, Borborema Province

1. INTRODUÇÃO

A definição acurada dos parâmetros intensivos de cristalização de magmas graníticos é de extrema importância para a proposição, caracterização e investigação de modelos petrológicos, evolutivos e metalogenéticos. Dentre diversos métodos disponíveis, estimativas geotermobarométricas por meio da composição química da rocha hospedeira e de seus principais minerais são as de uso mais amplo e frequente (Anderson, 1996; Anderson et al., 2008; Putirka, 2008). Por exemplo, as temperaturas de *liquidus* de magmas graníticos são estimadas com base nos geotermômetros de saturação em zircão (Watson e Harrison, 1983; Gervasoni et al., 2016) e apatita (Harrison e Watson, 1984), baseados nos conteúdos de Zr e P_2O_5 em rocha-total, respectivamente; uma aproximação vem recentemente sendo questionada por diversos autores (e.g., Harrison et al., 2007; Siégel et al., 2018). Por sua vez, a definição das pressões de alojamento de corpos graníticos (em especial cálcio-alcalinos) é baseada em equilíbrios minerais que seguem a regra das fases de Gibbs (Anderson, 1996; Anderson et al., 2008). Dentre esses, o consagrado geobarômetro Al-em-hornblenda (Hammarstrom e Zen, 1986; Schmidt, 1992; Anderson e Smith, 1995; Mutch, 2016) baseia-se na variação dos teores de Al em anfibólio como uma função da temperatura e da pressão. As pressões calculadas podem ser combinadas com geotermômetros para a determinação das temperaturas de cristalização, dentre os quais aquele baseado no equilíbrio hornblenda-plagioclásio é o de uso mais amplo (Holland e Blundy, 1994). Contudo, a ausência de hornblenda ou ainda composições deste anfibólio (e/ou do plagioclásio em equilíbrio) fora das calibrações disponíveis em diversos corpos graníticos representam um obstáculo por inviabilizarem a adoção desses geotermobarômetros. Esses exemplos mostram que a termobarometria de granitoides não é tarefa trivial e diversos geotermobarômetros devem ser utilizados em conjunto (respeitando as calibrações e limites de aplicação), de forma a se ter estimativas mais precisas e de significado geológico da pressão, temperatura, bem como das condições *redox* de colocação e cristalização.

Para além dos geobarômetros e geotermômetros citados, novas calibrações e modelos permitem estimar T , P e fO_2 baseados: (1) na composição química de minerais máficos isolados (e.g., Ridolfi et al., 2010) ou (2) em equilíbrio com o líquido residual (e.g., Putirka, 2008); (3) nas concentrações de determinados elementos traços em minerais acessórios (e.g., Hayden et al., 2008), (4) conteúdos normativos de quartzo, albita e ortoclásio (Yang, 2017) ou ainda (5) com base em simulações de cristalização e modelamentos químicos (e.g., Moecher et al., 2014).

Na porção setentrional da Província Borborema (NE do Brasil), a região compreendida entre os domínios tectonoestruturais São José do Campestre e Rio Piranhas-Seridó é marcada por um extenso e volumoso magmatismo granítico de idade ediacarana a cambriana, representado por batólitos, plútons e corpos menores de afinidades químicas diversas (Nascimento et al., 2015). Dentre esses, reconhece-se uma suíte de granitos de **afinidade alcalina (tipo-A), sin- a pós-colisionais** **falar que tem características de granitos sin a pós-colisionais** cujas condições de cristalização ainda não são bem definidas, ou estimadas com base em critérios qualitativos e/ou indiretos. Este trabalho propõe uma reavaliação dos parâmetros intensivos de cristalização dos granitos alcalinos desses dois domínios a partir da integração de resultados obtidos da aplicação múltipla de geotermômetros e geobarômetros clássicos, novas calibrações e modelos, aliados a simulações de cristalização com o

programa *rhyolite*-MELTS (Gualda et al., 2012). A partir das novas estimativas, apresentam-se também algumas considerações geodinâmicas.

2. CONTEXTUALIZAÇÃO GEOLÓGICA

A Província Borborema corresponde a um cinturão orogênico meso-neoproterozoico que envolve a colagem de blocos crustais mais antigos (arqueanos a paleoproterozoicos) e unidades supracrustais proterozoicas, agrupadas em diferentes terrenos e domínios tectonoestratigráficos. Em seu extremo nordeste, a província é subdividida em três domínios (Angelim et al., 2006): Jaguaribeano, Rio Piranhas-Seridó (RPS) e São José do Campestre (SJC). Nesta região (e na província como um todo), uma importante feição geológica é a ocorrência de um extenso e volumoso magmatismo granítico (*lato sensu*) sin- a pós-orogênico durante os períodos Ediacarano e Cambriano (Fig. 1). Nos Domínios RPS e SJC, este magmatismo é agrupado em seis suítes com características petrográficas e químicas distintas: shoshonítica, cálcio-alcalina de alto K porfirítica, cálcio-alcalina de alto K equigranular, cálcio-alcalina, alcalina e alcalina charnoquítica (Nascimento et al, 2015). Granitoides de assinatura química alcalina (tipo-A) compõem a suíte alcalina. Tal como inicialmente definida por Nascimento et al. (2015), este suíte inclui a fácies alcalina do plúton Japi e os plútons Caxexa, Serra do Algodão, Serra do Boqueirão e Olho D'Água no Domínio SJC, e Serra Negra do Norte no Domínio RPS. Adicionalmente, este trabalho incorpora à suíte o *stock* Flores (RPS), recentemente estudado por Souza et al. (2017) que reconheceram assinatura de tipo-A para este corpo, anteriormente inserido na suíte cálcio-alcalina de alto K equigranular (Nascimento et al., 2015). Essas rochas estão alojadas em gnaisses migmatíticos arqueanos a paleoproterozoicos do Domínio SJC, e em gnaisses migmatíticos paleoproterozoicos do Complexo Caicó e rochas supracrustais do Grupo Seridó no Domínio RPS.

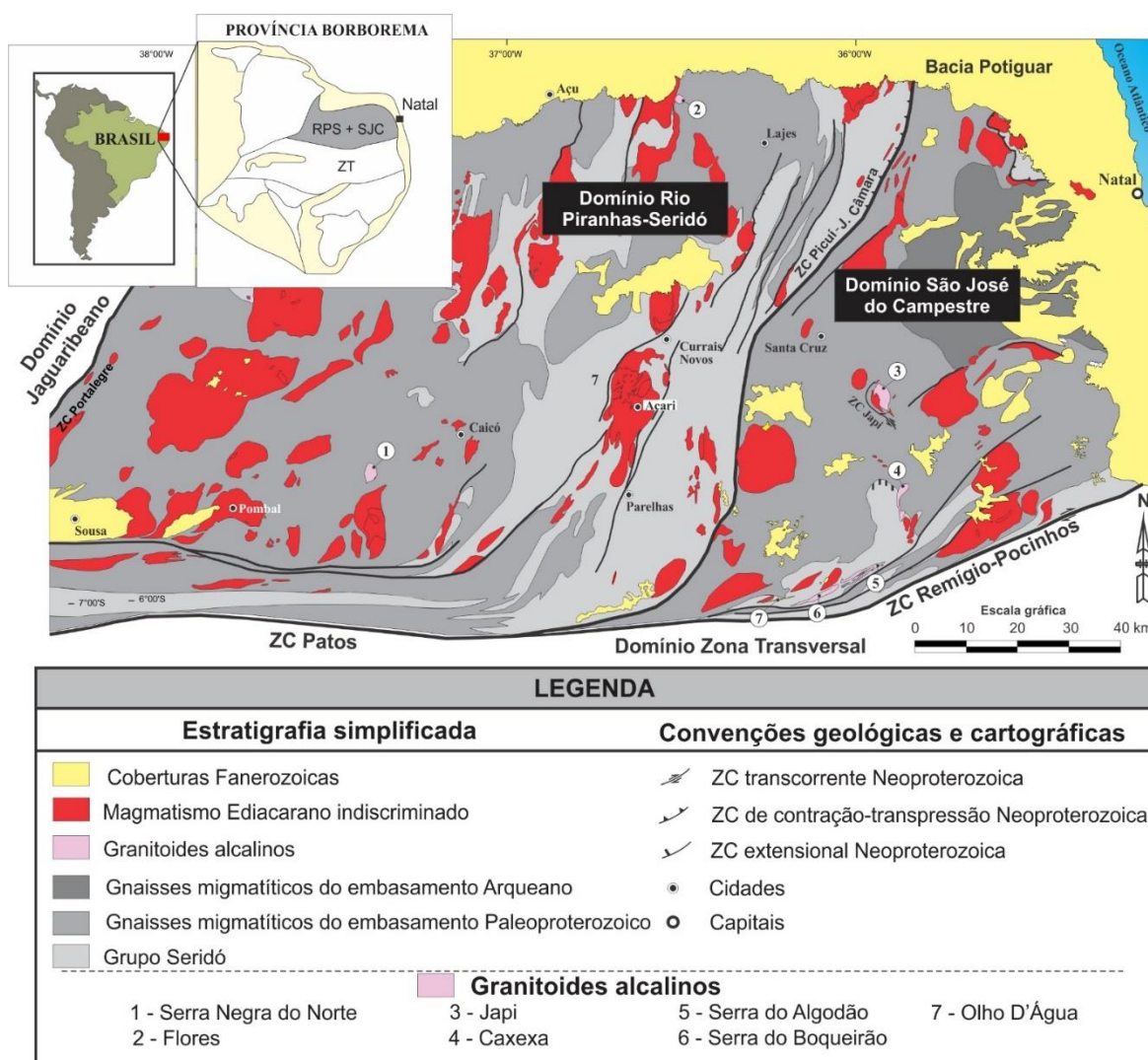


Figura 1. Esboço geológico dos Domínios Rio Piranhas-Seridó (RPS) e São José do Campestre (SJC), NE da Província Borborema, com ênfase no magmatismo ediacarano. Os granitoides alcalinos (em rosa) são identificados pelos números de 1 a 7. ZC: Zona de cisalhamento. ZT: Domínio da Zona Transversal. Fonte: Modificado de Nascimento et al. (2015).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Dados petrográficos, litoquímicos e de química mineral disponíveis para os plútons estudados, bem como alguns dados ainda inéditos dos autores e pesquisadores associados foram compilados para a elaboração de um banco de dados. A Tabela 1 traz as referências consultadas e o quantitativo de dados compilados. Dados químicos (rocha-total e química mineral) de ocorrências clássicas de granitos de tipo-A do Domínio da Zona Transversal da Província Borborema foram também reunidos de forma preliminar para eventuais comparações e estão disponíveis para consulta diretamente com os autores.

As informações petrográficas foram checadas e completadas a partir da descrição em microscópio petrográfico de lâminas delgadas dos plútons Caxexa (15

lâminas), Serra Negra do Norte (11 lâminas) e Flores (32 lâminas) provenientes da coleção dos autores e pesquisadores associados.

Os dados de química mineral de feldspatos (plagioclásio e feldspato alcalino), clinopiroxênios, anfibólios e biotita foram recalculados para se obter as fórmulas estruturais e proporções catiônicas. Nos feldspatos, os cálculos foram feitos na base de 32 oxigênios, considerando $Fe_{total} = Fe^{3+}$ (Deer et al., 2013). Para os piroxênios, a fórmula estrutural e a partição Fe^{2+}/Fe^{3+} foram calculadas na base de 4 cátions totais e 6 oxigênios (Droop, 1987). A classificação dos anfibólios segue as novas recomendações da IMA (Hawthorne et al., 2012). A partição Fe^{2+}/Fe^{3+} pelo método de Schumacher (1997), adotando-se as estimativas máximas de Fe^{3+} . Para a biotita, a fórmula estrutural foi computada na base de 22 oxigênios, assumindo-se $Fe_{total} = Fe^{2+}$ (Dymek, 1983).

Visando a aplicação do geotermômetro Zr-em-titanita de Hayden et al. (2008), os teores de Zr (ppm) em cristais de titanita primária do plúton Caxexa foram quantificados por ablação a laser (*laser ablation*) no laboratório de LA-ICP-MS do Instituto de Geociências da USP, em um espectrômetro ICP-MS quadrupolo modelo iCAP Q da Thermo Scientific, acoplado a um sistema de *laser ablation* modelo UP-213 da ESI-New Wave. Quatro cristais de titanita foram analisados em seções delgado-polidas de 100 μm . Os experimentos de ablação foram feitos com uma fluência de energia de 3,6 J/cm², frequência de repetição e diâmetro do laser de 15 Hz e 40 μm , respectivamente. O tempo total de aquisição foi de 120 s, igualmente dividido entre leitura do *background* e aquisição do sinal iônico do isótopo ⁹¹Zr, seguido por 30s de *washout time*. O padrão externo foi o NIST-SRM 610, e os teores médios de CaO (% peso) na titanita do Caxexa, obtidos via microsonda eletrônica por Nascimento (2000), serviram de padrão interno. A redução dos dados, correção do *drift* do equipamento, tratamento e conversão das intensidades em concentrações (ppm) foram efetuadas com o programa *Glitter* (van Achterbergh et al., 2001).

Geotermobarometria

Os dados químicos (rocha-total e química mineral) foram utilizados para calcular os parâmetros intensivos de cristalização (P, T, fO_2) dos granitos alcalinos dos domínios RPS e SJC. A Tabela 2 lista os geobarômetros e geotermômetros e utilizados. Para os geobarômetros baseados no conteúdo de Al em anfibólio, foram consideradas apenas análises com valores da razão $Fe/(Fe+Mg)$ entre 0,4–0,65 (cf. Anderson e Smith, 1995). O geobarômetro de Yang (2017) estima a pressão de colocação de magmas graníticos a partir de equações polinomiais baseadas nos conteúdos normativos de quartzo (Qz), albita (Ab) e ortoclásio (Or). Este geobarômetro foi recentemente testado por Dou et al. (2018) que propuseram uma série de cuidados a serem tomados em sua utilização os quais são aqui seguidos. Adicionalmente, nossos testes mostraram resultados mais robustos e de melhor significado geológico ao se usar as quantidades normativas de Qz, Ab e Or corrigidas pelos conteúdos de anortita (An), de acordo com a aproximação de Blundy e Cashman (2001).

As temperaturas de *liquidus*, *solidus* e de cristalização de clinopiroxênio, anfibólio, biotita e zircão foram também obtidas através de múltiplas simulações de cristalização com o programa *rhyolite-MELTS* (Gualda et al., 2012). As simulações foram feitas com pressão constante, estimadas a partir dos geobarômetros listados na Tabela 2, em intervalos de 5 °C a partir da $T_{liquidus}$. Duas amostras de cada plúton

foram modeladas. Dada a semelhança petrográfica e química entre os plútons Caxexa, Serra do Algodão, Boqueirão e Olho D'Água, optou-se por modelar apenas amostras do Plúton Caxexa como representativas desse grupo. Um teor mínimo de H₂O de 4,0% foi considerado nos cálculos para os plútons portando anfibólio e/ou biotita (cf., Naney, 1983; Dall'Agnol et al., 1999). Para o plúton Caxexa, um teor mínimo de 2,5% de H₂O foi estimado de acordo com Holtz et al. (2001).

Os modelamentos das temperaturas de cristalização de zircão com o *rhyolite-MELTS* seguem a proposta de Moecher et al. (2014). Para cada intervalo de 5°C calculou-se o parâmetro catiônico M [(Na+K+2Ca)/(Al*Si); Watson e Harrison, 1983; Miller et al., 2003] a partir das composições modeladas do líquido em equilíbrio (*melt*). Com os valores de M pode-se prever as temperaturas de saturação em zircão (T_{satZr}) para cada 5°C do intervalo de cristalização usando a relação (Watson e Harrison, 1983):

$$Zr_{M,T} = 49.6000 \exp\{[3.8 + (0.85 * (M - 1))] - 12900/T(^{\circ}K)\}.$$

As concentrações de Zr foram calculadas usando a equação:

$$Zr_{M,T} = C_0/F,$$

onde C₀ corresponde ao conteúdo de Zr (ppm) em rocha-total e F é a fração de líquido (*melt*) remanescente a cada temperatura. Os modelamentos assumem que o Zr é incompatível em outras fases minerais até que a saturação em zircão seja alcançada. Desta forma, a temperatura na qual o zircão inicia sua cristalização é atingida quando $Zr_{M,T} = Zr_{líquido(melt)}$.

4. A SUÍTE ALCALINA: SÍNTESE TEXTURAL E QUÍMICA

Apresenta-se a seguir uma síntese dos principais aspectos e características geológicas, petrográficas, litoquímicas e de química mineral para os granitos alcalinos dos Domínios SJC e RPS (Tab. 1). Os dados são confrontados com aqueles disponíveis para granitos de tipo-A no Domínio da Zona Transversal (Fig. 1), que incluem basicamente riebeckita-egirina-augita álcali-feldspato granitos e sienitos peralcalinos do Terreno Piancó-Alto Brígida (e.g., Plúton Catingueira; Galindo e Sá, 2000) e hornblenda ± biotita sieno- a monzogranitos meta- a peraluminosos dos terrenos Alto Moxotó e Alto Pajeú (e.g., plútons Queimadas, Pilõezinhos e Bravo; Guimarães et al., 2004; Lages et al., 2016; Lima et al., 2017).

4. 1 Petrografia e Litoquímica

Petrograficamente, a suíte alcalina divide-se em dois grupos: (1) álcali-feldspato granitos, sienitos e sienogranitos subordinados nos plútons do Domínio SJC; e (2) sieno- a monzogranitos nos corpos intrusivos no Domínio RPS. São rochas em geral equigranulares de textura fina a média, de caráter peraluminoso a metaluminoso e com afinidades alcalinas a álcali-cálcicas bem marcadas em diagramas litoquímicos (Fig. 2). A sequência de cristalização de cada corpo é apresentada na Figura 3.

Plútons alcalinos no Domínio São José do Campestre (SJC)

i) *Japi*: corpo elipsoidal com ~60 km² intrusivo na porção central do Domínio SJC e alojado na Zona de Cisalhamento Japi (Fig. 1). Além de uma fácies alcalina, inclui

também rochas básico-intermediárias, granitos porfíricos e leucomicrogranitos. A fácies alcalina inclui sienogranitos, quartzo álcali-feldspato sienitos e quartzo sienitos hololeucocráticos a leucocráticos, com textura equigranular fina. Ca-anfibólios e Ca-clinopiroxênios são os máficos principais. Titanita, apatita, zircão e opacos são acessórios mais importantes. Os parâmetros litoquímicos são SiO₂ entre 67,8–76,7 %, Na₂O+K₂O entre 8,0–10,9 %, razões A/CNK [Al₂O₃/(CaO + Na₂O + K₂O) molar] entre 0,88–1,07 e fe# (FeO/FeO+MgO) entre 0,78–0,99 (Hollanda, 1998; Hollanda et al., 1999).

ii) *Caxexa*: corpo de forma alongada (~50 km²) na direção N-S, com inflexão para NE na sua porção norte, intrusivo na interface milonítica entre gnaisses migmatíticos do Complexo Caicó e micaxistos do Grupo Seridó, na parte lateral a norte da Zona de Cisalhamento Remígio-Pocinhos (Fig. 1; Jardim de Sá et al., 1999). Compõe-se de álcali-feldspato granitos com Ca- ou Ca-Na-clinopiroxênios, hololeucocráticos, com textura equigranular fina. Andradita é uma fase acessória importante, além de titanita, apatita, zircão, allanita e magnetita. Os parâmetros litoquímicos são SiO₂ entre 69,0–76,2 %, Na₂O+K₂O entre 8,48–10,8 %, A/CNK e fe# entre 0,92–1,05 % e 0,86–0,98, respectivamente (Nascimento, 2000; Nascimento et al., 2003).

iii) *Serra do Boqueirão, Serra do Algodão e Olho D'Água*: corpos relativamente pequenos (~30 km² em média) com formas alongadas na direção NE-SW, alojados ao longo da porção central da Zona de Cisalhamento Remígio-Pocinhos (Fig. 1) e cortando rochas do Complexo Caicó e Grupo Seridó. Incluem álcali-feldspato granitos e sienitos com mineralogia máfica e acessória idêntica ao Caxexa. Os parâmetros litoquímicos são SiO₂ entre 68,9–76,8 % (em peso), Na₂O+K₂O entre 9,02–11,7 %, A/CNK e fe# entre 0,94–1,09 e 0,76–1,0, respectivamente (Nascimento, 1998; Nascimento et al., 2010).

Plútons alcalinos no Domínio Rio Piranhas-Seridó (RPS)

iv) *Serra Negra do Norte*: corpo levemente elíptico com ~48 km² intrusivo nos gnaisses-migmatíticos do Complexo Caicó (Fig. 1). Engloba três fácies petrográficas: (1) hornblenda-biotita (± Ca-clinopiroxênio) monzo-sienogranitos (fácies predominante) que são cortados por (2) monzogranitos róseos com hornblenda e (3) diques micrograníticos. Acessórios comuns são a titanita, zircão, apatita, allanita, epidoto e magnetita. Os parâmetros litoquímicos são SiO₂ entre 66,2–76,23 % (em peso), Na₂O+K₂O entre 6,24–10,4 %, razão A/CNK entre 0,84–1,44 e fe# entre 0,56–0,9 (Campos, 1997; Campos et al., 2000).

v) *Flores*: *stock* subcircular (~8 km²) levemente alongado na direção NW, intrusivo no Complexo Caicó e em *augen* gnaisses da suíte Poço da Cruz, na região centro-norte do Domínio RPS. O *stock* é formado por biotita monzogranitos cinzentos a rosados, equigranulares, de granulação fina a média, por vezes com intercrescimentos granofíricos. Os minerais acessórios incluem titanita, apatita, zircão, allanita, magnetita e fluorita. Os parâmetros litoquímicos são SiO₂ entre 71,4–74,8 % (em peso), Na₂O+K₂O entre 8,26–9,08 %, razões A/CNK e fe# entre 0,98–1,08 e 0,80–0,94, respectivamente (Souza, 2016; Souza et al., 2017).

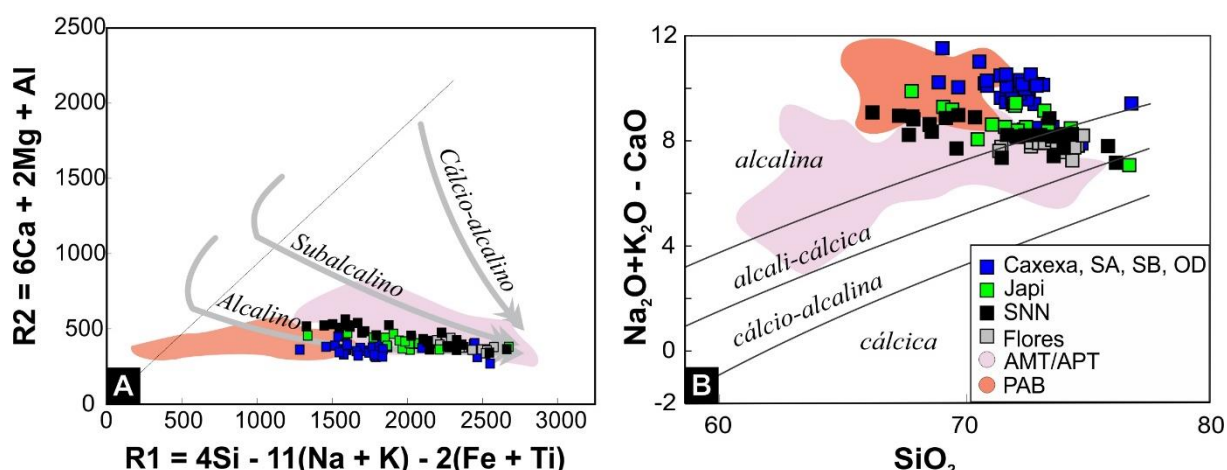


Figura 2. Diagramas discriminantes de séries magmáticas para os granitos alcalinos dos Domínios RPS e SJC da Província Borborema. Granitos de tipo-A da Zona Transversal (ZT) são também plotados para comparação. A – Diagrama catiônico R1-R2 (De La Roche et al., 1980) destacando o alinhamento dos plútons estudados com a trajetória típica de rochas da série alcalina. B – Diagrama SiO_2 versus $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}$ (% em peso; Frost et al., 2001) mostrando a assinatura alcalina a álcali-cálcica dos plútons estudados. Legenda: SA – Serra do Algodão; SB – Serra do Boqueirão; OD – Olho D'Água; SNN – Serra Negra do Norte; AMT/APT – Terrenos Alto Moxotó/Alto Pajeú (ZT); PAB – Piancó-Alto Brígida (ZT).

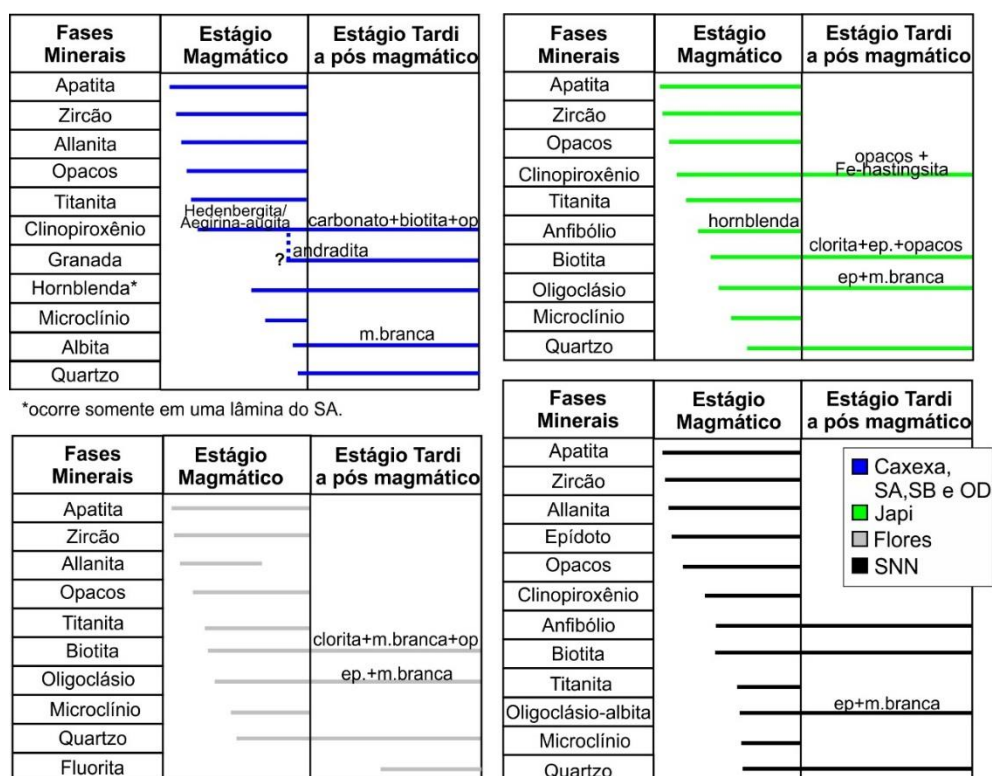


Figura 3. Sequências de cristalização dos plútons alcalinos dos Domínios RPS e SJC da Província Borborema. Legenda – op: opacos; m.branca: mica branca; ep.: epidoto; Plútons: SA – Serra do Algodão; SB – Serra do Boqueirão; OD – Olho D'Água; SNN – Serra Negra do Norte.

4.2. Quimismo mineral

Mineralogia félsica

Nos plútons Caxexa, Japi, Serra do Algodão/Boqueirão/Olho D'Água os feldspatos são ortoclásio/microclínio ($An_0Ab_{3-9}Or_{91-97}$) e albita com composições próximas ao membro-final ($An_{0-9}Ab_{90-99}Or_{1-5}$) (Nascimento et al., 2003; Nascimento et al., 2010). No plúton Serra Negra do Norte, o microclínio possui composições entre $An_{0-1}Ab_{2-11}Or_{88-97}$ e o plagioclásio varia de albita a oligoclásio sódico ($An_{1-9}Ab_{90-99}Or_{0-2}$ a $An_{10-19}Ab_{80-88}Or_{1-2}$) (Campos et al., 2000). Já no *stock* Flores, o plagioclásio típico é um oligoclásio sódico ($An_{12-13}Ab_{85-87}Or_{1-2}$) (Galindo et al., 2012).

