

ASPECTOS DA GEOLOGIA E MINERALOGIA DO PEGMATITO ALTO DO PATRIMÔNIO, PROVÍNCIA PEGMATÍTICA DA BORBOREMA

ASPECTS OF GEOLOGY AND MINERALOGY OF THE ALTO DO PATRIMÔNIO PEGMATITE, BORBOREMA PEGMATITIC PROVINCE

Vinícius Anselmo Carvalho Lisboa ^{1*}, Juana Cristina de Abreu Macedo ¹, Agda Rayanna Santos Pereira ¹, Letícia Verônica Noberto ¹, Manoel Pereira Galdino ¹

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), Campus Picuí, Picuí, Paraíba, Brasil. *autor correspondente: vinicius.lisboa@ifpb.edu.br.

<https://doi.org/10.51359/1980-8208.2023.257886>

RESUMO

O Pegmatito Alto do Patrimônio localiza-se ao norte do estado da Paraíba, na cidade de Pedra Lavrada. Este corpo pegmatítico está inserido no contexto da Província Pegmatítica da Borborema, intrudindo os metassedimentos da Formação Seridó. O corpo apresenta comprimento com cerca 120 m de extensão, com espessura máxima de 46 m, está orientado segundo a direção N-S. Exibe um zoneamento mineral bem definido, a saber: i) zona de borda (zona I); ii) zona de muro (zona II); iii) zona intermediária (zona III) e iv) núcleo de quartzo (zona IV). A zona III é a mais expressiva, sendo composta por quartzo, feldspatos e micas; é nela onde está concentrada a maior parte dos minerais de interesse econômico (principalmente a ferro-columbita e o berilo). Na porção mais interna do pegmatito, o núcleo de quartzo, composto por quartzo leitoso e rosáceo. A partir dos dados obtidos com o Espectrômetro de Energia Dispersiva (EDS) acoplado ao Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), pode-se obter a composição química pontual de amostras de feldspato e de ferro-columbita da zona III deste pegmatito. O feldspato é rico em álcalis (Na_2O e K_2O) e pobre em CaO . A razão K/Rb (48,2 a 138,9) revela um moderado grau de fracionamento. A ferro-columbita possui valores baixos da relação $\text{Ta}/(\text{Ta}+\text{Nb})$, sempre abaixo de 0,11. A identificação da mineralogia permitiu categorizá-la como um pegmatito da família LCT, da classe dos pegmatitos ricos em elementos raros (REL).

Palavras-chave: faixa seridó; pegmatito zonado; minerais industriais.

ABSTRACT

The Alto do Patrimônio Pegmatite is located in the north of the state of Paraíba, in the Pedra Lavrada city. It is inserted in the context of the Borborema Pegmatitic Province, intruding the metasediments of the Seridó Formation. The body has a length of about 120 m, with a maximum thickness of 46 m, is oriented in the N-S directions. It exhibits a well-defined mineral zoning, namely: i) edge zone (zone I); ii) wall zone (zone II); iii) intermediate zone (zone III) and iv) quartz core (zone IV). Zone III is also composed of quartz, feldspars and

micas; it is where most of the minerals of economic interest are concentrated (mainly Fe-columbite and beryl). In the innermost portion of the pegmatite, the quartz core, composed of milky and rose quartz. From the data obtained with the Energy Dispersive Spectrometer (EDS) coupled to the Scanning Electron Microscope (SEM), the specific chemical composition of feldspar and Fe-columbite samples from zone III of this pegmatite can be obtained. Feldspar is rich in alkalis (Na_2O and K_2O) and poor in CaO . The K/Rb ratio (48.2 to 138.9) reveals a moderate degree of fractionation. Fe-columbite has low values for the Ta/(Ta+Nb) ratio, always below 0.11. The identification of this mineralogy allowed categorizing it as a pegmatite of the LCT family, of the class of pegmatites rich in rare elements (REL).

Keywords: seridó belt; zoned pegmatite; industrial minerals.

1. INTRODUÇÃO

O estudo de pegmatitos apresenta grande importância, devido à presença, nessas rochas, de minerais raros, que usualmente são explorados como gema e pela presença de elementos incompatíveis como: elementos terras-raras (ETR), ítrio (Y), urânio (U), tório (Th), lítio (Li), nióbio (Nb), tântalo (Ta), estanho (Sn) e berílio (Be) que possuem grande valor econômico (London, 1996, 2018; Duuring, 2020).

No cenário mundial, observa-se uma crescente demanda por minérios de Li, Ta e ETR, elementos bastante utilizados em capacitores de alta temperatura e baterias recarregáveis, o que representa uma tendência importante na mudança da matriz energética empregada principalmente em veículos automotivos.

A Província Pegmatítica da Borborema (PPB), definida por Scorza (1944), tem destaque na exploração de pegmatitos desde as primeiras grandes guerras (Silva & Dantas, 1997), sendo a mica o foco exploratório durante a 1ª Guerra Mundial, enquanto que durante a 2ª Guerra Mundial as atenções se voltaram para a exploração da tantalita e do berilo.

Ao longo dos anos que se sucederam a PPB continuou apresentando destaque na exploração mineral, seja pelo fornecimento de

material para a indústria da cerâmica (k-feldspato, albita, micas e caulim) ou pela ocorrência de pedras preciosas (turmalina paraíba e berilo). A grande variedade de pedras preciosas e ocorrências de minerais de minério sempre foi uma marca desta província. Mais recentemente Beurlen et al. (2014) chamaram a atenção para a ocorrência de Li e elementos associados (e.g. Ta, Nb e Sn).

Ante a isso, o estudo em detalhe da geologia e da composição química do feldspato e dos nióbio-tantalatos do Pegmatito Alto do Patrimônio, objeto principal deste trabalho, pode contribuir com novas informações que podem ajudar a elucidar as questões petrogenéticas como a gênese dos corpos e de suas mineralizações, que ainda não são bem definidas.

2. CONTEXTO GEOLÓGICO

A Província Borborema (PB – Almeida et al., 1977) compreende uma região formada nos últimos estágios magmáticos da Orogênese Brasileira, o último evento orogenético importante na formação de rochas e estruturas dúcteis no NE brasileiro. A PB limita-se a oeste pelos sedimentos Fanerozóicos da Bacia do Parnaíba, a norte-nordeste e leste por bacias Fanerozóicas costeiras, e a sul e noroeste pelos crátons São Francisco e São Luiz, respectivamente (Figura 1).

Uma proposta mais recente para a formação da PB é apresentada por Araújo et al. (2014), que define a configuração atual da província como resultante de dois processos colisionais neoproterozoicos. O primeiro, com vergência para leste, seria resultante do fechamento do oceano Pharusiano Goiás, com a colisão do Bloco Parnaíba e o Domínio Ceará Central. O segundo, com vergência para norte, estaria relacionado ao fechamento do oceano Sergipano-Oubanguides, no

orógeno Sergipano. Esses eventos colisionais, em direções diferentes, resultariam na extrusão do Bloco Norte da PB, com sentido de transporte para NE, gerando diversas zonas de cisalhamento dextróginas. Esse modelo engloba o contexto intraplaca, definido por Neves (2015), as evidências de subducção (Araújo et al., 2012; Pitombeira et al., 2017) e ciclos completos de Wilson (Oliveira et al., 2010) durante a Orogênese Brasileira.