Mineralogia máfica

Clinopiroxênios são os máficos principais nos plútons Caxexa, Serra do Algodão/Boqueirão/Olho D'Água. São do tipo hedenbergita ($Wo_{50-53}En_{10-17}Fs_{32-39}$) ou egrina-augita (Caxexa: $Eg_{40-48}Jd_{0-2}Wef_{53-58}$; Serra do Algodão: $Eg_{30-31}Jd_{3-4}Wef_{65-67}$, onde WEF = wollastonita + enstatita + ferrossilita). Esta última aparece em amostras que não contêm andradita. Quando esta granada é formada, o clinopiroxênio em paragênese é a hedenbergita (Nascimento, 2000; Nascimento et al., 2003). Já nos plútons Japi e Serra Negra do Norte os clinopiroxênios são ora fase máfica principal em conjunto com anfibólios (Japi), ora fase acessória (Serra Negra do Norte). Classificam-se como diopsídio e augita, com composições entre $Wo_{48-51}En_{33-36}Fs_{16}$ (Japi) e $Wo_{32-49}En_{31-50}Fs_{18-25}$ (Serra Negra do Norte). Para os granitos do plúton Japi, cabe ressaltar que a classificação química do clinopiroxênio como diopsídio destoa daquela inferida oticamente por Hollanda (1998) como augita sódica.

O diagrama ternário Na-Mg-(Fe^{2+} , Mn) pode ser utilizado para se verificar trajetórias evolutivas de piroxênios em um mesmo plúton ou em plútons de uma mesma suíte (Fig. 4a). Para os granitos estudados, infere-se uma trajetória evolutiva marcada inicialmente pelo enriquecimento progressivo em ferro, de forma mais clara para os piroxênios cálcicos dos plútons Serra Negra do Norte, Japi, Caxexa e Serra do Algodão. Em um segundo estágio, a trajetória evolutiva prossegue com um enriquecimento em sódio, resultando nas composições mais evoluídas da egrina-augita dos plútons Caxexa e Serra do Algodão. Trajetórias como esta são descritas na literatura em diversas rochas alcalinas saturadas e supersaturadas ao redor do globo (cf., por exemplo, Bonin e Giret, 1984; Njonfang e Nono, 2003; Gualda e Vlach, 2007).

Anfibólios são encontrados nos plútons Japi e Serra Negra do Norte. Correspondem, em linhas gerais, a Mg-ferri-hornblenda, com Mg sempre maior que 2,0 cpfu e Al_{total} entre 0,476 – 1,658 cpfu. A razão $fe\#$ ($Fe/Fe+Mg$) varia entre 0,27 e 0,52. Actinolita é subordinada plúton Serra Negra do Norte. É de cristalização tardia/subsolidus (Campos et al., 2000), como bordas em torno de hornblenda e são caracterizadas pelos teores mais baixos de Al_{total} (0,476 – 0,692 cpfu). Actinolita tardia também é descrita no plúton Serra do Algodão (Nascimento, 1998). As variações composicionais observadas são satisfatoriamente modeladas com as substituições tschermakítica e edenítica (Hammarstrom e Zen, 1986; Anderson e Smith, 1995; Deer et al., 2013; Fig. 4b).

Biotita é o máfico principal no *stock* Flores e plúton Serra Negra do Norte (em paragêneses com anfibólio). Possui composições mais anníticas no *stock* Flores (Fig. 4c; Galindo et al., 2012), com razão $fe\#$ ~0,8. No plúton Serra Negra do Norte, a biotita

é mais magnesiânica (Fig. 4c) e ocorre intercrescida com anfibólio (Campos, 1997; Campos et al., 2000), com a razão $fe\#$ variando entre 0,38–0,51.

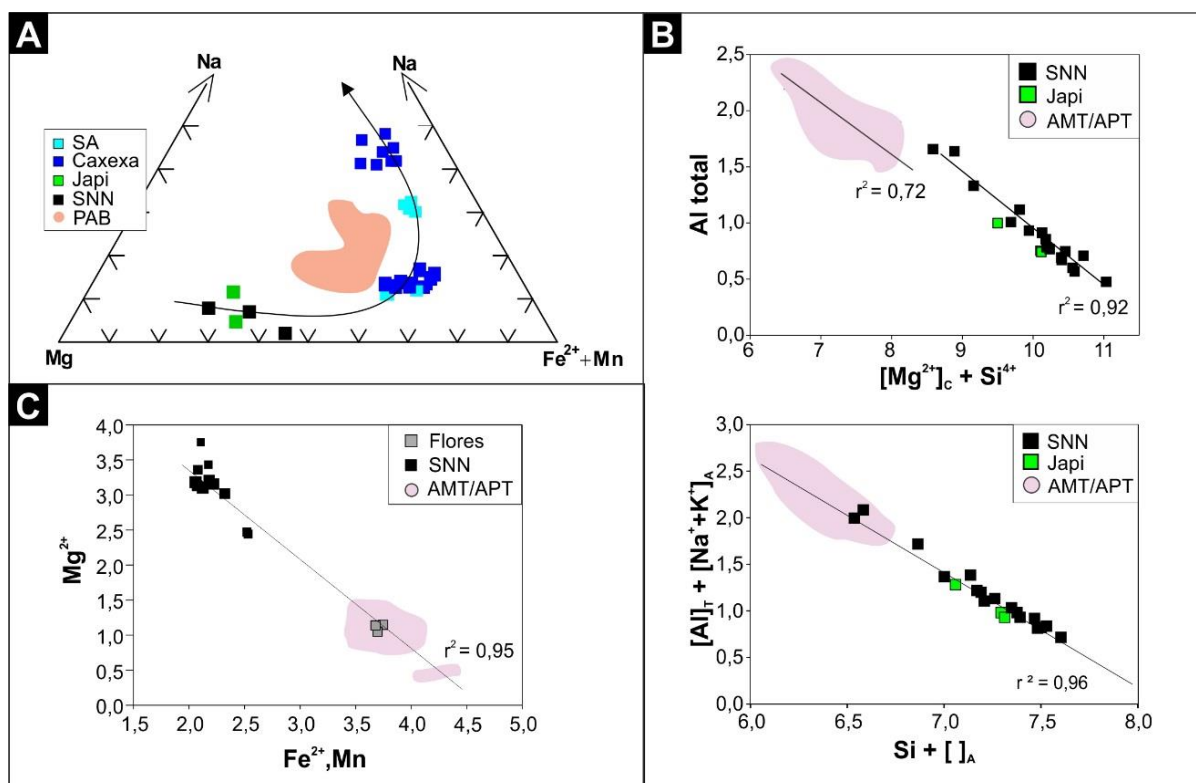


Figura 4. Diagramas de variação catiônica para os principais minerais máficos dos granitos alcalinos dos Domínios RPS e SJC da Província Borborema. Os diagramas também mostram as variações químicas nos piroxênios de granitos de tipo-A da Zona Transversal (ZT) para comparação. A – Diagrama catiônico Na-Mg-(Fe^{2+} , Mn) (cpfu) para clinopiroxênios ilustrando possível trajetória evolutiva para o conjunto dos dados. B – Diagramas binários catiônicos (cpfu) para os anfibólios dos granitos estudados ilustrando as substituições tschermakítica, $[Mg^{2+}]_C + Si^{4+} \leftrightarrow Al_{total}$; e edenítica $Si^{4+} + []_A \leftrightarrow [Al]_T + [Na^{+} + K^{+}]_A$. C – Diagrama de substituição catiônica $Fe^{2+}(+Mn) \leftrightarrow Mg^{2+}$ (cpfu) para a biotita dos granitos estudados. Plútons: Serra do Algodão (SA), Serra Negra do Norte (SNN). PAB: Terreno Piancó-Alto Brígida (ZT), AMT/APT: Terrenos Alto Moxotó/Alto Pajeú (ZT).

Tabela 1. Plútons alcalinos dos Domínios Rio Piranhas-Seridó e São José do Campestre, Província Borborema, com as respectivas idades, principais referências, litologias principais e número de análises de litoquímica e química mineral compiladas

para este trabalho. Legenda – Ma: milhões de anos, hbl: hornblenda, bt: biotita, qz: quartzo, pl: plagioclásio, cpx: clinopiroxênio; Af: feldspato alcalino.

Contexto Geotectônico →	Domínio Rio Piranhas-Seridó		Domínio São José do Campestre		
Plúton	Serra Negra do Norte	Flores	Japi	Caxexa	S. Algodão, S. Boqueirão, Olho d'Água
Idade	547±47 Ma	553 ± 4 Ma	599± 3 Ma	578 ± 14 Ma	529 ± 54 Ma
Referências	Campos (1997); Campos et al. (2000)	Galindo et al. (2012); Souza (2016); Souza et al. (2017)	Hollanda (1998); Hollanda et al. (1999)	Nascimento (2000); Nascimento et al. (2001); Nascimento et al. (2003)	Nascimento (1998) Nascimento et al. (2003); Nascimento et al. (2010)
Litologia predominante^(a)	hbl-bt sieno-monzogranitos, álcali-feldspato granitos	bt monzogranitos	hbl-cpx sieno-monzogranitos	cpx-álcali-feldspato granitos	cpx-álcali-feldspato granitos e sienitos, qz-álcali-feldspato sienitos
Litoquímica (nº análises)	29	15	19	21	15
Química Mineral (nº análises)	Af(18); pl(25); hbl(17); bt(11); cpx(3)	pl(4); bt(4)	Af(1); pl(1); hbl(3); cpx(2)	Af(19); cpx(25)	Af(25); pl(4); cpx(9)

Tabela 2. Relação dos geobarômetros e geotermômetros utilizados para estimativas de pressão e temperatura para os plútons alcalinos dos Domínios Rio Piranhas-Seridó e São José do Campestre, Província Borborema. *Temperaturas modeladas de cristalização dos minerais. Plútons – Cx: Caxexa; SA: Serra do Algodão; SB: Serra do Boqueirão; OD: Olho D'Água.

GEOBARÔMETROS	Abreviações	Cx, SA, SB e OD				
		SNN	Flores	Japi		
Yang (2017) - Qz-Ab-Or normativo	Yang2017	✓	✓	✓	✓	
Hammarstrom e Zen (1986) - Al-em-hornblenda	HZ1986	✓		✓		
Johnson e Rutherford (1989) - Al-em-hornblenda	JR1989	✓		✓		
Schmidt (1992) - Al-em-hornblenda	S1992	✓				
Mutch et al (2016) - Al-em-hornblenda	M2016	✓		✓		
Putirka (2008) - clinopiroxênio-líquido	P2008					✓
GEOTERMÔMETROS						
Watson e Harrison (1983) - saturação em zircão	Tsat_{zr}	✓	✓	✓	✓	
Gualda et al. (2012) - Rhyolite-MELTS <i>liquidus</i>	T_{liquidus}	✓	✓	✓	✓	
Gualda et al. (2012) - Rhyolite-MELTS cristalização de zircão*	T_{zr Melts}	✓	✓	✓	✓	
Gualda et al (2012) - Rhyolite-MELTS cristalização de biotita*	T_{Bt Melts}	✓	✓			
Gualda et al (2012) - Rhyolite-MELTS cristalização de clinopiroxênio*	T_{Cpx Melts}	✓		✓	✓	
Gualda et al (2012) - Rhyolite-MELTS cristalização de anfibólio*	T_{Hbl Melts}			✓		
Gualda et al. (2012) - Rhyolite-MELTS <i>solidus</i>	T_{solidus}	✓	✓	✓	✓	
Harrison e Watson (1984) - saturação em apatita	TSat_{ap}	✓	✓	✓	✓	
Putirka (2008) - clinopiroxênio-líquido	TCpx P08	✓				✓
Ridolfi et al (2010) - cristalização de anfibólio	THbl R2010	✓		✓		

Hayden et al (2008) - Zr-em-titanita	TZr _{ttt}				✓
Qz-Ab-Or normativo (sistema haplogranítico)	T Qz-Ab-Or	✓	✓	✓	✓

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Apresenta-se na Tabela 3 as estimativas de pressão e temperatura obtidas a partir dos geotermobarômetros listados na Tabela 2 para os granitos alcalinos dos Domínios São José do Campestre (SJC) e Rio Piranhas-Seridó (RPS). A seguir, os resultados são interpretados e discutidos de forma integrada.

5.1 Pressão

As estimativas barométricas obtidas mostram uma maior variação no intervalo 2,0–6,0 kbar, com os menores valores concentrados no *stock* Flores e os maiores no plúton Japi. Pressões fora deste intervalo incluem uma estimativa mínima de 1,3 kbar, e uma máxima de 7,2 kbar para os plútons Serra Negra do Norte e Japi, respectivamente (geobarômetro de Yang, 2017). A partir das estimativas individuais foram calculadas as pressões médias de colocação listadas na Tabela 3. Os valores mostram que a maioria dos granitos alcalinos dos Domínios RPS e SJC se cristalizou sob pressões entre 3,0–3,7 (± 1) kbar, à exceção do Plúton Japi, com pressões médias acima de 5,0 kbar, porém no limite do intervalo considerando o desvio padrão associado (Tab. 3). Esses valores coincidem com as estimativas das condições do pico metamórfico dos gnaisses migmatíticos encaixantes, estimadas como transicionais entre as fácies anfibolito superior e granulito (3,8–5,7 kbar) para rochas do Domínio SJC (Souza et al., 2006). Já quando comparados com granitos de tipo-A do Domínio da Zona Transversal, os valores são ligeiramente inferiores às pressões de colocação dos plútons dos terrenos Alto Moxotó (AMT) e Alto Pajeú (APT), com um valor médio de $5,0 \pm 1,2$ kbar (Tab. 3).

Tabela 3. Estimativas barométricas, desvios padrões associados e respectiva pressão média geral (P_{média}) para os granitos alcalinos dos Domínios Rio Piranhas-Seridó e São José do Campestre, Província Borborema. São também listadas as estimativas para granitos tipo-A da Zona Transversal para comparação. Abreviação dos geobarômetros conforme Tabela 2. Plútons: SA: Serra do Algodão; SB: Serra do Boqueirão; OD: Olho D'Água; PAB: Terreno Piancó-Alto Brígida e AMT/APT: Terrenos Alto Moxotó/Alto Pajeú (Zona Transversal). *Estimativa qualitativa (Cunha, 2018).

Geobarômetro →	Qz-Ab-Or	Al-em-hornblenda				Cpx-líq	
Plútons	Yang2017	HZ1986	JR1989	S1992	M2016	P2008	P _{média}
Serra Negra do Norte	3,9 $\pm$ 1,3	3,8 $\pm$ 0,8	3,1 $\pm$ 0,6	4,3 $\pm$ 0,7	3,4 $\pm$ 0,5	–	3,7 $\pm$ 0,9
Flores	3,0 $\pm$ 0,8	–	–	–	–	–	3,0 $\pm$ 0,8
Japi	5,3 $\pm$ 1,6	–	–	–	–	–	5,3 $\pm$ 1,6
Caxexa, SA, SB, OD	3,7 $\pm$ 1,3	–	–	–	–	3,6 $\pm$ 0,5	3,6 $\pm$ 1,0
PAB		–	–	–	–	–	3,0*
AMT/APT	4,1 $\pm$ 1,6	5,9 $\pm$ 1,2	4,8 $\pm$ 1,0	6,3 $\pm$ 1,1	5,0 $\pm$ 0,9	–	5,0 $\pm$ 1,2

A pressão calculada para o plúton Serra Negra do Norte é inferior aos valores de Campos et al. (2000), entre $4,7-5,1 \pm 0,6$ kbar, obtidos com a calibração de Schmidt (1992) do barômetro Al-em-hornblenda. Contudo, observa-se a partir dos dados compilados que a maioria dos anfibólios possui composições fora do intervalo de $0,4 \leq \text{fe\#} \leq 0,65$ recomendado por Anderson e Smith (1995) e, de fato, apenas uma análise resultou em pressões em torno desses valores com barômetros Al-em-hornblenda. A aplicação do geobarômetro normativo de Yang (2017) para este plúton retornou pressões de cristalização entre $2,4$ e $4,6 \pm 1,5$ kbar, os maiores valores compatíveis com Campos et al. (2000) obtidos para monzogranitos róseos com hornblenda, enquanto os sienogranitos principais e microgranitos retornam pressões mais baixas, entre $2,4$ e $3,4 \pm 0,7$ kbar, valores estes que são mais compatíveis com os resultados obtidos com diversas calibrações distintas do geobarômetro Al-em-hornblenda (Tab. 3). Desta forma, entende-se que uma pressão média de $3,7 \pm 0,9$ kbar seja mais adequada para o plúton Serra Negra do Norte. Alternativamente, a variação nos valores de pressão pode sugerir início da cristalização em profundidades maiores com posterior ascensão do magma para níveis crustais mais rasos. Campos et al (2000) chamam ainda a atenção para a presença de epidoto magmático em rochas do plúton (molécula pistacita entre 27-29%), o que demandaria pressões entre 5–6 kbar para a estabilização deste mineral (e.g., Zen e Hammarstrom, 1988; Schmidt e Thompson, 1996). Contudo, em condições mais oxidantes de cristalização, tal como no caso do Serra Negra do Norte (Fig. 9), epidoto é fase magmática estável em pressões tão baixas quanto 3,0 kbar (Sial et al., 2008; Ferreira et al., 2011).

As estimativas barométricas apresentadas para o plúton Caxexa, em conjunto com os plútons Serra do Algodão/Boqueirão e Olho D'Água, são inéditas. Nascimento (2000) apresenta uma estimativa indireta de entre $5,4-5,6 \pm 0,2$ kbar para o plúton Caxexa a partir do barômetro Al-em-hornblenda (calibrações de Hollister et al., 1987 e Schmidt, 1992) em anfibólio-biotita microgranitos que cortam os granitos do Caxexa. As análises utilizadas pelo autor foram recalculadas conforme os procedimentos descritos no item 3, o que resultou valores ligeiramente menores de Al. Como consequência, tem-se uma estimativa de pressão de $4,7 \pm 0,6$ kbar para esses microgranitos com os barômetros Al-em-hornblenda da Tabela 2. Esse valor sobrepõe-se às nossas estimativas para os plútons Caxexa, Serra do Algodão/Boqueirão e Olho D'Água, com média de $3,6 \pm 1,0$ kbar (Tab. 3) interpretada como a pressão de cristalização desses plútons. É importante ressaltar que este valor coincide com a pressão de ~3,0 kbar proposta por Cunha (2018) para o plúton peralcalino Catingueira e corpos satélites, ao longo do lineamento Patos no Terreno Piancó-Alto Brígida do Domínio da Zona Transversal.

A pressão média de $5,3 \pm 1,6$ kbar para o plúton Japi é ligeiramente maior que nos demais plútons estudados, assemelhando-se aos valores médios nos granitos de tipo-A nos terrenos AMT e APT da Zona Transversal. Contudo, estimativas tão altas quanto 7,2 kbar são registradas com o barômetro de Yang (2017) para o Japi, o que pode sugerir cristalização inicial em profundidades maiores seguida da ascensão do magma para níveis crustais mais rasos controlada pela Zona de Cisalhamento Japi (Fig. 1; Holanda et al., 1999).

Para o *stock* Flores as pressões de cristalização são invariavelmente mais baixas, com média de $3,0 \pm 0,8$ Kbar. Tais pressões sugerem que este corpo se colocou em níveis crustais algo mais rasos em comparação com as demais intrusões estudadas, num contexto tardi a pós-tectônico (Souza et al., 2017). Tal inferência é

embasada por feições petrográficas tais como a presença relativamente comum de intercrescimentos granofíricos no *stock*. Ademais, nossas estimativas sobrepõem-se com as pressões entre 3,0–5,0 kbar estimadas por Souza et al. (2017) para este corpo a partir do diagrama ternário Qz-Ab-Or (Tuttle e Bowen, 1958).

5.2 Temperatura

De forma a se obter um panorama termal completo da cristalização dos granitos estudados, diversos geotermômetros distintos foram aplicados e os resultados foram completados com as simulações de cristalização no programa *rhyolite-MELTS* (Gualda et al., 2012). As simulações foram particularmente importantes para a melhor caracterização das condições iniciais de cristalização, bem como para a melhor definição das temperaturas de cristalização dos máficos principais.

Resultados disponíveis na literatura para os plútons em questão (e.g., Nascimento, 2000; Campos et al., 2000; Nascimento et al., 2010; Souza et al., 2017) estimam a T_{liquidus} de forma indireta a partir da temperatura de saturação do zircão ($T_{\text{sat}_{\text{Zr}}}$; Watson e Harrison, 1983), assumindo todos os grãos presentes como autocristais. Inferências como estas têm sido alvo de criticismo em contribuições recentes que argumentam que em magmas graníticos somente em poucas circunstâncias há a cristalização do zircão em temperaturas próximas do *liquidus*. Ao contrário, de forma mais realística sua formação ocorre ao longo de um amplo intervalo de temperaturas (Harrison et al., 2007; Moecher et al., 2014). Siégl et al. (2018) enfatizam que a principal armadilha neste caso é que a $T_{\text{sat}_{\text{Zr}}}$ é uma temperatura teórica e dinâmica (i.e., varia com a cristalização fracionada) que não necessariamente corresponde à temperatura inicial de cristalização do zircão; tampouco, pois, é uma medição real da T_{liquidus} . O que de fato a $T_{\text{sat}_{\text{Zr}}}$ representa é a temperatura na qual a saturação em zircão é alcançada em um magma em processo de cristalização, que pode ser atingida a qualquer momento como uma temperatura entre o *liquidus* e o *solidus*. De fato, Harrison et al. (2007) mostram que as $T_{\text{sat}_{\text{Zr}}}$ calculadas de acordo com Watson e Harrison (1983) podem ser cerca de 80–100 °C inferiores (ou mesmo ainda mais baixas) que as temperaturas de cristalização do zircão.

Para contornar esta situação, as T_{liquidus} e as temperaturas de cristalização do zircão (T_{Zr}) foram modeladas com o *rhyolite-MELTS* de acordo com a metodologia de Moecher et al. (2014). Os resultados são aqui interpretados (Fig. 5) como valores mais realistas dos estágios iniciais da cristalização dos granitos alcalinos dos domínios SJC e RPS.

As estimativas termométricas médias e respectivos desvios padrões são apresentadas na Tabela 4 e nos diagramas da Figura 5. Abrangem desde a T_{liquidus} até T_{solidus} , e refletem com precisão a sequência de cristalização dos plútons estudados (Fig. 3), que em linhas gerais é marcada pelo aparecimento precoce de apatita e zircão, seguidos da cristalização de titanita, outros acessórios e, quando presente, clinopiroxênio. Sob temperaturas mais baixas precipitam-se anfibólios, seguidos de biotita, feldspato e quartzo (Fig. 4).

As temperaturas de *liquidus* modeladas variam de 818 ± 2 °C para o *stock* Flores até 917 ± 24 °C para o plúton Serra Negra do Norte. Para os plútons Japi, Caxexa e demais granitos alcalinos da ZCRP os valores de T_{liquidus} são equivalentes e variam entre 885 ± 7 °C (Japi) e 892 ± 24 °C (Caxexa, Serra do Algodão/Boqueirão). Os valores estão de acordo com as temperaturas entre 800 – 900 °C comumente

encontradas em granitos de tipo-A (e.g., Clemens et al., 1986; Patiño-Douce, 1997; King et al, 1997; 2001; Guimarães et al., 2004; Cunha et al., 2016). Os valores mais altos nos plútons Serra Negra do Norte, Japi, Caxexa e Serra do Algodão/Boqueirão estão ainda de acordo com a presença de clinopiroxênio nesses corpos.

As temperaturas de saturação de apatita ($T_{sat_{ap}}$), calculadas de acordo com Harrison e Watson (1984), são mais altas que as $T_{sat_{zr}}$ em todos os plútons, variando entre 891 – 841 °C, de acordo com o caráter precoce deste mineral. Já as T_{zr} modeladas (Fig. 5) são mais altas nos plútons Serra Negra do Norte (833 ± 1 °C) e Caxexa/Serra do Algodão/Boqueirão/Olho D'Água (816 ± 5 °C), enquanto variam entre 783 ± 1 °C e 793 ± 7 °C no plúton Japi e *stock* Flores, respectivamente.

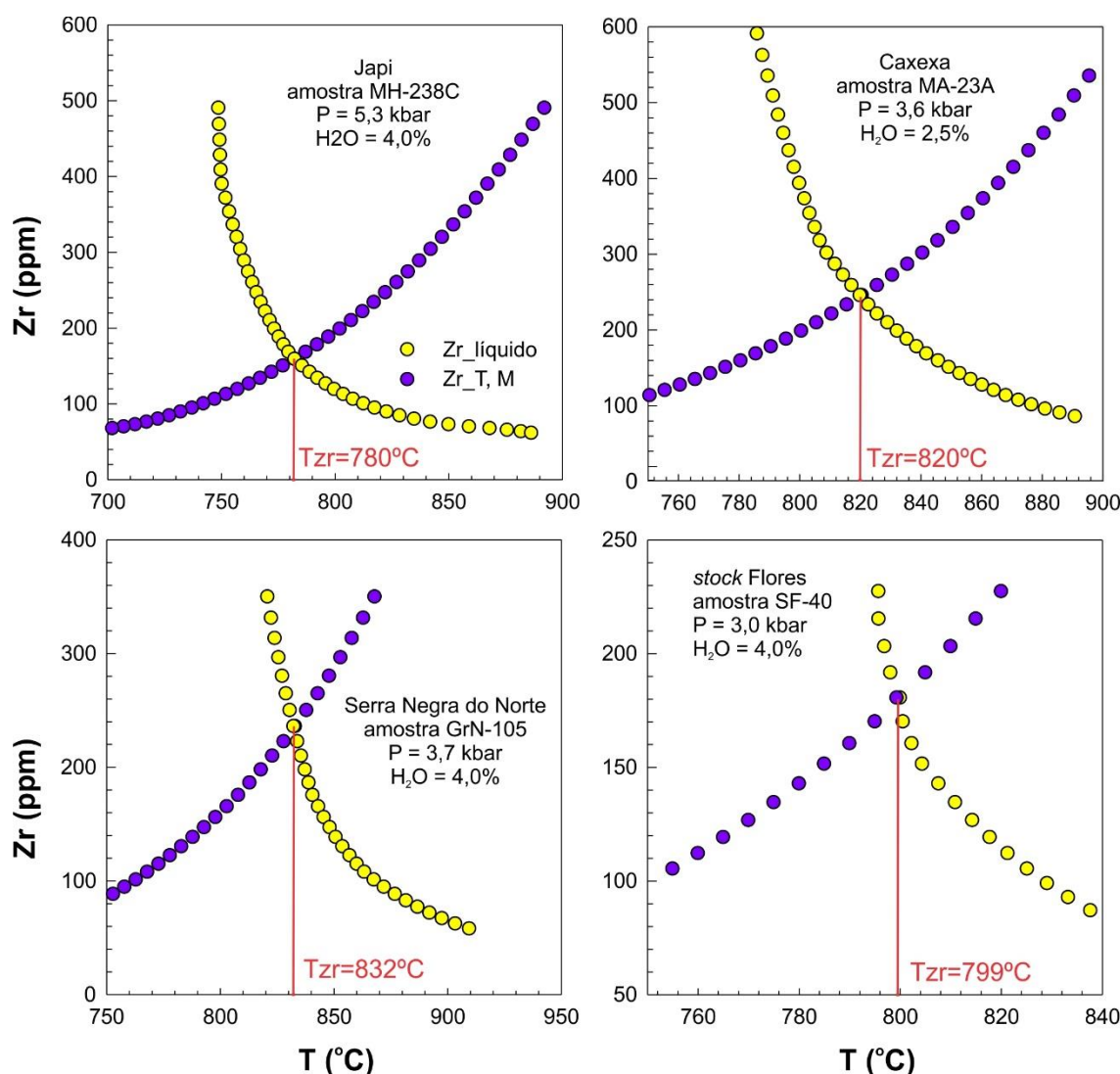


Figura 5. Exemplos de resultados da estimativa da temperatura de início de cristalização de zircão para os granitos alcalinos dos Domínios RPS e SJC da Província Borborema através de modelagens de cristalização com o programa *rhyolite-MELTS*, de acordo com a metodologia de Moecher et al. (2014). Círculos roxos ($Zr_{T,M}$) mostram a diminuição das concentrações de Zr (ppm) calculadas a partir do parâmetro M (Watson e Harrison, 1983) para cada temperatura T (°C). Círculos amarelos ($Zr_{líquido}$) mostram o aumento das concentrações de Zr (ppm) nos líquidos residuais, a partir do conteúdo de Zr medido em rocha-total (condições

iniciais). As amostras utilizadas nos modelamentos foram retiradas, na sequência em que aparecem, de Hollanda (1998), Nascimento (2000), Campos (1997) e Souza (2016).

As T_{Zr} para o plúton Serra Negra do Norte são mais precisas e adequadas em comparação ao largo intervalo de $T_{sat_{Zr}}$ entre 750–930 °C interpretado por Campos et al. (2000) como as $T_{liquidus}$ deste corpo. Cabe destacar que os valores anormalmente altos de Zr para amostras desse plúton são associados a presença de cumulos de zircão (Campos et al., 2000) e destoam do conjunto de dados (Fig. 7). Desta forma, o valor médio de $T_{sat_{Zr}}$ reportado na Tabela 4 (812 ± 23 °C), calculados segundo Watson e Harrison (1983) desconsideram amostras com $Zr > \sim 400$ ppm (Fig. 6).

Nos plútons Japi, Caxexa/Serra do Algodão/Boqueirão/Olho D'Água, os valores modelados de T_{Zr} (Fig. 5) são mais altos do que aqueles calculados de acordo com Watson e Harrison (1983), estes com médias de 748 ± 29 °C (Japi), 743 ± 29 °C (Caxexa) e 726 ± 59 °C (Serra do Algodão/Boqueirão/Olho D'Água) (Tab. 4; ver também Nascimento, 2000; Nascimento et al., 2010). $T_{sat_{Zr}}$ baixas como essas estão associadas a baixos teores de Zr em rocha-total (Fig. 7) e poderiam induzir a classificação desses plútons como típicos “granitos frios” (Chappell et al., 1998; Miller et al., 2003). Tal classificação é questionada por Siégl et al. (2018) exatamente por assumir $T_{sat_{Zr}} = T_{liquidus}$. Além disso, esses valores estão em desacordo com as temperaturas geralmente associadas à geração de granitos alcalinos, em geral > 800 °C, tal como observado acima. Como alternativa, baixas $T_{sat_{Zr}}$ podem estar associadas à cristalização a partir de um magma inicialmente subsaturado em zircão. De fato, embora o plúton Japi mostre diminuição de Zr em direção a composições mais evoluídas, o mesmo não se visualiza de forma convincente para os plútons Caxexa, Serra do Algodão/Boqueirão e Olho D'Água (Fig. 7b). Tal interpretação é suportada por cálculos com o modelo de Watson e Harrison (1983) assumindo uma temperatura mínima de 800 °C para $T_{liquidus}$ desses granitos (e.g., Clemens et al., 1986). Neste caso, o conteúdo mínimo de Zr necessário para a cristalização do zircão seria ~ 200 ppm, bem acima dos valores médios encontrados (90-118 ppm). Adicionalmente, Villaseca et al. (2007) demonstraram que a fusão parcial de rochas granulíticas pode dar origem a magmas graníticos com baixos teores de Zr.

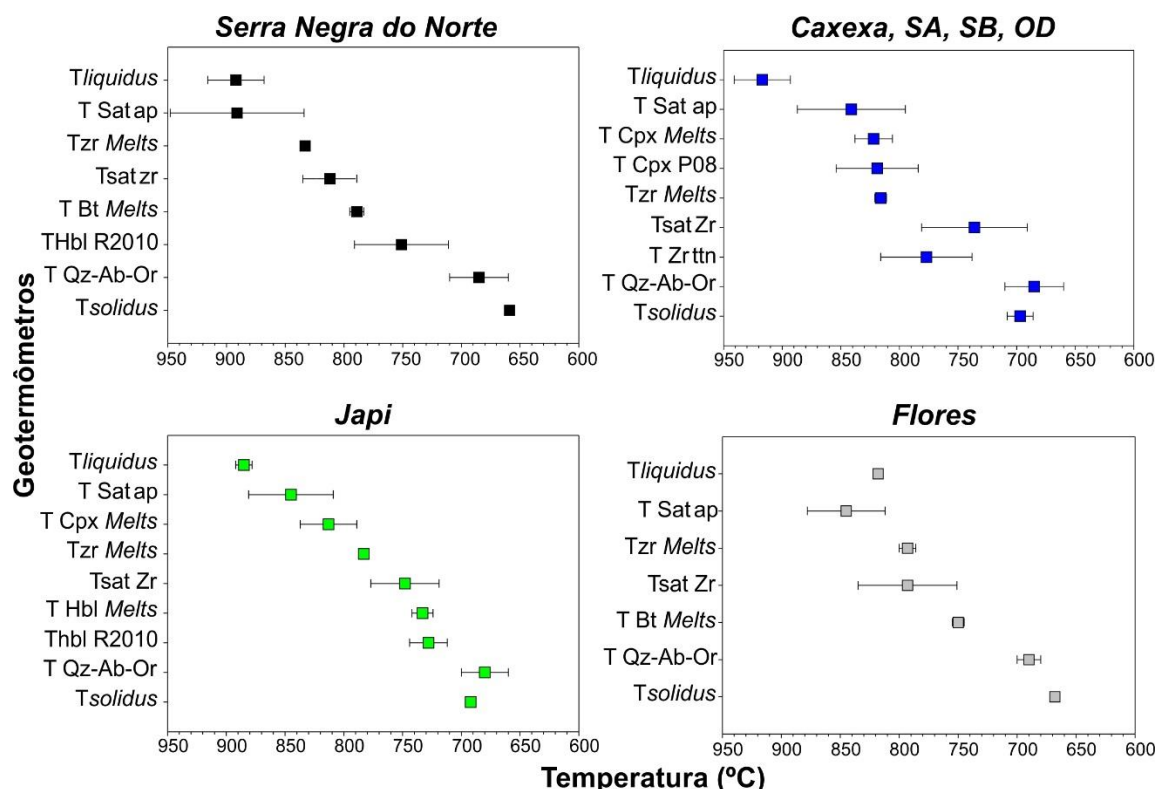


Figura 6. Diagramas ilustrando o intervalo de cristalização (ΔT) dos plútons alcalinos dos Domínios RPS e SJC, Província Borborema, a partir das estimativas termométricas obtidas na Tabela 4. Abreviação dos geotermômetros conforme Tabela 2.

Tabela 4. Estimativas geotermométricas (°C) médias e desvios padrões associados para os granitos alcalinos dos Domínios Rio Piranhas-Seridó e São José do Campestre, Província Borborema. São também listadas para comparação as estimativas para granitos tipo-A da Zona Transversal. Abreviação dos geotermômetros conforme Tabela 2. Plútons – SA: Serra do Algodão; SB: Serra do Boqueirão; OD: Olho D'Água. Terrenos (Zona Transversal) – AMT: Alto Moxotó; APT: Alto Pajeú.

Geotermômetros	Serra Negra do Norte	Flores	Japi	Caxexa, SA, SB, OD	PAB	AMT/APT
T_{liquidus}	892 ± 24	818 ± 2	885 ± 7	917 ± 24	–	–
T_{Sat_{ap}}	891 ± 57	845 ± 33	845 ± 36	841 ± 46	887 ± 45	913 ± 53
T_{zr Melts}	833 ± 1	793 ± 7	783 ± 1	816 ± 5	–	–
T_{sat_{zr}}	812 ± 33	793 ± 42	748 ± 29	736 ± 45	751 ± 38	870 ± 51
T_{Zr_{ttn}}	–	–	–	777 ± 39	–	–
T_{Cpx P08}	–	–	–	819 ± 35	–	–
T_{Cpx Melts}	915	–	813 ± 24	822 ± 16	–	–
T_{Hbl Melts}	–	–	733 ± 9	–	–	–
T_{Bt Melts}	789 ± 6	750 ± 5	–	–	–	–
T_{Hbl R2010}	751 ± 40	–	728 ± 16	–	–	849 ± 35
T_{Qz-Ab-Or}	685 ± 25	690 ± 10	680 ± 20	685 ± 25	–	–
T_{solidus}	659 ± 4	668 ± 2	692 ± 2	697 ± 11	–	–

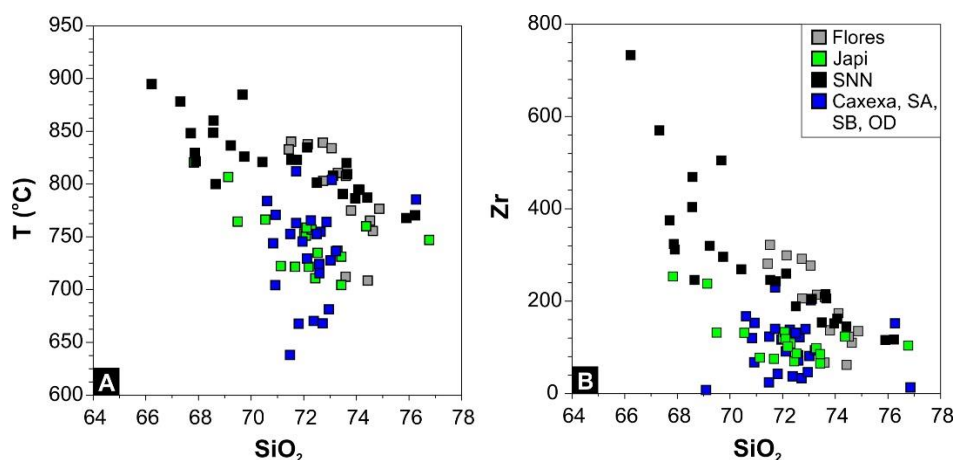


Figura 7. Diagramas binários de variação das temperaturas de saturação de zircão ($T_{sat_{Zr}}$) e teores de Zr (ppm) dos plútons alcalinos dos Domínios RPS e SJC, Província Borborema. A – Diagrama $T_{sat_{Zr}}$ versus SiO_2 (% em peso) em rocha-total. B – Diagrama Zr (ppm) versus SiO_2 (% em peso) em rocha-total Plútons: Serra do Algodão (SA), Serra do Boqueirão (SB), Olho D'Água (OD), Serra Negra do Norte (SNN).

Nos plútons Japi e Caxexa/Serra do Algodão/Boqueirão, as simulações com o *rhyolite-MELTS* indicam temperaturas de cristalização para o clinopiroxênio entre 813 ± 24 °C (Japi) e 822 ± 16 °C (Caxexa/Serra do Algodão/Boqueirão). No último caso, uma estimativa similar de 819 ± 35 °C é obtida a partir do equilíbrio clinopiroxênio-líquido (Putirka, 2008). No plúton Japi, o clinopiroxênio dá lugar a anfibólio em 733 ± 9 °C, temperatura similar a obtida com o geotermômetro de Ridolfi et al. (2010) de 728 ± 16 °C.

Para o plúton Caxexa, a temperatura de cristalização da titanita foi obtida com o uso do geotermômetro Zr-em-titanita de Hayden et al. (2008) a partir dos teores de Zr via *laser ablation* (Tab. 5). Este geotermômetro considera a $aSiO_2$ e $aTiO_2$ no momento da cristalização da titanita, de acordo com a equação:

T (°C) = $[7708 + 960P]/[10,52 - \log(aSiO_2) - \log(aTiO_2) - \log(Zr_{titanita})] - 273$, onde P = pressão (GPa) e $Zr_{titanita}$ = teor de Zr (ppm) na titanita.

Dada a natureza supersaturada das rochas do plúton Caxexa, a $aSiO_2$ foi fixada em 1,0. Para $aTiO_2$ adotou-se um valor de 0,7, de acordo com Claiborne et al. (2010). A pressão utilizada foi de 3,6 kbar (Tab. 3). As temperaturas obtidas ($T_{Zr_{ttn}}$) variam entre 719 e 830 °C, com média de 777 ± 39 °C. A sobreposição desses valores com as temperaturas de cristalização do clinopiroxênio são confirmadas pela ocorrência de pequenas inclusões de titanita em cristais de clinopiroxênio no plúton Caxexa.

Tabela 5. Temperaturas de cristalização de titanita no plúton Caxexa obtidas pelo geotermômetro Zr-em-titanita ($T_{Zr_{ttn}}$) a partir dos teores de Zr (ppm) medidos via LA-ICP-MS. 2σ representa o erro associado a cada análise.

Cristal	ttn-1	ttn-2	ttn-3	ttn-4
---------	-------	-------	-------	-------

Zr (ppm)	2373	1049	1049	360
2 σ	294	131	141	45
T (°C)	830	779	779	719
TZr_{ttm} (°C) média:	777 $\pm$ 39			

Para o plúton Serra Negra do Norte e o *stock* Flores, as temperaturas de cristalização dos máficos principais hornblenda (somente no Serra Negra do Norte) e biotita foram estimadas com o geotermômetro de Ridolfi et al. (2010) e com o *rhyolite-MELTS*, respectivamente. As simulações para o plúton Serra Negra do Norte não precipitaram o anfibólio. Os resultados indicam temperaturas de 751 ± 40 °C para a hornblenda, e entre 789 ± 6 °C e 750 ± 5 °C para a biotita do plúton Serra Negra do Norte e *stock* Flores, respectivamente. Os cálculos com o geotermômetro de Ridolfi et al. (2010) não incluíram análises referentes a actinolita, interpretadas como de formação tardi- a pós-magmática (Campos et al., 2000). Estas resultam em temperaturas em torno de 705 ± 16 °C, próximas às estimativas de T_{solidus} (Fig. 6). Outrossim, a sobreposição das temperaturas, com valores em média mais altos para a biotita, encontra respaldo petrográfico no plúton Serra Negra do Norte, uma vez que é comum a presença de inclusões de biotita em hornblenda e ainda intercrescimento entre essas fases nos litotipos deste plúton (Campos, 1997; Campos et al., 2000).

Cabe registrar que a composição mais sódica do plagioclásio (albita a oligoclásio sódico; $An < 19\%$) e a presença de hornblenda com razão $fe\#$ ($Fe/Fe+Mg$) $< 0,4$ no Serra Negra do Norte impede rigorosamente a aplicação do geotermômetro hornblenda-plagioclásio (Holland e Blundy, 1994; Anderson e Smith, 1995). Apesar disto, Campos et al. (2000) apresentam temperaturas entre 725–782 °C obtidas com este geotermômetro que se sobrepõem às nossas estimativas.

As temperaturas finais de cristalização (T_{solidus}) foram obtidas de duas formas: (1) a partir do sistema isobárico quartzo (Qz) – albita (Ab) – ortoclásio (Or) (sistema haplogranítico) para 3 kbar (Tuttle e Bowen, 1958), 4 kbar (Steiner et al., 1975) e 5 kbar (Luth et al., 1964); e (2) a partir das simulações no *rhyolite-MELTS*. Os resultados são equivalentes e indicam T_{solidus} entre 660 – 700 °C para os plútons estudados; os menores valores ($\sim 660 - 670$ °C) registrados para o plúton Serra Negra do Norte e *stock* Flores. No último caso, os valores mais baixos podem estar associados a um excesso de flúor no magma (Manning, 1981), tal como atesta a presença de fluorita neste corpo (Souza et al., 2017).

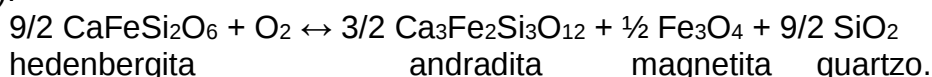
Conclui-se, portanto, um intervalo de cristalização ($\Delta T_{\text{cristal}}$) para os granitos alcalinos dos Domínios RPS e SJC entre 150 e 233 °C, com o *stock* Flores representando a intrusão (de menores dimensões) mais rasa (3,0 kbar) e de menor $\Delta T_{\text{cristal}}$.

5.3 Fugacidade de Oxigênio

Inferências disponíveis na literatura sobre as condições de fugacidade de oxigênio (fO_2) atuantes durante a cristalização dos granitos em questão são baseadas principalmente em evidências petrográficas. Em linhas gerais, a ocorrência comum da paragênese titanita + magnetita + quartzo em equilíbrio (Wones, 1989), alinhada com anomalias de Eu em rocha-total positivas a levemente positivas (plútons Caxexa,

Serra do Algodão/Boqueirão, Serra Negra do Norte e Japi) apontam para um ambiente de cristalização relativamente oxidado (e.g., Campos et al., 2000; Nascimento et al., 2003; Nascimento et al., 2010).

Para o plúton Caxexa é possível quantificar a fO_2 a partir da relação de substituição entre clinopiroxênio (hedenbergita) e granada (andradita) existente nesse corpo (Gustafson, 1974; Nascimento et al., 2003; Dalan et al., 2017). Durante estágios tardi-magmáticos, em meio oxidante, andradita e óxido de ferro se formam a partir da desestabilização da hedenbergita através da reação (Zhang e Saxena, 1991):



As propriedades termodinâmicas desta reação são apresentadas por Zhang e Saxena (1991), o que permite seu uso para estimativas quantitativas de fO_2 , uma vez que se conheçam as composições da hedenbergita e andradita, temperatura e pressão de cristalização, através da equação:

$$\log_{fO_2} = 12,51 + A + B/T(^{\circ}K) + 0,078[P(\text{kbar}) - 1]/T(^{\circ}K), \text{ onde:}$$

$$A = 3\log X_{ad} - 4,5\log X_{hd} \text{ (ad = moléc. andradita; hd = moléc. de hedenbergita)}$$

$$B = -27.576 - 1.007(1 - X_{ad})^2 - 1.476(1 - X_{hd})^2$$

Foram utilizados dados químicos de cristais de hedenbergita e andradita em reação do plúton Caxexa obtidas por Nascimento (2000) para uma pressão de 3,6 kbar e temperatura de quasi-solidus média de 685 °C. Os valores de $\log_{fO_2}$ obtidos variam entre -15,6 e -15,8 e atestam a cristalização sob condições oxidantes, ligeiramente acima dos tampões QFM (+1,2 < Δ_{QFM} < +1,4) e NNO (+0,7 < Δ_{NNO} < +0,9). Ademais, Nascimento (1998) descreve hematita bordejada por titanita nos plútons Serra do Algodão/Boqueirão, o que sugere que nestes casos as condições tornaram-se ainda mais oxidantes.

Anderson e Smith (1995) e Anderson et al. (2008) correlacionam as condições redox de cristalização de um magma com valores do índice $fe\#$ ($Fe/Fe+Mg$) em anfibólios cálcicos (e.g., hornblenda) e biotita. De fato, com o aumento da fO_2 durante a cristalização, hornblenda e biotita tornam-se progressivamente mais magnesianas (Wones, 1981), uma vez que a entrada de Fe^{3+} no lugar de Al na estrutura desses minerais é favorecida no lugar de Fe^{2+} . Desta forma, anfibólio e/ou biotita com razões $fe\#$ elevadas são interpretados como formados sob baixas fO_2 (Hollister et al., 1987; Anderson e Smith, 1995, Anderson, 1996). Os diagramas da Figura 8 mostram que as razões $fe\#$ desses minerais nos plútons Serra Negra do Norte e Japi (somente anfibólio) são compatíveis com fO_2 mais elevadas ($\Delta_{QFM} \approx +1,5$ a $+2,5$) similares às encontradas nos granitos da “série-magnetita” de Anderson et al. (2008). Tais condições são distintas daquelas verificadas para os granitos de tipo-A aflorantes nos terrenos AMT/APT da Zona Transversal, cujas razões $fe\#$ em anfibólio e biotita indicam fO_2 intermediárias a baixas (Fig. 8).

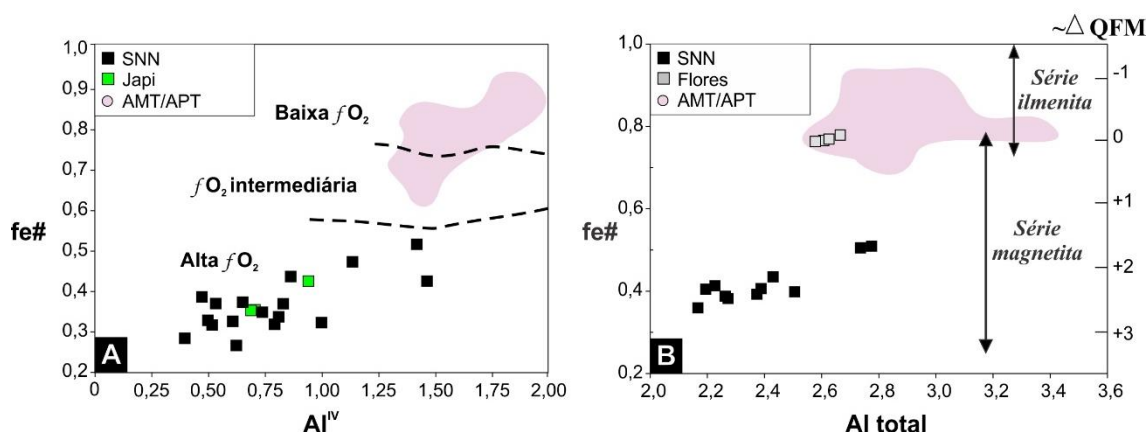


Figura 8. Estimativas das condições *redox* de cristalização dos plútons Serra Negra do Norte, Flores e Japi. a partir da composição de anfibólio e biotita. A – Diagrama catiônico Al^{IV} versus $fe\#$ ($Fe/Fe+Mg$) para o anfibólio com os campos de diferentes fO_2 de acordo com Anderson e Smith (1995). B – Diagrama catiônico Al_{total} versus $fe\#$ de Anderson et al. (2008) para a biotita, com fO_2 dada em relação ao tampão QFM (Quartzo-faialita-magnetita) comparada a granitos da série ilmenita e magnetita mesoproterozoicos da Laurentia (Anderson et al., 2008). Plútons: SNN – Serra Negra do Norte, AMT/APT – Terrenos Alto Moxotó/Alto Pajeú.

Estimativas quantitativas da fO_2 foram obtidas a partir da composição do anfibólio nos plútons Serra Negra do Norte e Japi com o oxibarômetro de Ridolfi et al. (2010). Os resultados (Fig. 9) indicam condições progressivamente mais oxidantes com o decorrer da cristalização e sempre maiores do que aquelas nos granitos tipo-A da Zona Transversal, com $\log fO_2$ entre -14,2 e -14,5 para o Japi ($+1,0 < \Delta_{QFM} < +1,5$; $+0,5 < \Delta_{NNO} < +1,0$), e entre -13,1 e -14,8 para o Serra Negra do Norte ($+1,7 < \Delta_{QFM} < +2,1$; $+1,2 < \Delta_{NNO} < +1,5$). Neste último caso, os valores indicam condições levemente mais oxidantes daquelas propostas por Campos et al. (2000) e são coerentes com a presença de epidoto magmático (cf., Sial et al., 2008).

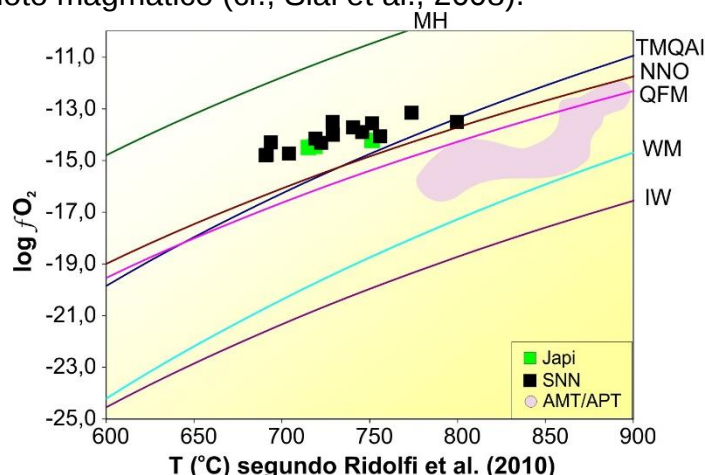


Figura 9. Diagrama binário temperatura versus $\log fO_2$ para os plútons Japi e Serra Negra do Norte e granitos tipo-A da Zona Transversal. Temperatura calculada a partir da composição do anfibólio de acordo com Ridolfi et al. (2010). Plútons: SNN – Serra Negra do Norte, AMT/APT – Terrenos Alto Moxotó/Alto Pajeú (Zona Transversal). Tampões (para 3,0 kbar): IW – ilmenita-wollastonita, WM – wollastonita-magnetita,

QFM – quartzo-faialita-magnetita, NNO – níquel-bunsenita, TMQAI – titanita-magnetita-quartzo-anfibólio-ilmenita, MH – magnetita-hematita.

O *stock* Flores também apresenta a paragênese titanita + magnetita + quartzo (em equilíbrio), o que levou Souza et al. (2017) a interpretá-lo como um granito de tipo-A oxidado (Dall'Agnol e Oliveira, 2007). Contudo, as rochas deste *stock* possuem biotita com razões $fe\#$ mais altas ($\sim 0,8$), similares às encontradas nos granitos de tipo-A dos terrenos AMT/APT (Fig. 8b). Esta observação, aliada às anomalias negativas de Eu observadas em rocha-total (Souza et al., 2017), apontam para fO_2 mais baixas durante a cristalização, em comparação aos demais plútons estudados e típicos granitos de tipo-A oxidados (e.g., Rämö et al., 2002; Dall'Agnol e Oliveira, 2007), ao longo ou levemente acima do tampão QFM ($\log fO_2 \sim -15,5$ para 750 °C). Sob tais condições a cristalização de magnetita é possível e o magma permanece reduzido, o que explica os valores elevados de $fe\#$ na biotita e em rocha-total (Souza et al., 2017). Dall'Agnol e Oliveira (2007) apontam que condições próximas ao tampão NNO, tais como observadas para os demais plútons estudados, definem as fO_2 mínimas para a formação de granitos de tipo-A oxidados, de forma que aqueles portando magnetita formados em condições próximas ao tampão QFM não são estritamente oxidados. Em outras palavras, a presença de magnetita em granitos não é incompatível com um caráter mais reduzido de seus magmas parentais (Anderson e Smith, 1995; Dall'Agnol e Oliveira, 2007; Anderson et al., 2008; Cunha et al., 2016; Campos et al., 2016).

5.4 Implicações geodinâmicas

A suíte granítica alcalina aqui estudada, tal como definida por Nascimento et al. (2015), faz parte do intenso magmatismo que marca os domínios tectonoestruturais Rio Piranhas-Seridó (RPS) e São José do Campestre (SJC), no extremo NE da Província Borborema, entre o final do período ediacarano e começo do cambriano. Além da suíte alcalina, este magmatismo engloba também granitos cálcio-alcalinos de alto K que formam intrusões de dimensões batolíticas em ambos os domínios. Esses corpos são quimicamente similares e suas condições de cristalização foram estudadas por Campos et al. (2016) que estimaram pressões de colocação entre 4,2–5,4 kbar e 4,9–5,6 kbar e para os corpos intrusivos nos Domínios SJC e RPS, respectivamente. As pressões calculadas para os granitos da suíte alcalina são em geral inferiores, entre 3,0–3,7 kbar, à exceção do plúton Japi, colocado sob pressões de 5,3 kbar equivalentes aos corpos cálcio-alcalinos. Por outro lado, as estimativas de $T_{liquidus}$ são maiores, o que está de acordo com dados experimentais que mostram que granitos de tipo-A se formam em temperaturas em geral mais altas que granitos cálcio-alcalinos (Clemens et al., 1986; Patiño-Douce, 1997). Assumindo-se uma densidade média da crosta de 2,65 g/cm³, essas pressões indicam profundidades de colocação entre 14–20 km e 12–14 km para os plútons nos domínios SJC (Japi, Caxexa, Serra do Algodão, Serra do Boqueirão e Olho D'Água) e RPS (Serra Negra do Norte e Flores), respectivamente (Fig. 10).

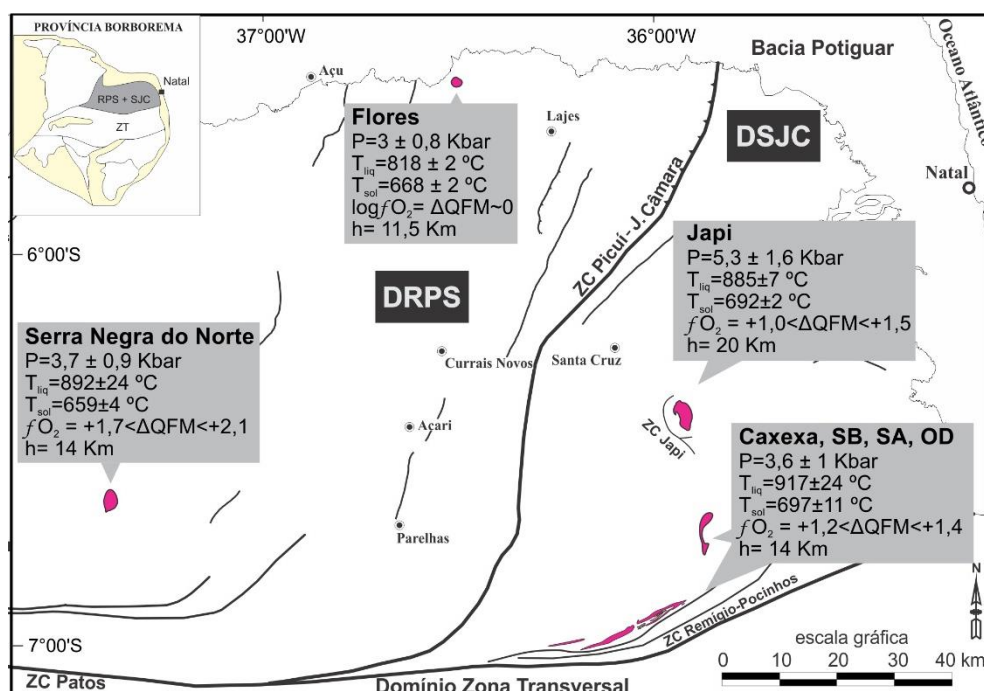


Figura 10. Esquema geológico do extremo NE da Província Borborema mostrando a localização dos plútons estudados com as respectivas pressões médias (P), temperaturas de *liquidus* (T_{liq}) e *solidus* (T_{sol}), fugacidade de oxigênio (fO_2) e profundidade de alojamento (h). DRPS: Domínio Rio Piranhas-Seridó, DSJC: Domínio São José do Campestre.

Os diferentes níveis crustais de alojamento das intrusões alcalinas entre os dois domínios são também acompanhados por um contraste químico entre os corpos: dentre outras particularidades, aqueles intrusivos no Domínio SJC possuem maiores teores de álcalis totais, o que acaba se refletindo em sua mineralogia (e.g., egrina-augita). Tais diferenças podem estar associadas a áreas-fontes distintas (mais anidras para os plútons no Domínio SJC), bem como ao controle estrutural do alojamento desses plútons (e.g., Jardim de Sá et al., 1999). Chama a atenção que os plútons Serra Negra do Norte e Flores (Domínio RPS) foram intrusões mais rasas e não estão associados com zonas de cisalhamento regionais importantes, correspondendo a granitos intra-placa e/ou pós-colisionais nos diagramas de ambientação tectônica de Pearce et al. (1984) (Fig. 11; ver também Campos et al., 2000; Souza et al., 2017), tal como os granitos tipo-A dos terrenos Alto Moxotó e Alto Pajeú (Domínio da Zona Transversal – ZT) dos quais compartilham ainda diversas características litoquímicas (especialmente o *stock* Flores). Por outro lado, os plútons intrusivos no Domínio SJC são algo mais profundos, de forma mais clara quando se considera o plúton Japi. Em comum, esses granitos têm sua colocação associada a zonas de cisalhamento regionais transcorrentes com componentes distensionais (Jardim de Sá et al., 1999; Hollanda et al., 1999): as zonas de cisalhamento Japi (plúton Japi) e Remígio-Pocinhos (plútons Caxexa, Serra do Algodão, Serra do Boqueirão e Olho D'Água) (Fig. 11). Estas zonas de cisalhamento podem ter dimensões litosféricas, permitindo o alojamento de magmas graníticos alcalinos de mais alta temperatura (e.g., Black et al., 1985) bem como rochas básicas associadas (como é o caso do plúton Japi) em diferentes níveis crustais, ora mais rasos (Caxexa, Serra do Algodão/Boqueirão, Olho

D'Água), ora mais profundos (Japi). Não por acaso esses plútons mostram assinatura compatível com granitos sin-colisionais e de arco magmático nos diagramas de Pearce et al. (1984), tal como o plúton peralcalino Catingueira, alojado ao longo do Lineamento Patos (Fig. 1) no Domínio ZT, em profundidades semelhantes (Cunha, 2018).

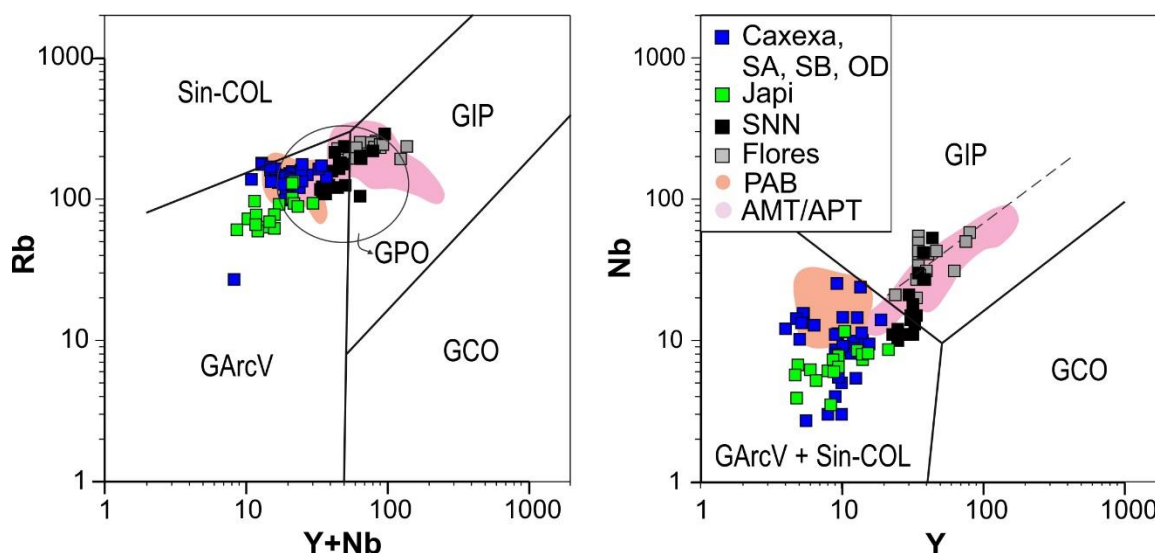


Figura 11. Diagramas de ambientação tectônica Y+Nb versus Rb de Pearce et al. (1996) e Y versus Nb (rocha-total) de Pearce et al. (1984) para os granitos alcalinos dos Domínios SJC e RPS da Província Borborema. Os diagramas também mostram as variações dos granitos de tipo-A da Zona Transversal (ZT) para comparação. Campos: Sin-COL: granitos sin-colisionais; GArV: Granitos de arco vulcânico; GIP: granitos intraplaca; GCO: granitos de cordilheira oceânica; GPO: granitos pós-colisionais. Plútons: Serra do Algodão (SA), Serra Negra do Norte (SNN). PAB: Terreno Piancó-Alto Brígida (ZT), AMT/APT: Terrenos Alto Moxotó/Alto Pajeú (ZT).

6. CONCLUSÕES

O estudo comparativo e a reavaliação das condições de cristalização dos granitos de afinidade alcalina (tipo-A) intrusivos nos Domínios São José do Campestre (SJC) e Rio Piranhas-Seridó (RPS), no extremo NE da Província Borborema, apresentados na Figura 11, permitiram as seguintes conclusões:

- 1) A suíte granítica alcalina engloba os plútons Japi, Caxexa, Serra do Algodão, Serra do Boqueirão e Olho D'Água no Domínio SJC; e plúton Serra Negra do Norte e *stock* Flores no Domínio RPS.
- 2) Os plútons intrusivos no Domínio SJC possuem maiores teores de álcalis-totais (média de 10,3% peso). Predominam álcali-feldspato granitos, sienitos e sienogranitos, com diopsídio, hedenbergita ou egirina-augita. Nos plútons alojados no Domínio RPS ocorrem sieno- e monzogranitos com biotita ± Mg-ferri-hornblenda ± diopsídio.

- 3) Os plútons foram cristalizados sob pressões entre 3,0–3,7 kbar (~11–14 km em profundidade), à exceção do plúton Japi, com pressões médias de 5,3 kbar (~20 km).
- 4) As temperaturas de *liquidus* foram modeladas entre 885–917 °C e 818 °C para o *stock* Flores, e *solidus* entre 660–700 °C.
- 5) Quando presentes, clinopiroxênios, anfibólios e biotita se formam entre 813–822 °C, 728–751 °C e 750–789 °C, respectivamente.
- 6) O geotermômetro Zr-em-titanita indica temperaturas da ordem de 780 °C (máximas de 830 °C) para o plúton Caxexa.
- 7) A cristalização ocorreu sob condições essencialmente oxidantes para a maioria dos plútons ($+1,0 < \Delta_{\text{QFM}} < +2,1$; $+0,4 < \Delta_{\text{NNO}} < +1,5$), à exceção do *stock* Flores, formado sob condições levemente mais reduzidas ($\Delta_{\text{QFM}} \approx 0,0$; $\Delta_{\text{NNO}} \approx -0,6$).
- 8) Os resultados reforçam o papel do controle estrutural na colocação e no contraste químico entre os granitos alcalinos dos domínios RPS e SJC.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica da UFRN pelo apoio técnico e financeiro, a Thomas F. C. Campos (UFRN) pela cessão de lâminas e dados inéditos do plúton Serra Negra do Norte, e à Adriana Alves e Lucelene Martins (USP) pelo auxílio durante as análises de LA-ICP-MS. C. Dalan agradece à CAPES pela bolsa de Mestrado recebida durante a realização deste trabalho.

7. REFERÊNCIAS

- Anderson, J. L. (1996). Status of thermobarometry in granitic batholiths. *Earth and Environmental Science Transactions of The Royal Society of Edinburgh*, 87(1-2), 125-138.
- Anderson, J. L., Smith, D. R. (1995). The effect of temperatures and oxygen fugacity on Al-in-hornblende barometry. *American Mineralogist*, 87, 125-138.
- Anderson, J. L., Barth, A. P., Wooden, J. L., Mazdab, F. (2008). Thermometers and thermobarometers in granitic systems. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 69(1), 121-142.
- Angelim, L.A.A., Nesi, J.R., Torres, H.H.F., Medeiros, V.C., Santos, C.A., Veiga Junior, J.P., Mendes, V.A., (2006). *Geologia e Recursos Minerais do estado do Rio Grande do Norte: Texto Explicativo dos Mapas Geológico e de Recursos Minerais do estado do Rio Grande do Norte Escala 1:500.000*. Serviço Geológico Brasileiro (CPRM), Recife, 233p.
- Black, R., Lameyre, J., Bonin, B. (1985). The structural setting of alkaline complexes. *Journal of African Earth Sciences*, 3, 5-16.
- Blundy, J., Cashman, K. (2001). Ascent-driven crystallisation of dacite magmas at Mount St Helens, 1980–1986. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 140(6), 631-650.
- Bonin, B., Giret, A. (1984). The plutonic alkaline series: the problem of their origin and differentiation, the role of their mineralogical assemblages. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 35(1-3), 212-221.

- Campos, B. C. S., Vilalva, F. C. J., Nascimento, M. A. L., Galindo, A. C. (2016). Crystallization conditions of porphyritic high-K calc-alkaline granitoids in the extreme northeastern Borborema Province, NE Brazil, and geodynamic implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 70, 224-236.
- Campos, T.F.C. (1997). *Geoquímica de Rochas Granitóides e Seus Minerais do Batólito da Serra Negra do Norte-RN e Rio Espinharas-PB, Nordeste do Brasil*. Tese (Doutorado). Porto Alegre: Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 408p.
- Campos, T. F. C., Neiva, A. M. R., Nardi, L. S. V. (2000). Geochemistry of granites and their minerals from Serra Negra do Norte Pluton, northeastern Brazil. *Chemie der Erde*, 60(4), 279-304.
- Chappell, B. W., Bryant, C. J., Wyborn, D., White, A. J. R., Williams, I. S. (1998). High- and low-temperature I-type granites. *Resource Geology*, 48(4), 225-235.
- Claiborne, L. L., Miller, C. F., Wooden, J. L. (2010). Trace element composition of igneous zircon: a thermal and compositional record of the accumulation and evolution of a large silicic batholith, Spirit Mountain, Nevada. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160(4), 511-531.
- Clemens, J. D., Holloway, J. R. White, A. J. R. (1986). Origin of an A-type granite: experimental constraints. *American Mineralogist*, 71, 317-324.
- Cunha, I. R. V., Dall'Agnol, R., Feio, G. R. L. (2016). Mineral chemistry and magnetic petrology of the Archean Planalto Suite, Carajas Province–Amazonian Craton: Implications for the evolution of ferroan Archean granites. *Journal of South American Earth Sciences*, 67, 100-121.
- Cunha, J. A. P. (2018). *Mecanismo de colocação e auréola termal provocada pelo plutão ediacarano Catingueira, Zona Transversal, Província Borborema, Nordeste do Brasil*. Dissertação (Mestrado). Natal: Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 58p.
- Dalan, C. A., Vilalva, F. C. J., Nascimento, M. A. L. (2017). Condições Redox de Cristalização do Plúton Caxexa, Província Borborema, A Partir da Substituição Hedenbergita ↔ Andradita. 27º *Simpósio de Geologia do Nordeste*, Anais, resumo RMG166. João Pessoa: Sociedade Brasileira de Geologia. www.geologiadonordeste.com.br/safetyarea/v3.0/trabalhos/resumo_pdf/171.pdf
- 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(3-4), 215-233.
- Dall'Agnol, R., Scaillet, B., Pichavant, M. (1999). An experimental study of a lower Proterozoic A-type granite from the Eastern Amazonian Craton, Brazil. *Journal of Petrology*, 40(11), 1673-1698.
- De La Roche, H.; Leterrier, J.; Granclaude, P.; Marchal, M. (1980). A classification of volcanic and plutonic rocks using R1-R2 diagram and major element analyses. Its relationship with current nomenclature. *Chemical Geology*, 29: 183-210.
- Deer, W. A., Howie, R. A., e Zussman, J. (2013). *An introduction to the rock-forming minerals*. 3rd Ed. London, The Mineralogical Society, 498p.
- Dou, J. Z., Zhang, H. F., Tong, Y., Wang, F., Chen, F. K., Li, S. R. (2018). Application of geothermo-barometers to Mesozoic granitoids in the Jiaodong Peninsula, eastern China: Criteria for selecting methods of pressure estimation and implications for crustal exhumation. *Journal of Asian Earth Sciences*, 160, 271-286.

- Droop, G. T. R. (1987). A general equation for estimating Fe^{3+} concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria. *Mineralogical Magazine*, 51, 431-435.
- Dymek, R. F. (1983). Titanium, aluminum and interlayer cation substitutions in biotite from high-grade gneisses' West Greenland. *American Mineralogist*, 6, 880-399
- Ferreira, V. P., Sial, A. N., Pimentel, M. M., Armstrong, R., Spicuzza, M. J., Guimarães, I. P., Silva Filho, A. F. (2011). Contrasting sources and PT crystallization conditions of epidote-bearing granitic rocks, northeastern Brazil: O, Sr, and Nd isotopes. *Lithos*, 121(1-4), 189-201.
- Frost, B.R., Barnes, C.G., Collins, W.J., Arculus, R.J., Ellis, D.J., Frost, C.D., (2001). A chemical classification for granitic rocks. *Journal of Petrology*, 42 (11), 2033-2048.
- Galindo, A. C., Sá, J. M. (2000). Contexto tectônico e geoquímico do granitóide Catingueira: um magmatismo alcalino-peralcalino no limite norte da Zona Transversal da Província Borborema. *Geochimica Brasiliensis*, 14: 1-21.
- Galindo, A. C., Alves da Silva, F. C., Souza, Z. S. (2012). Química mineral de leucomicrogranitos neoproterozóicos do Domínio Rio Grande do Norte (DRN). *Geochimica Brasiliensis*, 26, 19-28.
- Gervasoni, F., Klemme, S., Rocha-Júnior, E. R., Berndt, J. (2016). Zircon saturation in silicate melts: a new and improved model for aluminous and alkaline melts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 171(3), 21.
- Gualda, G. A. R., Vlach, S. R. F. (2007). The Serra da Graciosa A-type Granites and Syenites, southern Brazil. Part 2: Petrographic and mineralogical evolution of the alkaline and aluminous associations. *Lithos*, 93, 310-327.
- Gualda, G. A., Ghiorso, M. S., Lemons, R. V., e Carley, T. L. (2012). Rhyolite-MELTS: a modified calibration of MELTS optimized for silica-rich, fluid-bearing magmatic systems. *Journal of Petrology*, 53(5), 875-890.
- Guimarães, I. P., Silva Filho, A. F., Almeida, C. N., Van Schmus, W. R., Araújo, J. M., Melo, S. C., Melo, E. B. (2004). Brasileiro (Pan-African) granitic magmatism in the Pajeú-Paraíba belt, Northeast Brazil: an isotopic and geochronological approach. *Precambrian Research*, 135(1-2), 23-53.
- Guimarães, I. P., Araújo, J. M. M., Galindo, A. C. (2013). Geocronologia e Geoquímica do Batólito Granítico Solidão (PE). In: *XIV Congresso Brasileiro de Geoquímica e Simpósio Latino-Americano de Mapeamento Geoquímico*, Diamantina - MG. Anais.
- Gustafson, W. I. (1974). The stability of andradite, hedenbergite, and related minerals in the system Ca-Fe-Si-O-H. *Journal of Petrology*, 15(3), 455-496.
- Hammarstrom, J. M., Zen, E. A. (1986). Aluminum in hornblende: an empirical igneous geobarometer. *American Mineralogist*, 71(11-12), 1297-1313.
- Harrison, T. M., Watson, E. B. (1984). Apatite Kinetics of zircon dissolution and zirconium diffusion in granitic melts of variable water content. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 84(1), 66-72.
- Harrison, T. M., Watson, E. B., Aikman, A. B. (2007). Temperature spectra of zircon crystallization in plutonic rocks. *Geology*, 35(7), 635-638.
- Hawthorne, F. C., Oberti, R., Harlow, G. E., Maresch, W. V., Martin, R. F., Schumacher, J. C., Welch, M. D. (2012). Nomenclature of the amphibole supergroup. *American Mineralogist*, 97(11-12), 2031-2048.

- Hayden, L. A., Watson, E. B., Wark, D. A. (2008). A thermobarometer for sphene (titanite). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 155(4), 529-540.
- Holland, T., Blundy, J. (1994). Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 116(4), 433-447.
- Hollanda, M.H.B.M., (1998). *Mecanismos de Alojamentos de Magmas Granitoides: Exemplo do Plúton de Japi (RN)*. Tese (Doutorado). Natal: Pós Graduação de Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 126p.
- Hollanda, M. H. B. M., Jardim de Sá, E. F., Galindo, A. C., Souza, Z. S. (1999). Shear zone control on the emplacement of granitoid magmas: an example from the Japi Complex, Seridó Belt, NE Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 29(1), 41-46.
- Hollister, L.S., Grissom, G.C., Peters, E.K., Stowell, H.H., Sisson, V.B. (1987). Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons. *American Mineralogist*, 72, 231-239.
- Holtz, F., Johannes, W., Tamic, N., Behrens, H. (2001). Maximum and minimum water contents of granitic melts generated in the crust: a reevaluation and implications. *Lithos*, 56(1), 1-14.
- Jardim de Sá, E. F., Trindade, R. I. F., Hollanda, M. H. B. M., Araújo, J. M. M., Galindo, A. C., Amaro, V. E., Souza, Z. S., Vigneresse, J.-L., Lardeaux, J. M. (1999). Brasiliano syntectonic alkaline granites emplaced in a strike slip/extensional setting (Eastern Seridó Belt, NE Brazil). *Anais da Academia Brasileira De Ciências*, 71, 17-28.
- Johnson, M. C., Rutherford, M. J. (1989). Experimentally determined conditions in the Fish Canyon Tuff, Colorado, magma chamber. *Journal of Petrology*, 30(3), 711-737.
- King, P. L., Chappell, B. W., Allen, C. M., White, A. J. R. (2001). Are A-type granites the high-temperature felsic granites? Evidence from fractionated granites of the Wangrah Suite. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48(4), 501-514.
- King, P. L., White, A. J. R., Chappell, B. W., Allen, C. M. (1997). Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan Fold Belt, southeastern Australia. *Journal of Petrology*, 38(3), 371-391.
- Lages, G. D. A., Marinho, M. D. S., Nascimento, M. A. L., Medeiros, V. C. D., Dantas, E. L. (2016). Geochronology and structural and petrological features of the Bravo Pluton, Central Domain of the Borborema Province, Northeast Brazil: an early trans-alkaline granite in the post-collisional stage of the Brasiliano Orogeny. *Brazilian Journal of Geology*, 46(1), 41-61.
- Lima, J. V., Guimarães, I. D. P., Santos, L., Amorim, J. V. A., Farias, D. J. S. (2017). Geochemical and isotopic characterization of the granitic magmatism along the Remígio-Pocinhos shear zone, Borborema Province, NE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 75, 116-133.
- Luth, W. C., Jahns, R. H., Tuttle, O. F. (1964). The granite system at pressures of 4 to 10 kilobars. *Journal of Geophysical Research*, 69(4), 759-773.
- Manning, D.A.C. (1981). The effect of fluorine on liquidus phase relationships in the system Qz-Ab-Or with excess water at 1 kb. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 76, 206-215.
- Miller, C. F., McDowell, S. M., Mapes, R. W. (2003). Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance. *Geology*, 31(6), 529-532.

- Moecher, D. P., McDowell, S. M., Samson, S. D., Miller, C. F. (2014). Ti-in-zircon thermometry and crystallization modeling support hot Grenville granite hypothesis. *Geology*, 42(3), 267-270.
- Mutch, E. J. F., Blundy, J. D., Tattitch, B. C., Cooper, F. J., e Brooker, R. A. (2016). An experimental study of amphibole stability in low-pressure granitic magmas and a revised Al-in-hornblende geobarometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 171(10), 85.
- Nascimento, M. A. L., (2000). *Petrologia do Magmatismo Tardi-brasiliano no Maciço São José de Campestre (RN-PB), com ênfase no Plúton Alcalino Caxexa*. Dissertação (Mestrado). Natal: Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 142p.
- Nascimento, M. A. L., Galindo, A. C., Medeiros, V. C. (2015). Ediacaran to Cambrian magmatic suites in the Rio Grande do Norte domain, extreme Northeastern Borborema Province (NE of Brazil): Current knowledge. *Journal of South American Earth Sciences*, 58, 281-299.
- Nascimento, M. A. L., Souza, Z. S., Nascimento, R. S. C., Galindo, A. C. (2003). Química mineral e evolução petrológica do magmatismo alcalino neoproterozóico do maciço São José de Campestre (RN-PB), extremo NE da Província Borborema. *Revista Brasileira de Geociências*, 33(2), 225-236.
- Nascimento, M. A. L., Souza, Z. S., Hollanda, M. H. B. M., Pimentel, M. M., Macedo, M. H. F., Nascimento, R. S. C., Galindo, A. C. (2001). Geocronologia e assinatura isotópica Rb-Sr e Sm-Nd do magmatismo alcalino neoproterozóico no Maciço São José de Campestre, Nordeste da Província Borborema (NE do Brasil). *Estudos Geológicos*, 11, 67-79.
- Nascimento, R. S. C. (1998). *Petrologia dos Granitóides Brasileiros Associados à Zona de Cisalhamento Remígio-Pocinhos (PB)*. Dissertação (Mestrado). Natal: Pós Graduação de Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 174p.
- Nascimento, R. S. C. D., McReath, I., Galindo, A. C. (2010). Relationships between shearing and granitic magma emplacement: the Remígio-Pocinhos shear zone in the São José do Campestre massif, NE Brazil. *Geologia USP, Série Científica*, 10(3), 3-10.
- Njonfang, E., Nono, A. (2003). Clinopyroxene from some felsic alkaline rocks of the Cameroon Line, central Africa: petrological implications. *European Journal of Mineralogy*, 15(3), 527-542.
- Patiño-Douce, A. (1997) Generation of metaluminous A-type granites by low pressure melting of calc-alkaline granitoids. *Geology*, 25, 743-746.
- Pearce, J. A., Harris, N. B., Tindle, A. G. (1984). Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25(4), 956-983.
- Putirka, K. D. (2008). Thermometers and barometers for volcanic systems. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 69(1), 61-120.
- Rämö, O. T., Dall'Agnol, R., Macambira, M. J., Leite, A. A., Oliveira, D. C. (2002). 1.88 Ga oxidized A-type granites of the Rio Maria region, eastern Amazonian craton, Brazil: positively anorogenic!. *The Journal of Geology*, 110(5), 603-610.
- Ridolfi, F., Renzulli, A., Puerini, M. (2010). Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: an overview, new thermobarometric

- formulations and application to subduction-related volcanoes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160(1), 45-66.
- Schmidt, M. W. (1992). Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: an experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 110(2-3), 304-310.
- Schmidt, M. W., Thompson, A. B. (1996). Epidote in calc-alkaline magmas: An experimental study of stability, phase relationships, and the role of epidote in magmatic evolution. *American Mineralogist*, 81, 462-474.
- Schumacher, J. C. (1997). The estimation of ferric iron in electron microprobe analysis of amphiboles. *Mineralogical Magazine*, 61, 312-321.
- Sial, A. N., Vasconcelos, P. M., Ferreira, V. P., Pessoa, R. R., Brasilino, R. G., Moraes Neto, J. M. (2008). Geochronological and mineralogical constraints on depth of emplacement and ascension rates of epidote-bearing magmas from northeastern Brazil. *Lithos*, 105(3-4), 225-238.
- Siégl, C., Bryan, S. E., Allen, C. M., e Gust, D. A. (2018). Use and abuse of zircon-based thermometers: A critical review and a recommended approach to identify antecrystic zircons. *Earth-Science Reviews*, 176, 87-116.
- Souza, V. O. (2016). *Magmatismo Granítico na Porção Central do Domínio Rio Piranhas-Seridó, Província Borborema: Geologia e Petrologia do Stock Flores (RN)*. Dissertação (Mestrado). Natal: Pós Graduação de Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 56p+anexo.
- Souza, V. O., Galindo, A. C., Alves da Silva, F. C. (2017). O Stock Flores: Exemplo de magmatismo granítico tipo-A no Domínio Rio Piranhas-Seridó, NE da Província Borborema. *Pesquisas em Geociências*, 44(2), 345-366.
- Souza, Z. S., Montel, J. M., Gioia, S. M. L. C., Hollanda, M. H. B. M., Nascimento, M. A. L., Jardim de Sá, E. F., Amaro, V. E., Pimentel, M. M., Lardeaux, J.-M., Veschambre, M. (2006). Electron microprobe dating of monazite from high-T shear zones in the São José de Campestre Massif, NE Brazil. *Gondwana Research*, 9(4), 441-455.
- Steiner, J.C., Jahns, R.H., Luth, W.C. (1975). Crystallization of alkali feldspar and quartz in the haplogranite system $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8\text{-KAlSi}_3\text{O}_8\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ at 4 kb. *Geological Society of America Bulletin*, 86, 83-98
- Tuttle, O. F., Bowen, N. L. (1958). Origin of granite in the light of experimental studies in the system: $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ (Vol. 74). *Geological Society of America*. Vol. 74.
- Van Achterbergh, E., Ryan, C., Jackson, S., Griffin, W., Sylvester, P. (2001). Appendix 3 Data reduction software for LA-ICP-MS. Laser Ablation-ICP-mass spectrometry in the earth sciences: principles and applications. 29, *Mineralogical Association of Canada Short Course*, pp 239-243.
- Villaseca, C., Orejana, D., Paterson, B.A., 2007. Zr-LREE rich minerals in residual peraluminous granulites, another factor in the origin of low Zr-LREE granitic melts? *Lithos*, 96 (3-4), 375-386
- Watson, E. B., Harrison, T. M. (1983). Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2), 295-304.
- Wones, D. R. (1989). Significance of the assemblage titanite+ magnetite+ quartz in granitic rocks. *American Mineralogist*, 74(7-8), 744-749.
- Yang, X. M. (2017). Estimation of crystallization pressure of granite intrusions. *Lithos*, 286, 324-329.

- Zen, E., Hammarstrom, J. M. (1988). Plumbing the depth of plutons by magmatic epidote±hornblende association: a cautionary review and an example from Round Valley Pluton, Western Idaho. *Geological Society of America, Rocky Mountain Section Annual Meeting, Abstracts*, 20, 475-476.
- Zhang, Z., & Saxena, S. K. (1991). Thermodynamic properties of andradite and application to skarn with coexisting andradite and hedenbergite. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 107(2), 255-263.

CAPÍTULO VIII. CONCLUSÕES

O estudo integrado e comparativo da petrografia, litoquímica, química mineral e condições de cristalização dos granitos de afinidade alcalina (tipo-A) intrusivos nos Domínios São José do Campestre (SJC) e Rio Piranhas-Seridó (RPS), no extremo NE da Província Borborema permitiu concluir que:

- O magmatismo granítico ediacarano de afinidade alcalina (tipo-A) nos Domínio São José do Campestre (SJC) é representado pelos plútons Japi, Caxexa, Serra do Boqueirão, Serra do Algodão, Olho D'Água. No Domínio São José do Campestre é representado pelo plúton Serra Negra do Norte e *stock* Flores.
- O plúton Serra Negra do Norte, apesar de exibir aspectos alcalinos e assinatura de granitos tipo-A, apresenta-se com características transicionais entre corpos alcalinos e cálcio-alcalinos. Destoa também dos demais plútons ao apresentar características mais magnesianas, enquanto os demais apresentam características "ferroanas".
- Os plútons intrusivos no Domínio SJC possuem maiores teores de álcalis-totais (média de 10,3% peso) e predominam álcali-feldspato granitos, sienitos e sienogranitos, com diopsídio, hedenbergita ou egrina-augita. Nos plútons alojados no Domínio RPS ocorrem sieno- e monzogranitos com biotita $\pm$ Mg-ferri-hornblenda $\pm$ diopsídio.
- A cristalização dos plútons ocorreu sob pressões entre 3,0–3,7 kbar (~11–14 km em profundidade), à exceção do plúton Japi, com pressões médias superiores aos demais, na ordem de 5,3 kbar (~20 km).
- As temperaturas de *liquidus* foram modeladas entre 885–917 °C, e valores mais baixos para o *stock* Flores, 818 °C, e *solidus* entre 660–700 °C.
- Quando presentes, clinopiroxênios, anfibólios e biotita se formam entre 813–822 °C, 728–751 °C e 750–789 °C, respectivamente.
- O geotermômetro Zr-em-titanita indica temperaturas da ordem de 780 °C (máximas de 830 °C) para o plúton Caxexa.

- A cristalização ocorreu sob condições essencialmente oxidantes para a maioria dos plútons ($+1,0 < \Delta_{\text{QFM}} < +2,1$; $+0,4 < \Delta_{\text{NNO}} < +1,5$), à exceção do *stock* Flores, formado sob condições levemente mais reduzidas ($\Delta_{\text{QFM}} \approx 0,0$; $\Delta_{\text{NNO}} \approx -0,6$).
- O fato dos plútons associados a zonas de cisalhamento regionais serem mais enriquecidos em álcalis e, em média mais profundos, reforça o papel do controle estrutural na colocação e no contraste químico entre os granitos estudados.

IX. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, C. N., Guimarães, I. P., e Silva Filho, A. F. (2002). A-type post-collisional granites in the Borborema province-NE Brazil: The Queimadas pluton. *Gondwana Research*, 5(3), 667-681.
- Almeida, F. D., Hasui, Y., Brito Neves, B. B., e Fuck, R. A. (1977). Províncias estruturais brasileiras. *Simpósio de Geologia do Nordeste*, 8(1977), 363-391.
- Almeida, F.F.M., Hasui, Y., Brito Neves, B.B., Fuck, R.A. (1981). Brazilian structural provinces. An introduction. *Earth Science Reviews* 17, 1-29.
- Almeida, F.F.M., Hasui, Y., Brito Neves, B. B. ("The upper precambrian of South America." *Boletim IG 7* (1976): 45-80.
- Anderson, J. L. (1996). Status of thermobarometry in granitic batholiths. *Earth and Environmental Science Transactions of The Royal Society of Edinburgh*, 87(1-2), 125-138.
- Anderson, J. L., e Bender, E. E. (1989). Nature and origin of Proterozoic A-type granitic magmatism in the southwestern United States of America. *Lithos*, 23(1-2), 19-52.
- Anderson, J. L., e Smith, D. R. (1995). The effects of temperature and fO_2 on the Al-in-hornblende barometer. *American Mineralogist*, 80(5-6), 549-559.
- Angelim, L.A.A., Nesi, J.R., Torres, H.H.F., Medeiros, V.C., Santos, C.A., Veiga Junior, J.P., Mendes, V.A., (2006). *Geologia e Recursos Minerais do estado do Rio Grande do Norte: Texto Explicativo dos Mapas Geológico e de Recursos Minerais do estado do Rio Grande do Norte Escala 1:500.000*. Serviço Geológico Brasileiro (CPRM), Recife, p. 233.
- Araújo, J.M.M.; Trindade, R.I.; Galindo, A.C.; Souza, Z.S.; Jardim de Sá, E.F. (1993). Características petrográficas preliminares do granito Serra do Algodão (Barra de Santa Rosa - PB): um plutão alcalino na região do Seridó. In: SBG/Núcleo Nordeste, *Simpósio de Geologia do Nordeste*, 15, Natal, Boletim 13, 101-103.
- Archanjo, C.J., Fetter, A. H. (2004). Emplacement setting of the granite sheeted pluton of Esperança (Brasiliano orogen, northeastern Brazil)." *Precambrian Research* 135.3: 193-215.

- Blundy, J., Cashman, K. (2001) Ascent-driven crystallisation of dacite magmas at Mount St Helens, 1980–1986. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 140.6 (2001): 631-650.
- Birk, D., Koljonen, T., Rosenberg, R. J. (1979). Rare earth distribution in Archean granitoid plutons of the Wabigoon volcanic–plutonic belt, northwestern Ontario. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 16(2), 270-289.
- Bogaerts, M., Scaillet, B., Auwera, J. V. (2006). Phase equilibria of the Lyngdal granodiorite (Norway): implications for the origin of metaluminous ferroan granitoids. *Journal of Petrology*, 47(12), 2405-2431.
- Bonin, B. (2007). A-type granites and related rocks: evolution of a concept, problems and prospects. *Lithos*, 97(1), 1-29.
- Bonin, B., and Giret, A. (1984). The plutonic alkaline series: the problem of their origin and differentiation, the role of their mineralogical assemblages. *Physics of the earth and planetary interiors* 35.1-3: 212-221.
- Brito Neves, B.B. (1975) *Regionalização geotectônica do Precambriano nordestino*. Diss. Universidade de São Paulo.
- Brito Neves, B. B., Santos, E. J. D., Fuck, R. A., e Santos, L. C. M. L. (2016). A preserved early Ediacaran magmatic arc at the northernmost portion of the Transversal Zone central subprovince of the Borborema Province, Northeastern South America. *Brazilian Journal of Geology*, 46(4), 491-508.
- Brito Neves, B. B., Santos, E.J., Van Schumus, W. R. (2000). "Tectonic history of the Borborema Province." *Tectonic Evolution of South America* 31: 15.
- Brito Neves B.B., Van Schmus, W.R., Angelim, L.A.A. (2015). "Contribuição ao conhecimento da evolução geológica do Sistema Riacho do Pontal–PE, BA, PI." *Geologia USP. Série Científica* 15.1: 57-93.
- Burk, S. R. (2017). *Zircon as a Proxy for "taking the Temperature" of Granites: An Example Using Zircon Thermometry Applied to Grenvillian Mid-crustal Magmas in the Blue Ridge Province, Virginia*. Tese (Mestrado). University of Kentucky.
- Campos, B.C.S. (2016). *Petrografia, litoquímica, química mineral e termobarometria de rochas cálcioalcalinas de alto K de textura porfírica, ediacaranas, no extremo NE da Província Borborema (NE do Brasil)* (Master's thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte).

- Campos, B. C. S., Vilalva, F. C. J., do Nascimento, M. A. L., e Galindo, A. C. (2016). Crystallization conditions of porphyritic high-K calc-alkaline granitoids in the extreme northeastern Borborema Province, NE Brazil, and geodynamic implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 70, 224-236.
- Campos, T.F.C., (1997). *Geoquímica de Rochas Granitóides e Seus Minerais do Batólito da Serra Negra do Norte-RN e Rio Espinharas-PB, Nordeste do Brasil*. Tese (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, p. 408.
- Campos, T. F. C., Neiva, A. M. R., e Nardi, L. S. V. (2000). Geochemistry of granites and their minerals from Serra Negra do Norte Pluton, northeastern Brazil. *Chemie der Erde*, 60(4), 279-304.
- Cavalcante, R., Cunha, A. L. C. D., Oliveira, R. G. D., Medeiros, V. C. D., Dantas, A. R., Costa, A. P. D., & Larizzatti, J. H. (2016). *Metagenia das Províncias Minerais do Brasil: Área Seridó-Leste, extremo nordeste da Província Borborema (RN-PB), estados do Rio Grande do Norte e da Paraíba*. CPRM. 103p
- Chappell, B., e White, A. (1974). Two contrasting granite types. *Pacific geology*, 8(2), 173-174.
- Claiborne, L. L., Miller, C. F., e Wooden, J. L. (2010). Trace element composition of igneous zircon: a thermal and compositional record of the accumulation and evolution of a large silicic batholith, Spirit Mountain, Nevada. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160(4), 511-531.
- Collins, W.J.; Beams, S.D.; White, A.J.; Chappel, B.W. (1982). Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 80: 189-200.
- Costa, A. P.; Dantas, A. R. *Carta geológica Lajes Folha SB.24-x-D-VI Estado do Rio Grande do Norte*. Recife: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2014. 1 mapa colorido, 90,00 x 115,00 cm. Escala 1:100.000. Programa Geologia do Brasil – PGB
- Costa, A.P., Dantas, A.R., Oliveira, R.G., Medeiros, V.C. (2015). Complexo Arábia: unidade Sideriana no Domínio Rio Piranhas – Seridó, NE do Brasil. In: SBG/Núcleo Nordeste, *Simpó. Geol. Nord.*, 26, CD-ROM.

- Cunha, I. R. V., Dall'Agnol, R., e Feio, G. R. L. (2016). Mineral chemistry and magnetic petrology of the Archean Planalto Suite, Carajás Province–Amazonian Craton: Implications for the evolution of ferroan Archean granites. *Journal of South American Earth Sciences*, 67, 100-121.
- Cunha, J. A. P. D. (2018). *Mecanismo de colocação e auréola termal provocada pelo plutão ediacarano Catingueira, Zona Transversal, Província Borborema, Nordeste do Brasil* (Master's thesis, Brasil).
- Dall'Agnol, R., e de Oliveira, D. C. (2007). Oxidized, magnetite-series, rapakivi-type granites of Carajás, Brazil: implications for classification and petrogenesis of A-type granites. *Lithos*, 93(3), 215-233.
- Dall'Agnol, R., Scaillet, B., e Pichavant, M. (1999). An experimental study of a lower Proterozoic A-type granite from the Eastern Amazonian Craton, Brazil. *Journal of Petrology*, 40(11), 1673-1698.
- Dantas, E. L.; Souza, Z. S.; Wernick, E.; Hackspacher, P. C.; Martin, H.; Xiaodong, D.; Li, J. W. (2013). Crustal growth in the 3.4–2.7 Ga São José de Campestre Massif, Borborema Province, NE Brazil. *Precambrian Research*, v. 227, p. 120-156.
- Dantas, E. L., Van Schmus, W. R., Hackspacher, P. C., Fetter, A. H., de Brito Neves, B. B., Cordani, U., ... e Williams, I. S. (2004). The 3.4–3.5 Ga São José do Campestre massif, NE Brazil: remnants of the oldest crust in South America. *Precambrian Research*, 130(1-4), 113-137.
- Dantas, E.L., (1997). Geocronologia U–Pb e Sm–Nd de *Terrenos Arqueanos e Paleoproterozóicos do Maciço Caldos Brandão, NE do Brasil*. Ph.D Thesis. Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP-Campus de Rio Claro, 208 pp.
- Deer, W. A., Howie, R. A., e Zussman, J. (2013). *An introduction to the rock-forming minerals: Mineralogical Society*.
- Deer, W. A., Howie, R. A., e Zussman, J. (1996). *Rock-Forming Minerals*. Vol. 5B: Non-silicates: Sulphates, Carbonates, Phosphates, Halides. In Geol. Soc. (Vol. 5).
- Delgado, I.M., Souza, J.D., Silva, L.C., Silveira Filho, N.C., Santos, R.A., Pedreira, A.J., Guimarães, J.T., Angelim, L.A.A., Vasconcelos, A.M., Gomes, I.P., Lacerda Filho, J.V., Valente, C.R., Perrotha, M.M., Heineck, C.A. (2003). Geotectônica do

- Escudo Atlântico. In: Bizzi, L.A. (ed). *Geologia, tectônica e Recursos Minerais do Brasil: Texto, mapas e SIG*. Brasília, CPRM, p. 227-234.
- Dou, J. Z., Zhang, H. F., Tong, Y., Wang, F., Chen, F. K., e Li, S. R. (2018). Application of geothermo-barometers to Mesozoic granitoids in the Jiaodong Peninsula, eastern China: Criteria for selecting methods of pressure estimation and implications for crustal exhumation. *Journal of Asian Earth Sciences*, 160, 271-286.
- Droop, G. T. R. (1987). A general equation for estimating Fe³⁺ concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria. *Mineralogical magazine* 51.361: 431-435.
- Dymek, R. F. (1983). Titanium, aluminum and interlayer cation substitutions in biotite from high-grade gneisses' West Greenland. *American Mineralogist*, 6, 880-399
- Eby, G.N. (1992). Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications. *Geology*, 20: 641-644.
- Eby, G. N. (2011). A-type granites: magma sources and their contribution to the growth of the continental crust. *Seventh Hutton Symposium on Granites and Related Rocks*, p. 50-51.
- Eby, G. N. (2006). Carbonatites to alkali granites; petrogenetic insights from the Chilwa and Montereian Hills-White Mountain igneous provinces. *Abstract Volume [Geological Association of Canada]*, 31, 45-45.
- Evensen, N. M., Hamilton, P. J., e O'nions, R. K. (1978). Rare-earth abundances in chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42(8), 1199-1212.
- Ferreira, V. P., Sial, A.N. (1993). Pyroxene and amphibole chemistry of peralkalitic ultra-potassic syente and associated pyroxenite Nort-Eastern Brazil: an approach to test liquid immiscibility process. *Revista Brasileira de Geociências* 23.2 (1993): 139-146.
- Ferreira, V. P.; Sial, A. N. (1986). The peralkalic magmatism in the precambrian cachoeirinha-salgueiro foldbelt, northeast brazil: geochemical aspects. *Revista Brasileira de Geociências*, 16(1), 73-85.
- Frost, B.R., Barnes, C.G., Collins, W.J., Arculus, R.J., Ellis, D.J., Frost, C.D., (2001). A chemical classification for granitic rocks. *J. Petrol.* 42 (11), 2033 e 2048.

- Frost, C.D., e Frost, B.R. (2011). On ferroan (A-type) granitoids: their compositional variability and modes of origin. *Journal of Petrology*, 52(1), 39-53.
- Galindo, A. C.; Sá, J. M. (2000) Contexto tectônico e geoquímico do granitóide Catingueira: um magmatismo alcalino-peralcalino no limite norte da Zona Transversal da Província Borborema. *Geochimica Brasiliensis*, v. 14, n. 1, p. 1-21.
- Galindo, A. C., Silva, F. C. A., e de Souza, Z. S. (2012). Química Mineral de leucomicrogranitos Neoproterozóicos do Domínio Rio Grande do Norte (DRN). *Geochimica Brasiliensis*, 26(1), 19.
- Gualda, G. A., Ghiorso, M. S., Lemons, R. V., e Carley, T. L. (2012). Rhyolite-MELTS: a modified calibration of MELTS optimized for silica-rich, fluid-bearing magmatic systems. *Journal of Petrology*, 53(5), 875-890.
- Gualda G.A.R. e Vlach S.R.F. (2007). The Serra da Graciosa A-type Granites and Syenites, southern Brazil. Part 2: Petrographic and mineralogical evolution of the alkaline and aluminous associations. *Lithos*, 93: 310-327.
- Gualda, G. A., e Vlach, S. R. (2005). Stoichiometry-based estimates of ferric iron in calcic, sodic-calcic and sodic amphiboles: A comparison of various methods. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 77(3), 521-534.
- Guimarães, I. P., Silva Filho, A. F., de Araújo, D. B., de Almeida, C. N., e Dantas, E. (2009). Trans-alkaline magmatism in the Serrinha–Pedro Velho Complex, Borborema Province, NE Brazil and its correlations with the magmatism in eastern Nigeria. *Gondwana Research*, 15(1), 98-110.
- Guimaraes, I. P., Silva Filho, A. F., Almeida, C. N., Van Schmus, W. R., Araújo, J. M., Melo, S. C., e Melo, E. B. (2004). Brasileiro (Pan-African) granitic magmatism in the Pajeú-Paraíba belt, Northeast Brazil: an isotopic and geochronological approach. *Precambrian Research*, 135(1-2), 23-53.
- Guimarães, I. P., Silva Filho, A. F., Melo, S. C., e Macambira, M. B. (2005). Petrogenesis of A-type granitoids from the Alto Moxoto and Alto Pajeu terranes of the Borborema Province, NE Brazil: constraints from geochemistry and isotopic composition. *Gondwana Research*, 8(3), 347-362.
- Guimarães, I. P. e Silva Filho, A.F. (2000). "Evidence of multiple sources involved in the genesis of the neoproterozoic itapetim granitic complex, NE Brazil, based on

- geochemical and isotopic data." *Journal of South American Earth Sciences* 13.6 (2000): 561-586.
- Grebennikov, A. V. (2014). A-type granites and related rocks: petrogenesis and classification. *Russian Geology and Geophysics*, 55(11), 1353-1366.
- Hafnadóttir, M. Ó. (2014). *Understanding igneous processes through zircon trace element systematics: prospects and pitfalls*. Dissertations in Geology at Lund University.
- Hackspacher, P.C.; Van Schmus, W.R.; Dantas, E.L. (1990). Um embasamento transamazônico na Província Borborema. In: *Congres. Bras. Geol.*, 36. Natal, 1990. *Anais*, Recife, SBG. V. 6, p. 268-2696.
- Hammarstrom, J. M., e Zen, E. A. (1986). Aluminum in hornblende: an empirical igneous geobarometer. *American Mineralogist*, 71(11-12), 1297-1313.
- Harrison, T. M., e Watson, E. B. (1984). Apatite Kinetics of zircon dissolution and zirconium diffusion in granitic melts of variable water content. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 84(1), 66-72.
- Hayden, L. A., Watson, E. B., e Wark, D. A. (2008). A thermobarometer for sphene (titanite). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 155(4), 529-540.
- Hawthorne, F. C., Oberti, R., Harlow, G. E., Maresch, W. V., Martin, R. F., Schumacher, J. C., e Welch, M. D. (2012). Nomenclature of the amphibole supergroup. *American Mineralogist*, 97(11-12), 2031-2048.
- Hsu, W., e Crozaz, G. (1995). Negative Sm, Eu, and Yb Anomalies in Enstatite from UECs: The Results of Evaporation or Igneous Fractionation?. In *Lunar and Planetary Science Conference* (Vol. 26).
- Hollanda, M.H.B.M. (1996). *Mapeamento Geológico e Petrografia do Plúton de Japi (RN)* – (Trabalho de conclusão de curso), Universidade Federal do Rio Grande do Norte. p. 94.
- Hollanda, M.H.B.M., (1998). *Mecanismos de Alojamentos de Magmas Granitoides: Exemplo do Plúton de Japi (RN)* (Tese Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, p. 126.
- Hollanda, M. H. B. M.; Archanjo, C. J.; Bautista, J. R.; Souza, L. C. (2015). Detrital zircon ages and Nd isotope compositions of the Seridó and Lavras da Mangabeira

- basins (Borborema Province, NE Brazil): Evidence for exhumation and recycling associated with a major shift in sedimentary provenance. *Precambrian Research*, v. 258, p. 186-207.
- Hollanda, M. H. B. M., Jardim de Sá, E. F., Galindo, A. C., e Souza, Z. S. (1999). Shear zone control on the emplacement of granitoid magmas: an example from the Japi Complex, Seridó Belt, NE Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 29(1), 41-46.
- Holtz, F., Johannes, W., Tamic, N., e Behrens, H. (2001). Maximum and minimum water contents of granitic melts generated in the crust: a reevaluation and implications. *Lithos*, 56(1), 1-14.
- Jardim de Sá, E.F. (1994). *A Faixa Seridó (Província Borborema, NE do Brasil) e o seu significado geodinâmico na Cadeia Brasileira/PanAfricana*. Brasília. 804 p. (Tese de Doutorado) Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, Brasília.
- Jardim de Sá, E. F., Macedo, M. H., Fuck, R. A., e Kawashita, K. (1992). Terrenos proterozóicos na Província Borborema e a margem norte do Cráton São Francisco. *Brazilian Journal of Geology*, 22(4), 472-480.
- Jardim de Sá, E. F., Trindade, R. I.F., Hollanda, M. H. B.M., Araújo, J. M. M., Galindo, A. C., Amaro, V. E., Souza, Z. S., Vignerresse, J. L. e Lardeaux, J. M. (1999). Brasileiro syntectonic alkaline granites emplaced in a strike slip/extensional setting (Eastern Seridó Belt, NE Brazil). *Anais-Academia Brasileira De Ciências*, 71, 17-28.
- Jardim de Sá, E. F., Salim, J. (1980) "Reavaliação dos conceitos estratigráficos na região do Seridó (RN-PB)." *Miner. Meta* 80.421: 16-28.
- Johnson, M. C., e Rutherford, M. J. (1989). Experimental calibration of the aluminum-in-hornblende geobarometer with application to Long Valley caldera (California) volcanic rocks. *Geology*, 17(9), 837-841.
- Klimm, K., Holtz, F., Johannes, W., e King, P. L. (2003). Fractionation of metaluminous A-type granites: an experimental study of the Wangrah Suite, Lachlan Fold Belt, Australia. *Precambrian Research*, 124(2-4), 327-341.
- King, P. L., Chappell, B. W., Allen, C. M., e White, A. J. R. (2001). Are A-type granites the high-temperature felsic granites? Evidence from fractionated granites of the Wangrah Suite. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48(4), 501-514.

- La Roche, H.; Leterrier, J.; Granclaude, P.; Marchal, M. (1980). A classification of volcanic and plutonic rocks using R1-R2 diagram and major element analyses. Its relationship with current nomenclature. *Chem. Geol.*, 29: 183-210.
- Lages, G. A., e Marinho, M. S. (2012). Folha Boqueirão SB24Z-D-III Escala 1: 100 000.
- Lameyre, J.M., (1987). Granites and evolution of the crust. *Rev. Bras. Geoci.* 17, 349 e 359.
- Lee, C. T. A., e Bachmann, O. (2014). How important is the role of crystal fractionation in making intermediate magmas? Insights from Zr and P systematics. *Earth and Planetary Science Letters*, 393, 266-274.
- Legrand, J.M.; Liegeois, J.P.; Deutsch, S. (1991). Datacao U/Pb e Rb/Sr das rochas precambrianas da regiSo de Caicd. Reavaliagao da definigao de um embasamento arqueano. In: *Simp. Geol. Nordeste*, 14. Recife, (1991). Atas... Recife, SBG, p. 276-279.
- Lima, J. V., Guimarães, I. D. P., Santos, L., Amorim, J. V. A., e Farias, D. J. S. (2017). Geochemical and isotopic characterization of the granitic magmatism along the Remígio-Pocinhos shear zone, Borborema Province, NE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 75, 116-133.
- Lima, J. V., de Pinho Guimarães, I., dos Santos, L., Farias, D. J. S., e de Amorim, J. V. A. (2016). Magmatismo Granítico Ferro-Potássico Pós-Colisional Nos Domínios Norte E Central Da Província Borborema: Plúton Pilõesinhos E Complexo Solânea. *Estudos Geológicos*, 26, 1.
- Loiselle, M.C., e Wones, D.R. (1979). Characteristics and origin of anorogenic granites. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 11, 468.
- Long, L.E., Sial, A.N., Nekvasil, H., Borba, G.S., (1986). Origin of granite at Cabo de Santo Agostinho, Northeast Brazil. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 92, 341–350.
- Luth, W. C., Jahns, R. H., e Tuttle, O. F. (1964). The granite system at pressures of 4 to 10 kilobars. *Journal of Geophysical Research*, 69(4), 759-773.
- Maia, S. M. C. (2004). *Estudo integrado geológico/tecnológico de rochas ornamentais: os Granitos Flores e Jacarandá, RN* (Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte).

- Maia, S. M. C.; Galindo, A.C.; Torquato, J.R.F.; Torquato, M.F.B. (2006). Caracterização tecnológica do granito ornamental Vermelho Flores, Rio Grande do Norte, Brasil. *Estudos Geológicos*, 16 (2): 41-54.
- Maniar, P.D. e Piccoli, P.M. (1989). Tectonic discrimination of granitoids. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 101: 635-643.
- Martin, R. F. (2006). A-type granites of crustal origin ultimately result from open-system fenitization-type reactions in an extensional environment. *Lithos*, 91(1), 125-136.
- Medeiros, V. D. (1995). Sensoriamento remoto e petrologia de granitóides brasileiros no Domínio da Zona Transversal, Nordeste do Brasil. *Pós-Graduação em Geociências: (inédito). Tese (Mastrado), Univ. Federal de Pernambuco, Recife.*
- Medeiros, V.C. (2004). Evolução geodinâmica e condicionamento estrutural dos terrenos Piancó-Alto Brígida e Alto Pajeú, domínio da zona transversal, NE do Brasil. Tese (Doutorado em Geodinâmica; Geofísica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- Medeiros, V.C. (2017). "Comparações geoquímicas entre granitóides do Domínio da zona transversal, Nordeste do Brasil." *Revista Brasileira de Geociências* 25.4: 333-342.
- Medeiros, V. C., Jardim de Sá, E. F. (2009). O Grupo Cachoeirinha (Zona Transversal, NE do Brasil) redefinição e proposta de formalização. *Revista de Geologia*, 22(2), 124-136.
- Melo, E. B. (2004). *Petrologia e geoquímica de granitóides a sudeste da zona de cisalhamento Afogados da Ingazeira – PE Nordeste do Brasil*. Tese de Doutorado
- Milani, L., Lehmann, J., Naydenov, K. V., Saalman, K., Kinnaird, J. A., Daly, J. S., Frei, D. e Sanz, A. L. G. (2015). A-type magmatism in a syn-collisional setting: The case of the Pan-African Hook Batholith in Central Zambia. *Lithos*, 216, 48-72.
- Miller, C. F., McDowell, S. M., & Mapes, R. W. (2003). Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance. *Geology*, 31(6), 529-532.
- Miyashiro, A. (1978). Nature of alkalic volcanic rock series. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 66(1), 91-104.

- Moecher, D. P., McDowell, S. M., Samson, S. D., e Miller, C. F. (2014). Ti-in-zircon thermometry and crystallization modeling support hot Grenville granite hypothesis. *Geology*, 42(3), 267-270.
- Morimoto, N. "Nomenclature of pyroxenes." *Mineralogy and Petrology* 39.1 (1988): 55-76.
- Mutch, E. J. F., Blundy, J. D., Tattitch, B. C., Cooper, F. J., e Brooker, R. A. (2016). An experimental study of amphibole stability in low-pressure granitic magmas and a revised Al-in-hornblende geobarometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 171(10), 85.
- Nachit-Ouinekh, F., Dartigues, J. F., Henry, P., Becg, J. P., Chastan, G., Lemaire, N., e El Hasnaoui, A. (2005). Use of the headache impact test (HIT-6) in general practice: relationship with quality of life and severity. *European journal of neurology*, 12(3), 189-193.
- Nachit H., Razafimahefa N., Stussi J.M., Carron J.P. (1985). Composition chimique des biotites et typologie magmatique des granitoides. *Comptés Rendus Acad. Sci. Paris* 301(11):813-818
- Naney, M. T. "Phase equilibria of rock-forming ferromagnesian silicates in granitic systems." *American journal of science* 283.10 (1983): 993-1033.
- Nardi, L. V. S. (2016). Granitoides e séries magmáticas: o estudo contextualizado dos granitoides. *Pesquisa. em Geociências*, 43(1), 85-99.
- Nardi, L. V., Bitencourt, M. F. (2009). A-type granitic rocks in post-collisional settings in southernmost Brazil: their classification and relationship with tectonics and magmatic series. *The Canadian Mineralogist*, 47(6), 1493-1503.
- Nascimento, M.A.L., (2000). *Petrologia do Magmatismo Tardi-brasiliano no Maciço São José de Campestre (RN-PB), com ênfase no Plúton Alcalino Caxexa* (M.Sc.thesis). Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, p. 142.
- Nascimento, M. A. L., Souza, Z. S., R. S. C., e Galindo, A. C. (2003). Química mineral e evolução petrológica do magmatismo alcalino neoproterozóico do maciço São José de Campestre (Rn-Pb), extremo NE da Província Borborema. *Brazilian Journal of Geology*, 33(2), 225-236.

- Nascimento, M. A. L., Galindo, A. C., e de Medeiros, V. C. (2015). Ediacaran to Cambrian magmatic suites in the Rio Grande do Norte domain, extreme Northeastern Borborema Province (NE of Brazil): Current knowledge. *Journal of South American Earth Sciences*, 58, 281-299.
- Nascimento, R.S.C., (1998). *Petrologia dos Granitoides Brasileiros associados à Zona de Cisalhamento Remígio-Pocinhos (PB)* (M.Sc. thesis). Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, p. 133.
- Nascimento, R. S. C. D., McReath, I., & Galindo, A. C. (2010). Relationships between shearing and granitic magma emplacement: the Remígio-Pocinhos shear zone in the São José do Campestre massif, NE Brazil. *Geologia da USP, Série Científica*, 10(3), 3-10.
- Nédélec, A., e Bouchez, J. L. (2015). *Granites: petrology, structure, geological setting, and metallogeny*. OUP Oxford.
- Nekvasil, H., (1988). Calculated effect of anorthite component on the crystallization paths of H₂O-undersaturated haplogranitic melts. *American Mineralogist* 73, 966–981.
- Njonfang, E., Nono, A. (2003). "Clinopyroxene from some felsic alkaline rocks of the Cameroon Line, central Africa: petrological implications." *European Journal of Mineralogy* 15.3: 527-542.
- Oliveira R., Wilians, S., Archanjo, C.J. (2011). "Estruturas e histórias deformacionais contrastantes dos granitos sintectônicos de Campina Grande e Serra Redonda, Província Borborema, NE do Brasil." *Geologia USP. Série Científica* 11.1: 3-17.
- Peacock, M. A. (1934). Classification of igneous rock series. *Journal of Geology* 39, 689-710.
- Pearce, J.A.; Harris, N.B.W.; Tindle, A.G. (1984). Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J. Petrol.*, 25: 956-983.
- Putirka, K. D. (2008). Thermometers and barometers for volcanic systems. *Reviews in mineralogy and geochemistry*, 69(1), 61-120.
- Putirka, K., Johnson, M., Kinzler, R., Longhi, J., e Walker, D. (1996). Thermobarometry of mafic igneous rocks based on clinopyroxene-liquid equilibria, 0–30 kbar. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 123(1), 92-108.

- Ragland, P. C. (1989). *Basic analytical petrology* (Vol. 369). New York: Oxford University Press.
- Ridolfi, F., e Renzulli, A. (2012). Calcic amphiboles in calc-alkaline and alkaline magmas: thermobarometric and chemometric empirical equations valid up to 1,130° C and 2.2 GPa. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 163(5), 877-895.
- Ridolfi, F., Renzulli, A., e Puerini, M. (2010). Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: an overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160(1), 45-66.
- Rogers, J.J.W., Greenberg, J.K., (1981). Trace elements in continental margin magmatism. Part III. Alkali granites and their relationship to cratonization. *Bull. Geol. Soc. Am.* 92, 6e9.
- Sampaio, M. A. F. (2005). Petrologia, geoquímica e evolução crustal do complexo granítico Esperança, terreno Alto Pajeú, do domínio da Zona Transversal, província Borborema, nordeste brasileiro.
- Santos, E.J. (1995). *O complexo granítico Lagoa das Pedras: acreção e colisão na região de Floresta (Pernambuco), Província Borborema*. Diss. Universidade de São Paulo.
- Santos, E.J. (1996). Ensaio preliminar sobre terrenos e tectônica acrescionária na Província Borborema. In: *Congresso Brasileiro de Geologia*, 39, 1-6 set. 1996, Salvador-Bahia. *Anais do*. Salvador: SBG. Núcleo Nordeste, 1996. 7v. v.6 p.47-50
- Santos, E. J. (1999). Belém de São Francisco, Folha SC.24-x-A: Estados de Pernambuco, Alagoas e Bahia. Brasília: CPRM, 1999. 1 CD-ROM, Escala 1:250.000. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil – PLGB
- Santos, E.J. e Brito Neves, B.B. (1984). Província Borborema. *O Pré-cambriano do Brasil*: 123-186.
- Santos, E. J., Brito Neves, B. B., Van Schmus, W. R., Oliveira, R. G., & Medeiros, V. C. (2000). An overall view on the displaced terrane arrangement of the Borborema Province, NE Brazil. In *International Geological Congress, 31th, Rio de Janeiro*,

- Brazil, General Symposia, Tectonic Evolution of South American Platform* (pp. 5-9).
- Santos, E. J., e Medeiros, V. C. (1999). Constraints from granitic plutonism on Proterozoic crustal growth of the Transverse Zone, Borborema Province, NE Brazil.
- Santos, L. C. M. D. L. (2012). *O paleoproterozoico (2.3 a 1.6 ga) do terreno Alto Moxotó, província Borborema: significado e implicações para o gondwana ocidental*. Dissertação de Mestrado.
- Santos, L. D. (2013). Caracterização petrológica e geoquímica dos granitoides intrudidos ao longo da zona de cisalhamento Coxixola, Província Borborema, NE Brasil: plutons Serra Branca e Coxixola.
- Santos, J. O. S., Hartmann, L. A., Gaudette, H. E., Groves, D. I., Mcnaughton, N. J., e 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, E. J., Van Schmus, W. R., Kozuch, M., & de Brito Neves, B. B. (2010). The Cariris Velhos tectonic event in northeast Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 29(1), 61-76.
- Schumacher, J. C. (1997). The estimation of ferric iron in electron microprobe analysis of amphiboles. *Mineral. Mag.*, 61, 312-321.
- Sial, A. N., e Ferreira, V. P. (1988). Brasiliano-age peralkaline plutonic rocks of the central structural domain, Northeast Brazil. *Rendiconti della Societa Italiana di Mineralogia e Petrologia*, 43(2), 307-342.
- Sial, A. N., Vasconcelos, P. M., Ferreira, V. P., Pessoa, R. R., Brasilino, R. G., e Neto, J. M. M. (2008). Geochronological and mineralogical constraints on depth of emplacement and ascension rates of epidote-bearing magmas from northeastern Brazil. *Lithos*, 105(3-4), 225-238.
- Silva Filho, M. A., Nesi, J.R., Mendes, V. A. (1985). Projeto Cachoeirinha: relatório final integrado. Recife: DNPM/CPRM, vol. 6, 128p
- Slagstad, T., Culshaw, N. G., Jamieson, R. A., Ketchum, J. W., e Tollo, R. P. (2004). Early Mesoproterozoic tectonic history of the southwestern Grenville Province,

- Ontario: constraints from geochemistry and geochronology of high-grade gneisses. *Memoirs-Geological Society of America*, 209-242.
- Smith, Peter, e Ian Parsons. "The alkali-feldspar solvus at 1 kilobar water-vapour pressure." *Mineralogical Magazine* 39.307 (1974): 747-767.
- Souza, V.O.D. (2016). *Magmatismo granítico na porção central do domínio Rio Piranhas-Seridó, Província Borborema: geologia e petrologia do Stock Flores (RN)* (Master's thesis, Brasil).
- Souza, V.O., Galindo, A.C., Alves da Silva, F.C. (2017). O Stock Flores: Exemplo de magmatismo granítico tipo-A no Domínio Rio Piranhas-Seridó, NE da Província Borborema Instituto de Geociências, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil. *Pesquisas em Geociências*, 44 (2): 345-366.
- Souza, Z.S. e Jardim de Sá, E.F. (1993). Metamorfismo de alta temperatura associado a uma estrutura transtraccional brasileira a SE de Barra de Santa Rosa (PB). In: SBG/Núcleo Nordeste, *Simp. Geol. NE*, 15, Natal, *Boletim* 13, 124-127.
- Souza, Z. S., Kalsbeek, F., Deng, X. D., Frei, R., Kokfelt, T.F., Dantas, E. L., Li, J. W., Pimentel, M.M. e Galindo, A. C. (2016). Generation of continental crust in the northern part of the Borborema Province, northeastern Brazil, from Archean to Neoproterozoic. *Journal of South American Earth Sciences*, 68, 68-96.
- Souza, Z. S., Martin, H., Peucat, J. J., De Sá, E. F. J., e Macedo, M. H. D. F. (2007). Calc-alkaline magmatism at the archaean–proterozoic transition: the caicó complex basement (NE Brazil). *Journal of Petrology*, 48(11), 2149-2185.
- Souza, Z. S., Montel, J. M., Gioia, S. M. L. C., Hollanda, M. H. B. M., do Nascimento, M. A. L., de Sá, E. F. J., ... e Veschambre, M. (2006). Electron microprobe dating of monazite from high-T shear zones in the São José de Campestre Massif, NE Brazil. *Gondwana Research*, 9(4), 441-455.
- Streckeisen, A.L. (1976). To Each Plutonic Rock Its Proper Name. *Earth Sci. Rev.*, 12: 1-33.
- Stussi, J. M., and M. Cuney. "Nature of biotites from alkaline, calc-alkaline and peraluminous magmas by Abdel-Fattah M. Abdel-Rahman: a comment." *Journal of Petrology* 37.5 (1996): 1025-1029.
- Sylvester, P.J. (1989). Post-collisional alkaline granites. *J. Geol.*, 97:180-261.

- Tischendorf, G., Gottesmann, B., Foerster, H. J., e Trumbull, R. B. (1997). On Li-bearing micas: estimating Li from electron microprobe analyses and an improved diagram for graphical representation.
- Trindade, R.I.F.; Araújo, J.M.M.; Jardim de Sá, E.F.; Galindo, A.C.; Souza, Z.S. (1995). Alojamento de granitóides no contexto da Zona de Cisalhamento Remígio-Pocinhos (Faixa Seridó, NE do Brasil). In: *Simp. Nac. Est. Tect.*, 5, Gramado, SBG. *Anais*, 1: 215-216.
- Turner, Simon, Mike Sandiford, and John Foden. "Some geodynamic and compositional constraints on" postorogenic" magmatism." *Geology* 20.10 (1992): 931-934.
- Van Achterbergh, E., Ryan, C., Jackson, S., Griffin, W., Sylvester, P. (2001). Appendix 3 Data reduction software for LA-ICP-MS. Laser Ablation-ICP-mass spectrometry in the earth sciences: principles and applications. 29, *Mineralogical Association of Canada Short Cours*, pp 239-243.
- Van Schmus, W. R., Brito Neves, B. B., Hackspacher, P., e Babinski, M. (1995). UPb and SmNd geochronologic studies of the eastern Borborema Province, Northeastern Brazil: initial conclusions. *Journal of South American Earth Sciences*, 8(3-4), 267-288.
- Van Schmus, W. R., Brito Neves, B. B., Williams, I. S., Hackspacher, P. C., Fetter, A. H., Dantas, E. L., e Babinski, M. (2003). The Seridó Group of NE Brazil, a late Neoproterozoic pre-to syn-collisional basin in West Gondwana: insights from SHRIMP U–Pb detrital zircon ages and Sm–Nd crustal residence (TDM) ages. *Precambrian Research*, 127(4), 287-327.
- Van Schmus, W. R., Kozuch, M., Brito Neves, B.B. (2011). "Precambrian history of the Zona Transversal of the Borborema Province, NE Brazil: insights from Sm–Nd and U–Pb geochronology." *Journal of South American Earth Sciences* 31.2-3: 227-252.
- Van Schmus, W. R., Oliveira, E. P., Silva Filho, A. F., Toteu, S. F., Penaye, J., e Guimarães, I. P. (2008). Proterozoic links between the Borborema Province, NE Brazil, and the Central African fold belt. *Geological Society, London, Special Publications*, 294(1), 69-99.

- Watson, E. B., e Harrison, T. M. (1983). Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2), 295-304.
- Wilson M.J. (1989). Igneous Petrogenesis. *A Global Tectonic Approach*. London, Boston, Sydney, Wellington, Unwin Hyman, 466 p.
- Whalen, J.B. A-type granites:> 25 years later. (2005). *Geochimica et Cosmochimica Acta* 69 (10), A84-A84
- Whalen, J.B.; Currie, K.L.; Chappel, B.W. (1987). A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 95: 407-419.
- Wones, D.R. (1989). Significance of the assemblage titanite + magnetite + quartz in granitic rocks. *Amer. Mineral.*, 74: 744-749.
- Wright, J.B., (1969). A simple alkalinity ratio and its application to questions of nonorogenic granite genesis. *Geol. Mag.* 106, 370 e 384.
- Yang, X. M. (2017). Estimation of crystallization pressure of granite intrusions. *Lithos*, 286, 324-329.
- Zhang, Z., e Saxena, S. K. (1991). Thermodynamic properties of andradite and application to skarn with coexisting andradite and hedenbergite. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 107(2), 255-263.

X. ANEXOS

Tabela X-1. Tabela produzida através do modelamento no programa *rhyolite-MELTS* referente à amostra GN-117 do plúton Serra Negra do Norte.

T (C)	P (kbars)	log(10) f O ₂	liq mass (gm)	X _{liq}	wt% SiO ₂	wt% TiO ₂	wt% Al ₂ O ₃	wt% Fe ₂ O ₃	wt% FeO	wt% MnO	wt% MgO	wt% CaO	wt% Na ₂ O	wt% K ₂ O	wt% P ₂ O ₅	wt% H ₂ O	M	lnD=x	D model	Zr M	Zr wr	Zr melt	TZr melt
915,43	3,6	-11,94	99,78	1,00	69,35	0,30	14,46	0,31	1,18	0,10	0,67	1,31	3,80	4,55	0,09	3,88	1,40	6,71	823,61	604,17	246,00	246,53	824,76
910,43	3,6	-12,03	99,66	1,00	69,37	0,30	14,48	0,31	1,16	0,10	0,65	1,31	3,80	4,56	0,09	3,89	1,40	6,76	862,68	576,80	246,00	246,83	824,92
905,43	3,6	-12,11	99,54	1,00	69,39	0,30	14,49	0,30	1,13	0,10	0,62	1,31	3,81	4,56	0,09	3,89	1,40	6,81	903,94	550,48	246,00	247,13	825,07
900,43	3,6	-12,20	99,42	0,99	69,41	0,30	14,51	0,30	1,11	0,10	0,60	1,31	3,81	4,57	0,09	3,90	1,40	6,85	947,57	525,13	246,00	247,43	825,23
895,43	3,6	-12,29	99,31	0,99	69,43	0,30	14,52	0,30	1,09	0,10	0,58	1,31	3,81	4,58	0,09	3,90	1,40	6,90	993,69	500,76	246,00	247,72	825,39
890,43	3,6	-12,38	99,19	0,99	69,45	0,30	14,54	0,29	1,06	0,10	0,55	1,31	3,82	4,58	0,09	3,91	1,40	6,95	1042,49	477,32	246,00	248,01	825,54
885,43	3,6	-12,47	99,08	0,99	69,47	0,30	14,55	0,29	1,04	0,10	0,53	1,31	3,82	4,59	0,09	3,91	1,40	7,00	1094,13	454,79	246,00	248,29	825,70
880,43	3,6	-12,56	98,96	0,99	69,49	0,30	14,57	0,28	1,02	0,10	0,51	1,31	3,83	4,59	0,09	3,92	1,40	7,05	1148,80	433,15	246,00	248,58	825,85
875,43	3,6	-12,65	98,85	0,99	69,51	0,30	14,58	0,28	0,99	0,10	0,49	1,31	3,83	4,60	0,09	3,92	1,39	7,10	1206,75	412,35	246,00	248,86	826,01
870,43	3,6	-12,74	98,74	0,99	69,53	0,30	14,59	0,28	0,97	0,10	0,47	1,31	3,84	4,60	0,09	3,92	1,39	7,15	1268,16	392,38	246,00	249,13	826,16
865,43	3,6	-12,83	98,60	0,99	69,56	0,30	14,61	0,27	0,95	0,10	0,45	1,30	3,84	4,61	0,09	3,93	1,39	7,20	1333,42	373,18	246,00	249,49	826,36
860,43	3,6	-12,92	97,39	0,97	69,66	0,31	14,53	0,27	0,93	0,10	0,43	1,27	3,79	4,65	0,09	3,98	1,39	7,25	1407,93	353,43	246,00	252,58	827,93
855,43	3,6	-13,02	96,20	0,96	69,76	0,31	14,45	0,26	0,91	0,10	0,42	1,23	3,75	4,70	0,09	4,03	1,38	7,30	1487,19	334,59	246,00	255,72	829,50
850,43	3,6	-13,11	95,02	0,95	69,86	0,32	14,37	0,26	0,89	0,10	0,40	1,20	3,70	4,74	0,09	4,08	1,38	7,36	1571,65	316,61	246,00	258,89	831,07
845,43	3,6	-13,21	93,85	0,94	69,96	0,32	14,29	0,26	0,86	0,10	0,38	1,17	3,65	4,78	0,09	4,13	1,37	7,42	1661,61	299,47	246,00	262,11	832,65
840,43	3,6	-13,30	92,70	0,93	70,05	0,32	14,22	0,25	0,84	0,10	0,37	1,14	3,60	4,82	0,09	4,18	1,37	7,47	1757,60	283,11	246,00	265,37	834,24
835,43	3,6	-13,40	91,56	0,92	70,15	0,33	14,14	0,25	0,82	0,11	0,35	1,11	3,55	4,86	0,10	4,23	1,36	7,53	1859,94	267,54	246,00	268,67	835,83
830,43	3,6	-13,50	90,44	0,90	70,24	0,33	14,07	0,24	0,80	0,11	0,34	1,09	3,50	4,90	0,10	4,29	1,36	7,59	1969,23	252,69	246,00	272,02	837,43
825,43	3,6	-13,60	89,33	0,89	70,33	0,33	13,99	0,24	0,78	0,11	0,33	1,07	3,45	4,94	0,10	4,34	1,35	7,64	2085,87	238,56	246,00	275,40	839,03
820,43	3,6	-13,70	88,23	0,88	70,42	0,34	13,92	0,23	0,75	0,11	0,31	1,04	3,39	4,98	0,10	4,39	1,35	7,70	2210,61	225,10	246,00	278,82	840,64
815,43	3,6	-13,80	87,15	0,87	70,51	0,34	13,84	0,23	0,73	0,11	0,30	1,02	3,34	5,02	0,10	4,45	1,34	7,76	2343,96	212,29	246,00	282,28	842,25
810,43	3,6	-13,90	86,04	0,86	70,63	0,32	13,77	0,22	0,70	0,11	0,29	1,00	3,28	5,06	0,10	4,50	1,34	7,82	2487,55	200,04	246,00	285,93	843,95
805,43	3,6	-14,00	84,95	0,85	70,73	0,31	13,69	0,22	0,68	0,11	0,28	0,99	3,22	5,09	0,10	4,56	1,33	7,88	2641,01	188,41	246,00	289,57	845,63
800,43	3,6	-14,11	83,89	0,84	70,84	0,30	13,62	0,21	0,65	0,11	0,27	0,97	3,16	5,13	0,10	4,62	1,33	7,94	2805,43	177,37	246,00	293,25	847,31
795,43	3,6	-14,21	82,81	0,83	70,97	0,29	13,53	0,21	0,64	0,12	0,26	0,96	3,10	5,15	0,11	4,67	1,32	8,00	2983,09	166,81	246,00	297,06	849,08

T (C)	P (kbars)	log(10) f O ₂	liq mass (gm)	X _{liq}	wt% SiO ₂	wt% TiO ₂	wt% Al ₂ O ₃	wt% Fe ₂ O ₃	wt% FeO	wt% MnO	wt% MgO	wt% CaO	wt% Na ₂ O	wt% K ₂ O	wt% P ₂ O ₅	wt% H ₂ O	M	lnD=x	D _{model}	Zr _M	Zr _{wr}	Zr _{melt}	TZr _{melt}
790,43	3,6	-14,32	81,75	0,82	71,10	0,28	13,43	0,21	0,64	0,12	0,24	0,94	3,04	5,16	0,11	4,73	1,31	8,06	3173,90	156,78	246,00	300,91	850,85
785,43	3,6	-14,43	80,72	0,81	71,23	0,26	13,34	0,21	0,63	0,12	0,23	0,93	2,98	5,18	0,11	4,78	1,31	8,13	3378,58	147,28	246,00	304,78	852,61
780,43	3,6	-14,53	79,53	0,80	71,37	0,25	13,24	0,21	0,62	0,12	0,22	0,92	2,93	5,16	0,11	4,84	1,30	8,19	3600,64	138,20	246,00	309,34	854,65
775,43	3,6	-14,64	76,49	0,76	71,20	0,23	13,26	0,22	0,64	0,12	0,20	0,93	2,94	5,12	0,11	5,03	1,30	8,25	3828,81	129,96	246,00	321,62	858,80
770,43	3,6	-14,75	73,45	0,73	71,00	0,22	13,29	0,22	0,66	0,13	0,19	0,94	2,96	5,07	0,12	5,22	1,29	8,31	4073,12	122,17	246,00	334,90	863,13
765,43	3,6	-14,86	70,51	0,71	70,78	0,20	13,32	0,23	0,68	0,13	0,17	0,94	2,97	5,02	0,12	5,43	1,29	8,37	4335,75	114,77	246,00	348,89	867,54
760,43	3,6	-14,98	67,64	0,68	70,54	0,18	13,35	0,24	0,70	0,14	0,16	0,95	2,99	4,96	0,13	5,65	1,29	8,44	4618,34	107,74	246,00	363,67	872,05
755,43	3,6	-15,09	64,84	0,65	70,29	0,17	13,39	0,25	0,72	0,15	0,15	0,95	3,01	4,90	0,13	5,88	1,28	8,50	4922,71	101,08	246,00	379,38	876,69
750,43	3,6	-15,20	62,10	0,62	70,02	0,16	13,43	0,26	0,73	0,15	0,14	0,96	3,04	4,84	0,14	6,13	1,28	8,57	5250,68	94,77	246,00	396,15	881,47
745,43	3,6	-15,32	59,40	0,59	69,72	0,14	13,48	0,27	0,75	0,16	0,13	0,96	3,07	4,77	0,15	6,40	1,27	8,63	5604,28	88,79	246,00	414,16	886,43
740,43	3,6	-15,43	56,73	0,57	69,39	0,13	13,54	0,27	0,76	0,17	0,12	0,97	3,11	4,70	0,15	6,69	1,27	8,70	5986,07	83,13	246,00	433,65	891,60
735,43	3,6	-15,55	54,08	0,54	69,03	0,12	13,60	0,28	0,78	0,17	0,11	0,97	3,15	4,62	0,16	7,00	1,27	8,76	6398,66	77,77	246,00	454,90	897,04
730,43	3,6	-15,67	51,15	0,51	68,70	0,12	13,69	0,25	0,69	0,18	0,11	0,98	3,19	4,55	0,17	7,36	1,26	8,83	6844,44	72,70	246,00	480,95	903,37
725,43	3,6	-15,79	48,57	0,49	68,26	0,11	13,78	0,26	0,69	0,19	0,10	0,99	3,25	4,46	0,18	7,74	1,26	8,90	7328,39	67,90	246,00	506,44	909,36
720,43	3,6	-15,91	28,73	0,29	67,27	0,10	14,63	0,25	0,67	0,32	0,09	1,02	3,02	4,41	0,30	7,91	1,16	9,05	8492,24	58,59	246,00	856,36	979,12
715,43	3,6	-16,03	19,51	0,20	66,25	0,10	15,63	0,23	0,64	0,47	0,09	1,09	2,70	4,40	0,45	7,95	1,06	9,20	9856,92	50,48	246,00	1260,72	1039,00
710,43	3,6	-16,16	15,43	0,15	65,35	0,10	16,48	0,22	0,62	0,59	0,09	1,16	2,46	4,36	0,57	8,01	0,99	9,32	11177,47	44,52	246,00	1594,10	1079,45
705,43	3,6	-16,28	13,04	0,13	64,52	0,09	17,24	0,21	0,59	0,69	0,08	1,23	2,27	4,31	0,67	8,08	0,94	9,43	12514,08	39,76	246,00	1886,25	1110,53
700,43	3,6	-16,41	11,43	0,11	63,73	0,09	17,93	0,21	0,57	0,78	0,08	1,30	2,11	4,26	0,76	8,18	0,89	9,54	13898,81	35,80	246,00	2151,36	1136,04
695,43	3,6	-16,54	10,26	0,10	62,96	0,09	18,59	0,20	0,55	0,87	0,08	1,37	1,97	4,19	0,85	8,28	0,86	9,64	15353,86	32,41	246,00	2397,39	1157,84
690,43	3,6	-16,67	9,36	0,09	62,21	0,08	19,21	0,19	0,54	0,95	0,07	1,44	1,86	4,12	0,93	8,41	0,83	9,73	16896,55	29,45	246,00	2629,34	1176,98
685,43	3,6	-16,80	8,63	0,09	61,45	0,08	19,81	0,19	0,52	1,02	0,07	1,51	1,75	4,04	1,01	8,55	0,80	9,83	18542,58	26,84	246,00	2850,57	1194,12
680,43	3,6	-16,93	8,03	0,08	60,70	0,08	20,40	0,18	0,50	1,10	0,07	1,57	1,66	3,95	1,09	8,71	0,78	9,92	20307,46	24,50	246,00	3063,46	1209,70
675,43	3,6	-17,06	7,52	0,08	59,93	0,07	20,97	0,18	0,49	1,17	0,06	1,64	1,59	3,86	1,16	8,88	0,75	10,01	22205,56	22,41	246,00	3269,70	1224,02
670,43	3,6	-17,19	7,09	0,07	59,15	0,07	21,53	0,18	0,48	1,23	0,06	1,71	1,52	3,76	1,23	9,09	0,74	10,10	24253,62	20,52	246,00	3470,47	1237,30
665,43	3,6	-17,33	6,71	0,07	58,34	0,06	22,10	0,17	0,47	1,30	0,06	1,77	1,46	3,66	1,30	9,32	0,72	10,18	26468,89	18,80	246,00	3666,41	1249,69
660,43	3,6	-17,47	6,38	0,06	57,49	0,06	22,66	0,17	0,45	1,36	0,05	1,84	1,40	3,56	1,37	9,58	0,70	10,27	28871,27	17,24	246,00	3857,32	1261,29
655,43	3,6	-17,61	6,09	0,06	56,63	0,06	23,22	0,17	0,44	1,43	0,05	1,90	1,36	3,44	1,43	9,87	0,69	10,36	31489,88	15,80	246,00	4036,16	1271,90

Tabela X-2. Tabela produzida através do modelamento no programa *rhyolite*-MELTS referente à amostra GrN-105 do plúton Serra Negra do Norte. Continua na próxima página.

T (C)	P (kbars)	log(10) f O ₂	liq mass (gm)	X _{liq}	wt% SiO ₂	wt% TiO ₂	wt% Al ₂ O ₃	wt% Fe ₂ O ₃	wt% FeO	wt% MnO	wt% MgO	wt% CaO	wt% Na ₂ O	wt% K ₂ O	wt% P ₂ O ₅	wt% H ₂ O	M	lnD=x	D_model	Zr_M	Zr_wr	Zr_melt	TsatZr_melt
867,77	3,6	-12,79	99,94	1,00	71,31	0,09	14,53	0,17	0,60	0,08	0,20	0,66	4,48	3,97	0,03	3,88	1,29	7,26	1421,09	350,15	215,00	215,13	820,64
862,77	3,6	-12,88	98,72	0,99	71,39	0,09	14,45	0,17	0,61	0,08	0,21	0,63	4,42	4,00	0,03	3,92	1,29	7,31	1501,06	331,50	215,00	217,78	822,24
857,77	3,6	-12,97	97,52	0,98	71,46	0,09	14,36	0,18	0,61	0,08	0,21	0,61	4,36	4,03	0,03	3,97	1,28	7,37	1586,30	313,69	215,00	220,47	823,86
852,77	3,6	-13,07	96,32	0,96	71,54	0,09	14,28	0,18	0,62	0,08	0,21	0,59	4,30	4,06	0,03	4,02	1,27	7,42	1677,16	296,69	215,00	223,21	825,48
847,77	3,6	-13,16	95,14	0,95	71,61	0,09	14,19	0,18	0,63	0,08	0,21	0,57	4,24	4,09	0,03	4,07	1,27	7,48	1774,09	280,48	215,00	225,98	827,11
842,77	3,6	-13,26	93,97	0,94	71,68	0,09	14,11	0,19	0,63	0,08	0,22	0,56	4,17	4,12	0,03	4,12	1,26	7,54	1877,61	265,02	215,00	228,80	828,76
837,77	3,6	-13,36	92,82	0,93	71,75	0,09	14,02	0,19	0,64	0,08	0,22	0,54	4,11	4,15	0,03	4,17	1,26	7,59	1988,14	250,28	215,00	231,64	830,41
832,77	3,6	-13,45	91,67	0,92	71,83	0,10	13,94	0,19	0,65	0,08	0,22	0,52	4,04	4,17	0,03	4,23	1,25	7,65	2106,28	236,25	215,00	234,52	832,08
827,77	3,6	-13,55	90,55	0,91	71,90	0,10	13,85	0,20	0,65	0,09	0,22	0,51	3,98	4,20	0,03	4,28	1,24	7,71	2232,60	222,88	215,00	237,44	833,75
822,77	3,6	-13,65	89,44	0,89	71,96	0,10	13,77	0,20	0,66	0,09	0,23	0,50	3,91	4,22	0,03	4,33	1,24	7,77	2367,71	210,16	215,00	240,38	835,42
817,77	3,6	-13,75	88,35	0,88	72,03	0,10	13,69	0,20	0,67	0,09	0,23	0,49	3,85	4,24	0,03	4,38	1,23	7,83	2512,30	198,07	215,00	243,36	837,10
812,77	3,6	-13,85	87,27	0,87	72,10	0,10	13,60	0,21	0,67	0,09	0,23	0,48	3,78	4,26	0,03	4,44	1,22	7,89	2667,21	186,56	215,00	246,36	838,79
807,77	3,6	-13,96	86,21	0,86	72,17	0,10	13,52	0,21	0,68	0,09	0,24	0,47	3,71	4,28	0,03	4,49	1,22	7,95	2833,20	175,63	215,00	249,39	840,49
802,77	3,6	-14,06	84,27	0,84	72,01	0,10	13,54	0,22	0,70	0,09	0,24	0,46	3,67	4,34	0,03	4,60	1,21	8,01	3002,87	165,71	215,00	255,14	842,95
797,77	3,6	-14,16	82,34	0,82	71,85	0,11	13,56	0,22	0,71	0,09	0,25	0,45	3,63	4,39	0,04	4,70	1,21	8,07	3184,60	156,25	215,00	261,12	845,45
792,77	3,6	-14,27	80,43	0,80	71,67	0,11	13,59	0,23	0,73	0,10	0,25	0,45	3,59	4,44	0,04	4,82	1,21	8,13	3379,39	147,25	215,00	267,32	848,02
787,77	3,6	-14,38	78,52	0,79	71,49	0,11	13,61	0,24	0,74	0,10	0,26	0,44	3,55	4,48	0,04	4,93	1,20	8,19	3588,28	138,67	215,00	273,80	850,64
782,77	3,6	-14,48	76,43	0,76	71,31	0,11	13,65	0,25	0,76	0,10	0,24	0,44	3,52	4,52	0,04	5,06	1,20	8,25	3814,64	130,44	215,00	281,32	853,66
777,77	3,6	-14,59	74,35	0,74	71,12	0,12	13,69	0,26	0,78	0,10	0,22	0,43	3,48	4,56	0,04	5,20	1,20	8,31	4057,88	122,63	215,00	289,18	856,74
772,77	3,6	-14,70	72,28	0,72	70,91	0,12	13,74	0,26	0,79	0,11	0,20	0,43	3,45	4,59	0,04	5,35	1,19	8,37	4319,65	115,19	215,00	297,44	859,92
767,77	3,6	-14,81	70,20	0,70	70,70	0,12	13,79	0,27	0,81	0,11	0,19	0,43	3,43	4,62	0,04	5,50	1,19	8,43	4601,80	108,13	215,00	306,25	863,23
762,77	3,6	-14,92	67,67	0,68	70,44	0,13	13,84	0,28	0,84	0,11	0,17	0,43	3,44	4,57	0,04	5,70	1,18	8,50	4911,69	101,31	215,00	317,71	867,46
757,77	3,6	-15,04	65,19	0,65	70,16	0,13	13,91	0,29	0,86	0,12	0,16	0,43	3,46	4,51	0,04	5,92	1,17	8,57	5246,25	94,85	215,00	329,82	871,80

T (C)	P (kbars)	log(10) f O ₂	liq mass (gm)	X _{liq}	wt% SiO ₂	wt% TiO ₂	wt% Al ₂ O ₃	wt% Fe ₂ O ₃	wt% FeO	wt% MnO	wt% MgO	wt% CaO	wt% Na ₂ O	wt% K ₂ O	wt% P ₂ O ₅	wt% H ₂ O	M	lnD=x	D _{model}	Zr _M	Zr _{wr}	Zr _{melt}	TsatZr _{melt}
752,77	3,6	-15,15	62,53	0,63	69,94	0,13	14,00	0,27	0,80	0,12	0,15	0,43	3,48	4,47	0,05	6,17	1,17	8,63	5613,21	88,65	215,00	343,84	876,73
747,77	3,6	-15,26	60,02	0,60	69,66	0,12	14,09	0,27	0,78	0,13	0,14	0,43	3,50	4,41	0,05	6,42	1,16	8,70	6007,82	82,83	215,00	358,20	881,59
742,77	3,6	-15,38	57,55	0,58	69,35	0,12	14,18	0,27	0,76	0,13	0,13	0,42	3,53	4,36	0,05	6,69	1,15	8,77	6435,62	77,32	215,00	373,57	886,64
737,77	3,6	-15,50	55,12	0,55	69,02	0,12	14,29	0,26	0,74	0,14	0,12	0,42	3,56	4,29	0,05	6,99	1,14	8,84	6899,54	72,12	215,00	390,09	891,89
732,77	3,6	-15,61	52,70	0,53	68,64	0,12	14,40	0,26	0,72	0,15	0,11	0,42	3,60	4,22	0,06	7,30	1,13	8,91	7403,60	67,21	215,00	407,97	897,37
727,77	3,6	-15,73	50,26	0,50	68,21	0,10	14,53	0,26	0,72	0,15	0,11	0,42	3,65	4,13	0,06	7,66	1,13	8,98	7952,44	62,57	215,00	427,77	903,23
722,77	3,6	-15,85	47,84	0,48	67,74	0,10	14,68	0,26	0,71	0,16	0,10	0,42	3,69	4,05	0,06	8,04	1,12	9,05	8549,84	58,20	215,00	449,38	909,37
717,77	3,6	-15,98	35,67	0,36	67,03	0,09	15,44	0,25	0,69	0,22	0,09	0,40	3,49	4,02	0,08	8,21	1,03	9,19	9815,01	50,70	215,00	602,77	950,46
712,77	3,6	-16,10	26,12	0,26	66,27	0,09	16,53	0,24	0,65	0,30	0,09	0,38	3,13	4,04	0,11	8,17	0,92	9,35	11522,03	43,19	215,00	823,10	999,46
707,77	3,6	-16,22	21,43	0,21	65,59	0,09	17,44	0,22	0,63	0,36	0,09	0,38	2,86	4,04	0,14	8,18	0,84	9,49	13176,25	37,76	215,00	1003,50	1033,70
702,77	3,6	-16,35	18,52	0,19	64,96	0,09	18,25	0,21	0,60	0,42	0,08	0,38	2,64	4,02	0,16	8,20	0,78	9,61	14854,72	33,50	215,00	1160,68	1060,46
697,77	3,6	-16,48	16,51	0,17	64,36	0,09	18,99	0,20	0,58	0,47	0,08	0,39	2,45	3,99	0,18	8,24	0,73	9,72	16599,34	29,98	215,00	1302,52	1082,64
692,77	3,6	-16,60	15,00	0,15	63,77	0,08	19,69	0,19	0,55	0,51	0,08	0,39	2,29	3,95	0,19	8,30	0,69	9,82	18438,43	26,99	215,00	1433,42	1101,72
687,77	3,6	-16,73	13,82	0,14	63,20	0,08	20,34	0,19	0,53	0,56	0,07	0,40	2,15	3,91	0,21	8,36	0,65	9,92	20394,97	24,40	215,00	1556,14	1118,56
682,77	3,6	-16,87	12,85	0,13	62,63	0,08	20,97	0,18	0,51	0,60	0,07	0,40	2,03	3,86	0,23	8,44	0,62	10,02	22490,15	22,13	215,00	1672,54	1133,69
677,77	3,6	-17,00	12,05	0,12	62,06	0,07	21,58	0,17	0,50	0,64	0,07	0,41	1,92	3,80	0,24	8,54	0,59	10,12	24744,35	20,11	215,00	1783,93	1147,49
672,77	3,6	-17,13	11,37	0,11	61,49	0,07	22,17	0,17	0,48	0,67	0,06	0,42	1,83	3,74	0,26	8,64	0,56	10,21	27178,15	18,31	215,00	1891,32	1160,20
667,77	3,6	-17,27	10,77	0,11	60,92	0,07	22,74	0,16	0,46	0,71	0,06	0,43	1,74	3,68	0,27	8,76	0,54	10,30	29812,99	16,69	215,00	1995,47	1172,03
662,77	3,6	-17,40	10,25	0,10	60,33	0,06	23,31	0,16	0,45	0,74	0,06	0,44	1,66	3,61	0,28	8,89	0,52	10,39	32672,00	15,23	215,00	2096,99	1183,12

Tabela X-3. Tabela produzida através do modelamento no programa *rhyolite*-MELTS referente à amostra MA-23A do plúton Caxexa. Continua na próxima página.

T (C)	P (kbars)	log(10) f O ₂	liq mass (gm)	xliq	wt% SiO ₂	wt% TiO ₂	wt% Al ₂ O ₃	wt% Fe ₂ O ₃	wt% FeO	wt% MnO	wt% MgO	wt% CaO	wt% Na ₂ O	wt% K ₂ O	wt% P ₂ O ₅	wt% H ₂ O	M	lnD=x	D model	Zr M	Zr wr	Zr melt	TsatZr melt
940,43	3,7	-11,52	99,94	1,00	71,55	0,07	14,40	0,20	0,72	0,03	0,10	0,56	5,10	4,79	0,02	2,47	1,50	6,40	602,49	825,91	152,00	152,09	773,78
935,43	3,7	-11,60	98,23	0,98	71,64	0,07	14,29	0,20	0,73	0,03	0,10	0,55	5,04	4,82	0,02	2,51	1,50	6,45	631,24	788,29	152,00	154,74	775,47
930,43	3,7	-11,68	96,54	0,97	71,74	0,07	14,18	0,20	0,74	0,03	0,10	0,53	4,97	4,85	0,02	2,55	1,50	6,49	661,61	752,10	152,00	157,44	777,18
925,43	3,7	-11,76	94,88	0,95	71,83	0,07	14,08	0,21	0,75	0,03	0,10	0,52	4,90	4,88	0,02	2,60	1,49	6,54	693,71	717,30	152,00	160,20	778,90
920,43	3,7	-11,85	93,24	0,93	71,92	0,07	13,97	0,21	0,77	0,03	0,11	0,51	4,84	4,90	0,02	2,64	1,49	6,59	727,63	683,86	152,00	163,02	780,63
915,43	3,7	-11,93	91,62	0,92	72,02	0,08	13,86	0,22	0,78	0,03	0,11	0,50	4,77	4,92	0,02	2,69	1,49	6,64	763,51	651,72	152,00	165,90	782,36
910,43	3,7	-12,02	90,04	0,90	72,11	0,08	13,76	0,22	0,79	0,03	0,11	0,49	4,71	4,94	0,02	2,74	1,49	6,69	801,48	620,86	152,00	168,82	784,11
905,43	3,7	-12,10	88,48	0,88	72,21	0,08	13,65	0,23	0,81	0,03	0,11	0,49	4,65	4,95	0,02	2,78	1,48	6,74	841,66	591,21	152,00	171,79	785,85
900,43	3,7	-12,19	86,95	0,87	72,31	0,08	13,54	0,23	0,82	0,03	0,11	0,48	4,58	4,95	0,02	2,83	1,48	6,78	884,20	562,77	152,00	174,81	787,60
895,43	3,7	-12,28	85,46	0,85	72,41	0,08	13,43	0,24	0,83	0,03	0,12	0,48	4,52	4,96	0,02	2,88	1,48	6,83	929,29	535,46	152,00	177,86	789,35
890,43	3,7	-12,37	84,00	0,84	72,51	0,08	13,32	0,24	0,85	0,04	0,12	0,47	4,46	4,96	0,02	2,93	1,47	6,88	977,06	509,28	152,00	180,96	791,10
885,43	3,7	-12,46	82,57	0,83	72,61	0,08	13,21	0,25	0,86	0,04	0,12	0,47	4,41	4,95	0,02	2,98	1,47	6,94	1027,72	484,18	152,00	184,09	792,85
880,43	3,7	-12,55	81,17	0,81	72,71	0,09	13,10	0,25	0,87	0,04	0,12	0,47	4,35	4,95	0,02	3,04	1,47	6,99	1081,42	460,14	152,00	187,25	794,59
875,43	3,7	-12,64	79,81	0,80	72,81	0,09	12,99	0,26	0,89	0,04	0,12	0,46	4,29	4,94	0,02	3,09	1,46	7,04	1138,43	437,09	152,00	190,45	796,32
870,43	3,7	-12,73	78,49	0,78	72,91	0,09	12,88	0,26	0,90	0,04	0,13	0,46	4,24	4,92	0,03	3,14	1,46	7,09	1198,96	415,03	152,00	193,66	798,05
865,43	3,7	-12,82	77,19	0,77	73,02	0,09	12,77	0,27	0,91	0,04	0,13	0,46	4,19	4,91	0,03	3,19	1,46	7,14	1263,21	393,92	152,00	196,90	799,76
860,43	3,7	-12,91	75,94	0,76	73,12	0,09	12,66	0,28	0,93	0,04	0,13	0,46	4,13	4,89	0,03	3,24	1,45	7,19	1331,52	373,71	152,00	200,17	801,47
855,43	3,7	-13,01	74,71	0,75	73,23	0,09	12,55	0,28	0,94	0,04	0,13	0,46	4,08	4,87	0,03	3,30	1,45	7,25	1404,10	354,39	152,00	203,44	803,17
850,43	3,7	-13,10	73,52	0,74	73,33	0,09	12,44	0,29	0,96	0,04	0,13	0,46	4,03	4,85	0,03	3,35	1,45	7,30	1481,32	335,92	152,00	206,74	804,85
845,43	3,7	-13,20	72,37	0,72	73,44	0,10	12,32	0,29	0,97	0,04	0,14	0,46	3,98	4,83	0,03	3,40	1,44	7,35	1563,45	318,27	152,00	210,04	806,52
840,43	3,7	-13,29	70,56	0,71	73,41	0,10	12,27	0,30	0,99	0,04	0,14	0,46	3,96	4,81	0,03	3,49	1,44	7,41	1646,68	302,18	152,00	215,41	808,82
835,43	3,7	-13,39	68,39	0,68	73,28	0,10	12,24	0,31	1,02	0,04	0,14	0,47	3,95	4,80	0,03	3,60	1,45	7,46	1732,35	287,24	152,00	222,25	811,52
830,43	3,7	-13,49	66,27	0,66	73,15	0,10	12,22	0,33	1,05	0,04	0,15	0,47	3,95	4,78	0,03	3,72	1,45	7,51	1823,13	272,94	152,00	229,36	814,25
825,43	3,7	-13,59	64,20	0,64	73,01	0,11	12,20	0,34	1,09	0,05	0,15	0,48	3,95	4,76	0,03	3,84	1,45	7,56	1919,43	259,24	152,00	236,75	817,01
820,43	3,7	-13,69	62,18	0,62	72,87	0,11	12,18	0,35	1,12	0,05	0,16	0,48	3,96	4,73	0,03	3,96	1,45	7,61	2021,51	246,15	152,00	244,44	819,78

T (C)	P (kbars)	log(10) f O ₂	liq mass (gm)	xliq	wt% SiO ₂	wt% TiO ₂	wt% Al ₂ O ₃	wt% Fe ₂ O ₃	wt% FeO	wt% MnO	wt% MgO	wt% CaO	wt% Na ₂ O	wt% K ₂ O	wt% P ₂ O ₅	wt% H ₂ O	M	lnD=x	D_model	Zr_M	Zr_wr	Zr_melt	TsatZr_melt
815,43	3,7	-13,79	60,21	0,60	72,72	0,11	12,16	0,37	1,15	0,05	0,16	0,49	3,97	4,70	0,03	4,09	1,45	7,66	2129,83	233,63	152,00	252,43	822,59
810,43	3,7	-13,89	58,29	0,58	72,56	0,12	12,14	0,38	1,19	0,05	0,17	0,49	3,98	4,66	0,03	4,23	1,46	7,72	2244,81	221,67	152,00	260,75	825,42
805,43	3,7	-13,99	56,12	0,56	72,48	0,12	12,14	0,37	1,13	0,05	0,14	0,49	4,00	4,64	0,04	4,39	1,46	7,77	2369,17	210,03	152,00	270,84	828,86
800,43	3,7	-14,10	54,16	0,54	72,34	0,13	12,13	0,37	1,13	0,05	0,13	0,49	4,03	4,60	0,04	4,55	1,46	7,82	2499,82	199,05	152,00	280,63	832,02
795,43	3,7	-14,20	52,26	0,52	72,19	0,13	12,12	0,37	1,13	0,06	0,13	0,49	4,06	4,56	0,04	4,71	1,46	7,88	2638,62	188,58	152,00	290,87	835,21
790,43	3,7	-14,31	50,40	0,50	72,03	0,14	12,11	0,38	1,12	0,06	0,12	0,49	4,10	4,52	0,04	4,89	1,47	7,93	2786,15	178,60	152,00	301,60	838,45
785,43	3,7	-14,42	48,58	0,49	71,87	0,14	12,11	0,38	1,12	0,06	0,11	0,49	4,13	4,47	0,04	5,07	1,47	7,99	2942,97	169,08	152,00	312,88	841,74
780,43	3,7	-14,52	46,60	0,47	71,78	0,12	12,12	0,35	1,01	0,06	0,13	0,49	4,18	4,43	0,04	5,29	1,47	8,04	3111,73	159,91	152,00	326,17	845,56
775,43	3,7	-14,63	44,82	0,45	71,61	0,11	12,11	0,34	0,98	0,07	0,13	0,49	4,23	4,38	0,04	5,50	1,48	8,10	3289,43	151,27	152,00	339,13	849,07
770,43	3,7	-14,74	43,08	0,43	71,42	0,11	12,11	0,33	0,96	0,07	0,13	0,49	4,28	4,33	0,05	5,72	1,48	8,15	3478,41	143,05	152,00	352,87	852,66
765,43	3,7	-14,85	41,36	0,41	71,21	0,11	12,12	0,33	0,93	0,07	0,13	0,49	4,33	4,27	0,05	5,96	1,48	8,21	3679,08	135,25	152,00	367,49	856,32
760,43	3,7	-14,96	39,67	0,40	70,99	0,11	12,12	0,33	0,91	0,07	0,13	0,49	4,39	4,21	0,05	6,21	1,49	8,27	3892,12	127,85	152,00	383,12	860,08
755,43	3,7	-15,08	38,01	0,38	70,73	0,10	12,13	0,32	0,89	0,08	0,13	0,48	4,46	4,14	0,05	6,48	1,49	8,32	4118,23	120,83	152,00	399,91	863,95
750,43	3,7	-15,19	36,36	0,36	70,45	0,10	12,14	0,32	0,87	0,08	0,13	0,48	4,53	4,07	0,05	6,78	1,50	8,38	4357,90	114,18	152,00	418,04	867,93
745,43	3,7	-15,31	34,72	0,35	70,13	0,10	12,15	0,32	0,85	0,09	0,13	0,48	4,61	3,99	0,06	7,10	1,50	8,44	4611,61	107,90	152,00	437,77	872,07
740,43	3,7	-15,42	33,09	0,33	69,78	0,09	12,17	0,32	0,84	0,09	0,13	0,48	4,70	3,90	0,06	7,45	1,51	8,49	4879,76	101,97	152,00	459,38	876,38
735,43	3,7	-15,54	31,45	0,31	69,37	0,09	12,19	0,31	0,82	0,09	0,13	0,48	4,80	3,81	0,06	7,83	1,52	8,55	5162,15	96,39	152,00	483,29	880,89
730,43	3,7	-15,66	29,80	0,30	68,91	0,08	12,22	0,31	0,81	0,10	0,13	0,47	4,91	3,70	0,07	8,27	1,53	8,60	5458,46	91,16	152,00	510,05	885,66
725,43	3,7	-15,78	28,13	0,28	68,37	0,08	12,26	0,32	0,80	0,11	0,13	0,47	5,04	3,59	0,07	8,76	1,54	8,66	5767,34	86,28	152,00	540,42	890,73
720,43	3,7	-15,90	19,71	0,20	67,67	0,07	12,17	0,32	0,80	0,15	0,13	0,50	5,28	3,41	0,10	9,38	1,59	8,68	5900,64	84,33	152,00	771,19	924,60

Tabela X-4. Tabela produzida através do modelamento no programa *rhyolite*-MELTS referente à amostra MA-181B do plúton Caxexa. Continua na próxima página.

T (C)	P (kbars)	log(10) f O ₂	liq mass (gm)	xliq	wt% SiO ₂	wt% TiO ₂	wt% Al ₂ O ₃	wt% Fe ₂ O ₃	wt% FeO	wt% MnO	wt% MgO	wt% CaO	wt% Na ₂ O	wt% K ₂ O	wt% P ₂ O ₅	wt% H ₂ O	M	lnD=x	D model	Zr M	Zr wr	Zr melt	TsatZr melt
893,16	3,7	-12,32	99,93	1,00	72,92	0,10	13,17	0,26	0,93	0,01	0,15	1,20	3,13	5,66	0,04	2,44	1,46	6,87	961,78	517,37	111,00	111,08	750,74
888,16	3,7	-12,41	98,82	0,99	73,02	0,10	13,08	0,26	0,93	0,01	0,15	1,18	3,07	5,70	0,04	2,47	1,46	6,92	1010,98	492,20	111,00	112,32	751,83
883,16	3,7	-12,50	97,71	0,98	73,12	0,10	12,98	0,27	0,94	0,01	0,15	1,16	3,01	5,73	0,04	2,49	1,46	6,97	1063,12	468,06	111,00	113,60	752,93
878,16	3,7	-12,59	96,58	0,97	73,21	0,10	12,88	0,27	0,95	0,01	0,15	1,14	2,96	5,75	0,04	2,52	1,45	7,02	1118,42	444,91	111,00	114,94	754,07
873,16	3,7	-12,68	95,10	0,95	73,33	0,10	12,77	0,28	0,97	0,01	0,15	1,14	2,91	5,72	0,04	2,56	1,45	7,07	1177,61	422,55	111,00	116,72	755,56
868,16	3,7	-12,77	93,29	0,93	73,42	0,10	12,67	0,28	0,98	0,01	0,16	1,15	2,87	5,69	0,04	2,61	1,45	7,12	1239,71	401,38	111,00	118,99	757,31
863,16	3,7	-12,86	90,23	0,90	73,32	0,11	12,65	0,30	1,02	0,01	0,16	1,17	2,85	5,67	0,04	2,70	1,45	7,17	1301,23	382,41	111,00	123,02	759,95
858,16	3,7	-12,96	87,28	0,87	73,21	0,11	12,62	0,31	1,05	0,01	0,17	1,18	2,84	5,66	0,04	2,79	1,45	7,22	1366,35	364,18	111,00	127,17	762,59
853,16	3,7	-13,05	84,43	0,84	73,11	0,12	12,60	0,32	1,08	0,01	0,17	1,20	2,82	5,64	0,05	2,89	1,45	7,27	1435,21	346,71	111,00	131,46	765,24
848,16	3,7	-13,15	81,68	0,82	73,00	0,12	12,57	0,33	1,12	0,01	0,18	1,22	2,81	5,62	0,05	2,98	1,45	7,32	1508,13	329,95	111,00	135,89	767,89
843,16	3,7	-13,24	79,02	0,79	72,88	0,12	12,54	0,35	1,15	0,01	0,19	1,23	2,80	5,59	0,05	3,08	1,46	7,37	1585,39	313,87	111,00	140,46	770,54
838,16	3,7	-13,34	76,09	0,76	72,83	0,13	12,54	0,34	1,11	0,01	0,16	1,24	2,80	5,59	0,05	3,20	1,46	7,42	1669,57	298,04	111,00	145,88	773,73
833,16	3,7	-13,44	73,44	0,73	72,75	0,13	12,53	0,34	1,11	0,01	0,15	1,25	2,79	5,57	0,05	3,32	1,46	7,47	1757,76	283,09	111,00	151,14	776,66
828,16	3,7	-13,53	70,89	0,71	72,66	0,14	12,51	0,34	1,10	0,01	0,14	1,26	2,79	5,55	0,06	3,44	1,46	7,52	1851,32	268,78	111,00	156,59	779,60
823,16	3,7	-13,63	68,42	0,68	72,57	0,14	12,49	0,34	1,09	0,01	0,14	1,27	2,79	5,53	0,06	3,56	1,46	7,58	1950,74	255,08	111,00	162,24	782,56
818,16	3,7	-13,73	66,03	0,66	72,47	0,15	12,48	0,34	1,08	0,01	0,13	1,28	2,79	5,51	0,06	3,69	1,46	7,63	2056,38	241,98	111,00	168,11	785,54
813,16	3,7	-13,84	63,72	0,64	72,38	0,15	12,46	0,34	1,07	0,02	0,12	1,29	2,80	5,48	0,06	3,82	1,46	7,68	2168,66	229,45	111,00	174,21	788,54
808,16	3,7	-13,94	61,48	0,61	72,27	0,16	12,45	0,34	1,07	0,02	0,12	1,30	2,81	5,45	0,06	3,96	1,46	7,74	2287,96	217,49	111,00	180,56	791,55
803,16	3,7	-14,04	59,30	0,59	72,16	0,16	12,43	0,34	1,05	0,02	0,11	1,30	2,82	5,42	0,07	4,11	1,47	7,79	2414,89	206,06	111,00	187,17	794,60
798,16	3,7	-14,15	57,20	0,57	72,05	0,17	12,41	0,34	1,04	0,02	0,11	1,31	2,83	5,39	0,07	4,26	1,47	7,84	2549,94	195,14	111,00	194,07	797,67
793,16	3,7	-14,25	55,15	0,55	71,92	0,18	12,40	0,34	1,03	0,02	0,10	1,32	2,85	5,36	0,07	4,42	1,47	7,90	2693,56	184,74	111,00	201,28	800,77
788,16	3,7	-14,36	53,15	0,53	71,79	0,18	12,38	0,34	1,02	0,02	0,10	1,32	2,87	5,32	0,07	4,58	1,47	7,95	2846,48	174,81	111,00	208,82	803,91
783,16	3,7	-14,46	50,96	0,51	71,75	0,15	12,38	0,31	0,91	0,02	0,12	1,33	2,89	5,29	0,08	4,78	1,47	8,01	3007,59	165,45	111,00	217,81	807,49

T (C)	P (kbars)	log(10) f O ₂	liq mass (gm)	xliq	wt% SiO ₂	wt% TiO ₂	wt% Al ₂ O ₃	wt% Fe ₂ O ₃	wt% FeO	wt% MnO	wt% MgO	wt% CaO	wt% Na ₂ O	wt% K ₂ O	wt% P ₂ O ₅	wt% H ₂ O	M	lnD=x	D_model	Zr_M	Zr_wr	Zr_melt	TsatZr_melt
778,16	3,7	-14,57	49,03	0,49	71,62	0,15	12,36	0,30	0,88	0,02	0,12	1,34	2,92	5,24	0,08	4,97	1,48	8,06	3180,13	156,47	111,00	226,40	810,80
773,16	3,7	-14,68	47,14	0,47	71,47	0,14	12,35	0,30	0,86	0,02	0,12	1,34	2,95	5,19	0,08	5,17	1,48	8,12	3363,76	147,93	111,00	235,48	814,16
768,16	3,7	-14,79	45,29	0,45	71,31	0,14	12,34	0,29	0,83	0,02	0,12	1,35	2,99	5,14	0,09	5,38	1,48	8,18	3559,14	139,81	111,00	245,09	817,58
763,16	3,7	-14,90	43,48	0,43	71,13	0,14	12,33	0,29	0,81	0,02	0,12	1,35	3,02	5,09	0,09	5,60	1,49	8,23	3766,86	132,10	111,00	255,30	821,08
758,16	3,7	-15,02	41,70	0,42	70,94	0,14	12,32	0,28	0,79	0,02	0,12	1,36	3,07	5,03	0,09	5,84	1,49	8,29	3987,93	124,78	111,00	266,21	824,67
753,16	3,7	-15,13	39,94	0,40	70,72	0,13	12,31	0,28	0,77	0,02	0,12	1,37	3,12	4,96	0,10	6,10	1,50	8,35	4222,65	117,84	111,00	277,91	828,35
748,16	3,7	-15,24	38,20	0,38	70,48	0,13	12,30	0,28	0,76	0,03	0,12	1,37	3,17	4,89	0,10	6,38	1,50	8,41	4471,93	111,27	111,00	290,54	832,15
743,16	3,7	-15,36	36,48	0,36	70,22	0,13	12,29	0,27	0,74	0,03	0,12	1,38	3,23	4,81	0,11	6,68	1,51	8,46	4736,44	105,06	111,00	304,24	836,08
738,16	3,7	-15,48	34,77	0,35	69,91	0,12	12,29	0,27	0,72	0,03	0,12	1,38	3,30	4,73	0,11	7,01	1,51	8,52	5016,39	99,19	111,00	319,24	840,18
733,16	3,7	-15,59	33,05	0,33	69,57	0,12	12,29	0,27	0,71	0,03	0,12	1,39	3,38	4,63	0,12	7,37	1,52	8,58	5311,92	93,68	111,00	335,81	844,47
728,16	3,7	-15,71	31,33	0,31	69,18	0,11	12,29	0,27	0,70	0,03	0,12	1,39	3,47	4,53	0,12	7,78	1,53	8,63	5623,09	88,49	111,00	354,32	849,00
723,16	3,7	-15,83	9,04	0,09	68,26	0,10	11,78	0,29	0,72	0,11	0,12	1,74	3,86	4,23	0,43	8,37	1,72	8,53	5076,77	98,02	111,00	1228,47	964,93

Tabela X-5. Tabela produzida através do modelamento no programa *rhyolite*-MELTS referente à amostra MH-12A do plúton Japi. Continua na próxima página.

T (C)	P (kbars)	log(10) f O ₂	liq mass (gm)	X _{liq}	wt% SiO ₂	wt% TiO ₂	wt% Al ₂ O ₃	wt% Fe ₂ O ₃	wt% FeO	wt% MnO	wt% MgO	wt% CaO	wt% Na ₂ O	wt% K ₂ O	wt% P ₂ O ₅	wt% H ₂ O	M	lnD=x	D_model	Zr_M	Zr_wr	Zr_melt	TsatZr_melt
878,71	5,3	-12,25	99,97	1,00	70,82	0,08	14,25	0,21	0,69	0,03	0,11	0,60	4,60	4,74	0,02	3,87	1,42	7,04	1141,32	435,99	98,10	98,13	743,35
873,71	5,3	-12,35	98,58	0,99	70,89	0,08	14,16	0,22	0,70	0,03	0,11	0,58	4,54	4,77	0,02	3,92	1,42	7,09	1202,64	413,76	98,10	99,52	744,76
868,71	5,3	-12,46	97,18	0,97	70,96	0,08	14,07	0,22	0,71	0,03	0,11	0,57	4,48	4,79	0,02	3,98	1,41	7,15	1267,86	392,47	98,10	100,94	746,19
863,71	5,3	-12,56	95,79	0,96	71,03	0,08	13,97	0,22	0,72	0,03	0,11	0,55	4,41	4,82	0,02	4,04	1,41	7,20	1337,25	372,11	98,10	102,41	747,64
858,71	5,3	-12,67	94,41	0,94	71,10	0,08	13,88	0,23	0,73	0,03	0,11	0,54	4,35	4,84	0,02	4,09	1,41	7,25	1411,11	352,63	98,10	103,91	749,11
853,71	5,3	-12,78	93,03	0,93	71,17	0,08	13,79	0,23	0,74	0,03	0,11	0,53	4,29	4,85	0,02	4,16	1,40	7,31	1489,79	334,01	98,10	105,45	750,60
848,71	5,3	-12,89	91,66	0,92	71,24	0,08	13,69	0,23	0,75	0,03	0,12	0,52	4,23	4,86	0,02	4,22	1,40	7,36	1573,67	316,20	98,10	107,03	752,12
843,71	5,3	-13,00	90,29	0,90	71,31	0,09	13,59	0,24	0,76	0,03	0,12	0,52	4,17	4,87	0,02	4,28	1,39	7,42	1663,16	299,19	98,10	108,65	753,66
838,71	5,3	-13,11	88,93	0,89	71,39	0,09	13,50	0,24	0,77	0,03	0,12	0,51	4,11	4,87	0,02	4,35	1,39	7,47	1758,66	282,94	98,10	110,32	755,23
833,71	5,3	-13,22	87,57	0,88	71,46	0,09	13,40	0,24	0,78	0,03	0,12	0,51	4,06	4,87	0,02	4,41	1,38	7,53	1860,69	267,43	98,10	112,03	756,81
828,71	5,3	-13,33	86,22	0,86	71,54	0,09	13,30	0,25	0,80	0,03	0,12	0,50	4,00	4,86	0,02	4,48	1,38	7,59	1969,68	252,63	98,10	113,78	758,43
823,71	5,3	-13,45	84,88	0,85	71,62	0,09	13,20	0,25	0,81	0,03	0,13	0,50	3,95	4,84	0,02	4,55	1,37	7,64	2086,22	238,52	98,10	115,57	760,06
818,71	5,3	-13,56	82,92	0,83	71,56	0,09	13,16	0,26	0,83	0,04	0,13	0,50	3,92	4,83	0,02	4,66	1,37	7,70	2206,33	225,53	98,10	118,30	762,17
813,71	5,3	-13,68	80,31	0,80	71,38	0,10	13,16	0,26	0,85	0,04	0,13	0,50	3,93	4,80	0,02	4,81	1,37	7,75	2331,05	213,47	98,10	122,15	764,89
808,71	5,3	-13,80	77,72	0,78	71,20	0,10	13,17	0,27	0,88	0,04	0,14	0,51	3,94	4,76	0,02	4,97	1,37	7,81	2463,95	201,95	98,10	126,22	767,68
803,71	5,3	-13,93	75,19	0,75	71,00	0,10	13,17	0,28	0,91	0,04	0,14	0,51	3,96	4,71	0,03	5,14	1,37	7,87	2605,73	190,96	98,10	130,48	770,52
798,71	5,3	-14,05	72,70	0,73	70,79	0,11	13,18	0,29	0,94	0,04	0,15	0,51	3,98	4,67	0,03	5,32	1,37	7,92	2756,97	180,49	98,10	134,94	773,42
793,71	5,3	-14,17	70,26	0,70	70,57	0,11	13,19	0,30	0,98	0,04	0,15	0,51	4,00	4,62	0,03	5,50	1,37	7,98	2918,38	170,51	98,10	139,63	776,37
788,71	5,3	-14,26	67,81	0,68	70,34	0,11	13,20	0,31	1,00	0,04	0,15	0,52	4,03	4,57	0,03	5,70	1,37	8,04	3091,23	160,97	98,10	144,67	779,46
783,71	5,3	-14,32	65,35	0,65	70,11	0,12	13,22	0,32	1,00	0,04	0,14	0,52	4,06	4,51	0,03	5,92	1,37	8,09	3276,55	151,87	98,10	150,12	782,71
778,71	5,3	-14,38	62,93	0,63	69,87	0,12	13,25	0,34	1,00	0,05	0,14	0,52	4,10	4,46	0,03	6,14	1,37	8,15	3474,56	143,21	98,10	155,89	786,03
773,71	5,3	-14,43	60,54	0,61	69,60	0,13	13,28	0,35	1,00	0,05	0,13	0,52	4,14	4,40	0,03	6,38	1,36	8,21	3686,44	134,98	98,10	162,03	789,46
768,71	5,3	-14,48	58,19	0,58	69,31	0,13	13,31	0,36	1,00	0,05	0,13	0,52	4,18	4,33	0,03	6,64	1,36	8,27	3912,97	127,17	98,10	168,59	792,99

T (C)	P (kbars)	log(10) f O ₂	liq mass (gm)	X _{liq}	wt% SiO ₂	wt% TiO ₂	wt% Al ₂ O ₃	wt% Fe ₂ O ₃	wt% FeO	wt% MnO	wt% MgO	wt% CaO	wt% Na ₂ O	wt% K ₂ O	wt% P ₂ O ₅	wt% H ₂ O	M	lnD=x	D_model	Zr_M	Zr_wr	Zr_melt	TsatZr_melt
763,71	5,3	-14,53	55,85	0,56	69,00	0,14	13,35	0,37	1,00	0,05	0,12	0,51	4,23	4,27	0,03	6,92	1,36	8,33	4155,39	119,75	98,10	175,63	796,64
758,71	5,3	-14,61	53,45	0,53	68,66	0,13	13,40	0,38	1,00	0,05	0,12	0,51	4,29	4,19	0,04	7,23	1,36	8,39	4415,43	112,70	98,10	183,52	800,59
753,71	5,3	-14,69	51,05	0,51	68,28	0,12	13,46	0,39	1,00	0,06	0,11	0,51	4,36	4,10	0,04	7,57	1,36	8,45	4693,79	106,01	98,10	192,16	804,74
748,71	5,3	-14,76	48,66	0,49	67,86	0,11	13,52	0,40	1,00	0,06	0,11	0,51	4,44	4,01	0,04	7,94	1,36	8,52	4991,57	99,69	98,10	201,62	809,09
743,71	5,3	-14,84	46,26	0,46	67,38	0,10	13,60	0,42	1,00	0,06	0,11	0,51	4,52	3,91	0,04	8,36	1,36	8,58	5310,02	93,71	98,10	212,08	813,68
738,71	5,3	-14,91	43,84	0,44	66,84	0,09	13,69	0,43	1,00	0,07	0,10	0,50	4,62	3,80	0,04	8,82	1,36	8,64	5650,17	88,07	98,10	223,76	818,56
733,71	5,3	-14,99	41,40	0,41	66,21	0,08	13,79	0,45	1,01	0,07	0,10	0,50	4,73	3,68	0,05	9,34	1,37	8,70	6013,18	82,75	98,10	236,97	823,79
728,71	5,3	-15,07	38,91	0,39	65,48	0,07	13,91	0,46	1,02	0,07	0,10	0,49	4,86	3,55	0,05	9,93	1,37	8,76	6399,20	77,76	98,10	252,12	829,44
723,71	5,3	-15,16	36,36	0,36	64,61	0,07	14,06	0,48	1,04	0,08	0,09	0,49	5,00	3,40	0,05	10,63	1,37	8,83	6809,00	73,08	98,10	269,83	835,63
718,71	5,3	-15,29	33,71	0,34	63,53	0,06	14,25	0,51	1,09	0,09	0,08	0,48	5,18	3,22	0,06	11,46	1,37	8,89	7242,96	68,70	98,10	291,02	842,55
713,71	5,3	-15,43	30,97	0,31	62,21	0,05	14,48	0,54	1,15	0,09	0,08	0,47	5,38	3,03	0,06	12,46	1,38	8,95	7696,18	64,66	98,10	316,72	850,27
708,71	5,3	-15,58	28,16	0,28	60,58	0,04	14,76	0,57	1,22	0,10	0,07	0,47	5,62	2,80	0,07	13,70	1,39	9,01	8163,50	60,95	98,10	348,33	858,90
703,71	5,3	-15,77	25,36	0,25	58,59	0,03	15,11	0,60	1,30	0,11	0,06	0,45	5,89	2,56	0,08	15,21	1,40	9,06	8638,27	57,60	98,10	386,87	868,33
698,71	5,3	-15,99	22,86	0,23	56,46	0,03	15,47	0,61	1,37	0,13	0,05	0,44	6,16	2,33	0,08	16,87	1,42	9,12	9133,82	54,48	98,10	429,21	877,67
693,71	5,3	-16,22	20,58	0,21	54,05	0,02	15,89	0,62	1,44	0,14	0,05	0,43	6,44	2,10	0,09	18,73	1,44	9,17	9618,86	51,73	98,10	476,58	886,75

Tabela X-6. Tabela produzida através do modelamento no programa *rhyolite*-MELTS referente à amostra MH-238C do plúton Japi. Continua na próxima página.

T (C)	P (kbars)	log(10) f O ₂	liq mass (gm)	X _{liq}	wt% SiO ₂	wt% TiO ₂	wt% Al ₂ O ₃	wt% Fe ₂ O ₃	wt% FeO	wt% MnO	wt% MgO	wt% CaO	wt% Na ₂ O	wt% K ₂ O	wt% P ₂ O ₅	wt% H ₂ O	M	lnD=x	D model	Zr M	Zr wr	Zr melt	TsatZr melt
891,99	5,3	-11,98	100,00	1,00	73,32	0,11	12,51	0,27	0,91	0,03	0,22	1,02	4,15	3,57	0,05	3,85	1,41	6,92	1014,03	490,72	103,80	103,80	748,63
886,99	5,3	-12,09	99,39	0,99	73,16	0,11	12,58	0,27	0,92	0,03	0,22	1,03	4,18	3,59	0,05	3,87	1,42	6,97	1060,51	469,21	103,80	104,43	748,89
881,99	5,3	-12,20	98,79	0,99	73,00	0,11	12,66	0,27	0,92	0,03	0,22	1,03	4,20	3,61	0,05	3,89	1,42	7,01	1109,57	448,46	103,80	105,07	749,14
876,99	5,3	-12,31	98,20	0,98	72,84	0,11	12,74	0,27	0,93	0,03	0,23	1,04	4,23	3,63	0,05	3,92	1,42	7,06	1161,35	428,47	103,80	105,70	749,39
871,99	5,3	-12,43	97,61	0,98	72,67	0,11	12,81	0,28	0,94	0,03	0,23	1,04	4,25	3,65	0,05	3,94	1,43	7,10	1216,05	409,19	103,80	106,34	749,64
866,99	5,3	-12,54	96,79	0,97	72,52	0,11	12,87	0,28	0,94	0,03	0,23	1,05	4,27	3,68	0,05	3,97	1,43	7,15	1274,27	390,50	103,80	107,24	750,11
861,99	5,3	-12,65	94,79	0,95	72,40	0,11	12,86	0,28	0,96	0,03	0,23	1,02	4,25	3,74	0,05	4,06	1,43	7,20	1338,16	371,86	103,80	109,51	751,74
856,99	5,3	-12,76	92,83	0,93	72,28	0,11	12,85	0,29	0,98	0,03	0,24	1,00	4,22	3,81	0,05	4,14	1,43	7,25	1405,81	353,96	103,80	111,81	753,36
851,99	5,3	-12,88	90,92	0,91	72,15	0,12	12,83	0,30	1,00	0,03	0,24	0,98	4,19	3,87	0,05	4,23	1,43	7,30	1477,47	336,79	103,80	114,17	754,98
846,99	5,3	-12,99	89,05	0,89	72,02	0,12	12,82	0,30	1,03	0,03	0,25	0,97	4,17	3,93	0,05	4,32	1,43	7,35	1553,45	320,32	103,80	116,57	756,61
841,99	5,3	-13,11	87,21	0,87	71,89	0,12	12,81	0,31	1,05	0,03	0,25	0,95	4,14	3,99	0,06	4,41	1,43	7,40	1634,01	304,53	103,80	119,02	758,23
836,99	5,3	-13,21	85,37	0,85	71,76	0,12	12,80	0,32	1,06	0,03	0,25	0,93	4,11	4,06	0,06	4,50	1,44	7,45	1719,71	289,35	103,80	121,59	759,91
831,99	5,3	-13,26	83,46	0,83	71,64	0,13	12,80	0,32	1,05	0,03	0,24	0,91	4,08	4,12	0,06	4,61	1,44	7,50	1811,24	274,73	103,80	124,37	761,73
826,99	5,3	-13,32	81,59	0,82	71,52	0,13	12,80	0,33	1,04	0,04	0,23	0,90	4,06	4,19	0,06	4,71	1,44	7,55	1908,52	260,73	103,80	127,23	763,55
821,99	5,3	-13,37	79,75	0,80	71,39	0,13	12,80	0,33	1,03	0,04	0,22	0,89	4,03	4,26	0,06	4,82	1,44	7,61	2011,86	247,33	103,80	130,16	765,39
816,99	5,3	-13,42	77,94	0,78	71,26	0,14	12,81	0,34	1,02	0,04	0,21	0,87	4,01	4,32	0,06	4,93	1,44	7,66	2121,74	234,52	103,80	133,19	767,24
811,99	5,3	-13,56	76,11	0,76	71,13	0,14	12,81	0,33	1,00	0,04	0,20	0,86	3,98	4,39	0,06	5,05	1,44	7,71	2238,91	222,25	103,80	136,38	769,17
806,99	5,3	-13,73	74,30	0,74	71,01	0,14	12,82	0,32	0,98	0,04	0,19	0,85	3,95	4,45	0,06	5,18	1,44	7,77	2363,70	210,52	103,80	139,71	771,14
801,99	5,3	-13,91	72,50	0,72	70,88	0,14	12,83	0,31	0,96	0,04	0,19	0,84	3,93	4,52	0,07	5,30	1,44	7,82	2496,57	199,31	103,80	143,17	773,14
796,99	5,3	-14,09	70,72	0,71	70,74	0,14	12,84	0,29	0,94	0,04	0,18	0,83	3,90	4,58	0,07	5,44	1,44	7,88	2638,08	188,62	103,80	146,78	775,18
791,99	5,3	-14,26	68,94	0,69	70,60	0,14	12,85	0,28	0,92	0,04	0,17	0,83	3,88	4,64	0,07	5,58	1,44	7,93	2788,96	178,42	103,80	150,56	777,26
786,99	5,3	-14,43	67,17	0,67	70,45	0,14	12,86	0,27	0,90	0,04	0,17	0,82	3,86	4,70	0,07	5,72	1,45	7,99	2949,85	168,69	103,80	154,53	779,41
781,99	5,3	-14,60	65,01	0,65	70,26	0,14	12,88	0,26	0,88	0,04	0,16	0,82	3,87	4,70	0,07	5,91	1,45	8,05	3120,94	159,44	103,80	159,67	782,12

T (C)	P (kbars)	log(10) f O ₂	liq mass (gm)	X _{liq}	wt% SiO ₂	wt% TiO ₂	wt% Al ₂ O ₃	wt% Fe ₂ O ₃	wt% FeO	wt% MnO	wt% MgO	wt% CaO	wt% Na ₂ O	wt% K ₂ O	wt% P ₂ O ₅	wt% H ₂ O	M	lnD=x	D_model	Zr_M	Zr_wr	Zr_melt	TsatZr_melt
776,99	5,3	-14,77	62,51	0,63	70,03	0,15	12,89	0,25	0,87	0,05	0,16	0,83	3,90	4,64	0,08	6,15	1,45	8,10	3302,71	150,66	103,80	166,06	785,37
771,99	5,3	-14,93	60,04	0,60	69,79	0,15	12,90	0,25	0,86	0,05	0,15	0,83	3,95	4,58	0,08	6,40	1,45	8,16	3496,33	142,32	103,80	172,89	788,73
766,99	5,3	-15,10	57,60	0,58	69,52	0,15	12,92	0,24	0,85	0,05	0,15	0,84	4,00	4,52	0,08	6,68	1,45	8,22	3702,38	134,40	103,80	180,22	792,19
761,99	5,3	-15,26	55,17	0,55	69,23	0,15	12,94	0,24	0,85	0,05	0,15	0,84	4,05	4,45	0,09	6,97	1,46	8,27	3921,53	126,89	103,80	188,15	795,78
756,99	5,3	-15,42	52,75	0,53	68,90	0,15	12,97	0,23	0,84	0,05	0,14	0,85	4,12	4,37	0,09	7,29	1,46	8,33	4154,57	119,77	103,80	196,80	799,53
751,99	5,3	-15,53	50,27	0,50	68,53	0,14	13,00	0,23	0,83	0,06	0,14	0,85	4,19	4,28	0,10	7,65	1,46	8,39	4401,65	113,05	103,80	206,48	803,53
746,99	5,3	-15,65	47,79	0,48	68,11	0,13	13,04	0,24	0,83	0,06	0,14	0,85	4,28	4,19	0,10	8,05	1,47	8,45	4663,38	106,70	103,80	217,19	807,74
741,99	5,3	-15,90	45,23	0,45	67,61	0,12	13,08	0,23	0,86	0,06	0,13	0,86	4,37	4,08	0,11	8,49	1,47	8,51	4940,54	100,72	103,80	229,49	812,34
736,99	5,3	-16,20	42,63	0,43	67,03	0,10	13,14	0,23	0,91	0,07	0,12	0,86	4,48	3,96	0,11	8,99	1,48	8,56	5232,83	95,09	103,80	243,49	817,27
731,99	5,3	-16,48	39,99	0,40	66,34	0,09	13,21	0,23	0,96	0,07	0,10	0,87	4,61	3,82	0,12	9,57	1,49	8,62	5538,92	89,84	103,80	259,54	822,57
726,99	5,3	-16,75	37,29	0,37	65,53	0,08	13,30	0,22	1,01	0,08	0,09	0,87	4,77	3,66	0,13	10,25	1,50	8,68	5856,69	84,96	103,80	278,34	828,33
721,99	5,3	-17,01	34,49	0,34	64,53	0,07	13,41	0,22	1,07	0,08	0,08	0,87	4,95	3,49	0,14	11,08	1,51	8,73	6181,78	80,49	103,80	300,95	834,69
716,99	5,3	-17,15	31,56	0,32	63,29	0,06	13,56	0,23	1,10	0,09	0,08	0,88	5,18	3,28	0,15	12,10	1,53	8,78	6504,70	76,50	103,80	328,86	841,79
711,99	5,3	-17,30	28,47	0,28	61,68	0,05	13,76	0,24	1,14	0,10	0,07	0,88	5,47	3,04	0,17	13,41	1,55	8,83	6811,74	73,05	103,80	364,60	849,87
706,99	5,3	-17,48	25,28	0,25	59,58	0,04	14,01	0,25	1,19	0,11	0,07	0,88	5,82	2,75	0,19	15,10	1,58	8,87	7083,46	70,25	103,80	410,60	858,85
701,99	5,3	-17,67	22,29	0,22	57,08	0,03	14,31	0,26	1,26	0,13	0,06	0,87	6,21	2,46	0,22	17,12	1,63	8,90	7313,88	68,04	103,80	465,67	867,90
696,99	5,3	-17,87	19,93	0,20	54,62	0,02	14,57	0,26	1,30	0,14	0,06	0,86	6,56	2,21	0,24	19,15	1,67	8,93	7546,38	65,94	103,80	520,93	875,54
691,99	5,3	-18,07	18,06	0,18	52,23	0,02	14,82	0,26	1,33	0,16	0,05	0,85	6,88	1,99	0,27	21,13	1,71	8,96	7775,22	64,00	103,80	574,82	881,65
686,99	5,3	-18,27	16,68	0,17	50,17	0,02	15,02	0,26	1,34	0,17	0,05	0,85	7,14	1,83	0,29	22,87	1,76	8,99	8042,75	61,87	103,80	622,39	886,19

Tabela X-7. Tabela produzida através do modelamento no programa *rhyolite-MELTS* referente à amostra SF-40 do stock Flores. Continua na próxima página.

T (C)	P (kbars)	log(10) f O ₂	liq mass (gm)	X _{liq}	wt% SiO ₂	wt% TiO ₂	wt% Al ₂ O ₃	wt% Fe ₂ O ₃	wt% FeO	wt% MnO	wt% MgO	wt% CaO	wt% Na ₂ O	wt% K ₂ O	wt% P ₂ O ₅	wt% H ₂ O	M	lnD=x	D model	Zr M	Zr wr	Zr melt	TsatZr melt
819,92	2,6	-14,37	100,00	1,00	72,41	0,16	12,85	0,27	1,13	0,03	0,14	0,90	3,34	4,85	0,02	3,91	1,37	7,69	2187,24	227,50	174,00	174,00	795,64
814,92	2,6	-14,60	99,97	1,00	72,43	0,15	12,85	0,26	1,12	0,03	0,14	0,90	3,34	4,85	0,02	3,91	1,37	7,74	2309,53	215,46	174,00	174,05	795,68
809,92	2,6	-14,85	99,03	0,99	72,53	0,15	12,77	0,24	1,12	0,03	0,14	0,88	3,29	4,88	0,02	3,95	1,36	7,80	2447,29	203,33	174,00	175,70	796,80
804,92	2,6	-15,11	98,02	0,98	72,64	0,15	12,68	0,23	1,12	0,03	0,14	0,85	3,24	4,91	0,02	3,99	1,36	7,86	2595,27	191,73	174,00	177,52	798,02
799,92	2,6	-15,37	97,01	0,97	72,74	0,15	12,59	0,22	1,12	0,03	0,14	0,83	3,19	4,94	0,02	4,03	1,35	7,92	2753,62	180,71	174,00	179,35	799,25
794,92	2,6	-15,63	96,02	0,96	72,85	0,15	12,50	0,20	1,12	0,03	0,14	0,81	3,13	4,97	0,02	4,07	1,35	7,98	2923,18	170,23	174,00	181,22	800,48
789,92	2,6	-15,93	94,28	0,94	72,79	0,15	12,48	0,19	1,13	0,03	0,14	0,80	3,09	5,03	0,02	4,14	1,35	8,04	3097,64	160,64	174,00	184,56	802,22
784,92	2,6	-16,25	92,17	0,92	72,67	0,15	12,49	0,18	1,13	0,03	0,15	0,79	3,06	5,10	0,02	4,24	1,35	8,10	3281,22	151,65	174,00	188,79	804,28
779,92	2,6	-16,56	89,01	0,89	72,53	0,15	12,49	0,16	1,16	0,03	0,15	0,80	3,06	5,07	0,02	4,39	1,35	8,15	3480,60	142,96	174,00	195,48	807,52
774,92	2,6	-16,87	85,92	0,86	72,37	0,15	12,49	0,15	1,18	0,03	0,16	0,81	3,06	5,04	0,02	4,55	1,35	8,21	3694,18	134,70	174,00	202,51	810,83
769,92	2,6	-17,19	82,90	0,83	72,21	0,14	12,49	0,15	1,20	0,04	0,16	0,81	3,06	5,00	0,02	4,71	1,34	8,27	3923,19	126,84	174,00	209,89	814,21
764,92	2,6	-17,50	79,93	0,80	72,03	0,14	12,49	0,14	1,23	0,04	0,17	0,82	3,07	4,96	0,02	4,89	1,34	8,34	4168,73	119,36	174,00	217,68	817,66
759,92	2,6	-17,81	77,02	0,77	71,85	0,14	12,50	0,13	1,25	0,04	0,17	0,83	3,08	4,92	0,03	5,07	1,34	8,40	4432,27	112,27	174,00	225,92	821,21
754,92	2,6	-18,11	74,02	0,74	71,65	0,13	12,51	0,12	1,27	0,04	0,16	0,83	3,09	4,88	0,03	5,28	1,34	8,46	4716,44	105,50	174,00	235,06	825,03
749,92	2,6	-18,39	71,06	0,71	71,45	0,13	12,53	0,12	1,29	0,04	0,15	0,84	3,11	4,83	0,03	5,49	1,34	8,52	5022,24	99,08	174,00	244,88	829,01
744,92	2,6	-18,60	68,10	0,68	71,22	0,12	12,55	0,11	1,30	0,04	0,13	0,84	3,14	4,78	0,03	5,72	1,34	8,59	5351,40	92,99	174,00	255,50	833,17
739,92	2,6	-18,73	65,13	0,65	70,99	0,11	12,58	0,11	1,29	0,04	0,12	0,85	3,17	4,72	0,03	5,98	1,33	8,65	5706,62	87,20	174,00	267,14	837,58
734,92	2,6	-19,11	14,51	0,15	69,80	0,11	14,09	0,10	1,30	0,20	0,10	0,78	2,63	4,81	0,13	5,94	1,12	8,90	7322,14	67,96	174,00	1199,53	1026,47
729,92	2,6	-19,14	9,37	0,09	68,97	0,11	15,22	0,09	1,21	0,30	0,10	0,77	2,28	4,84	0,21	5,91	0,99	9,07	8679,83	57,33	174,00	1856,95	1101,73
724,92	2,6	-19,16	7,35	0,07	68,28	0,11	16,11	0,09	1,13	0,38	0,09	0,77	2,03	4,84	0,27	5,90	0,91	9,20	9935,37	50,08	174,00	2367,89	1149,30
719,92	2,6	-19,17	6,20	0,06	67,67	0,11	16,89	0,09	1,06	0,44	0,09	0,78	1,84	4,82	0,31	5,91	0,84	9,32	11183,06	44,50	174,00	2804,49	1185,06
714,92	2,6	-19,18	5,45	0,05	67,10	0,10	17,59	0,09	0,99	0,50	0,08	0,79	1,69	4,78	0,36	5,92	0,79	9,43	12463,94	39,92	174,00	3194,83	1214,15
709,92	2,6	-19,20	4,90	0,05	66,57	0,10	18,24	0,09	0,93	0,55	0,08	0,80	1,56	4,74	0,40	5,94	0,75	9,53	13802,15	36,05	174,00	3553,33	1238,90
704,92	2,6	-19,21	4,47	0,04	66,06	0,10	18,85	0,08	0,87	0,59	0,08	0,82	1,45	4,69	0,44	5,97	0,72	9,63	15215,29	32,70	174,00	3888,54	1260,57

699,92	2,6	-19,22	4,14	0,04	65,57	0,10	19,43	0,08	0,82	0,64	0,07	0,83	1,35	4,64	0,47	6,00	0,69	9,72	16718,76	29,76	174,00	4206,07	1279,95
694,92	2,6	-19,23	3,86	0,04	65,09	0,09	19,98	0,08	0,77	0,68	0,07	0,85	1,26	4,58	0,51	6,03	0,66	9,82	18327,47	27,15	174,00	4509,81	1297,56
689,92	2,6	-19,24	3,62	0,04	64,62	0,09	20,51	0,08	0,72	0,72	0,07	0,87	1,18	4,52	0,54	6,07	0,63	9,91	20054,89	24,81	174,00	4802,65	1313,75
684,92	2,6	-19,26	3,42	0,03	64,16	0,09	21,03	0,08	0,68	0,75	0,07	0,89	1,11	4,46	0,57	6,11	0,61	9,99	21916,06	22,70	174,00	5086,81	1328,79
679,92	2,6	-19,27	3,24	0,03	63,71	0,09	21,53	0,08	0,64	0,79	0,06	0,91	1,05	4,39	0,60	6,15	0,59	10,08	23925,94	20,80	174,00	5364,06	1342,87
674,92	2,6	-19,28	2,46	0,02	62,86	0,08	21,82	0,08	0,61	1,00	0,06	1,13	1,01	4,27	0,79	6,29	0,60	10,14	25410,69	19,58	174,00	7080,13	1398,66
669,92	2,6	-19,29	1,47	0,01	61,12	0,08	21,75	0,09	0,59	1,56	0,06	1,76	0,99	4,04	1,32	6,64	0,68	10,15	25515,96	19,50	174,00	11812,10	1500,69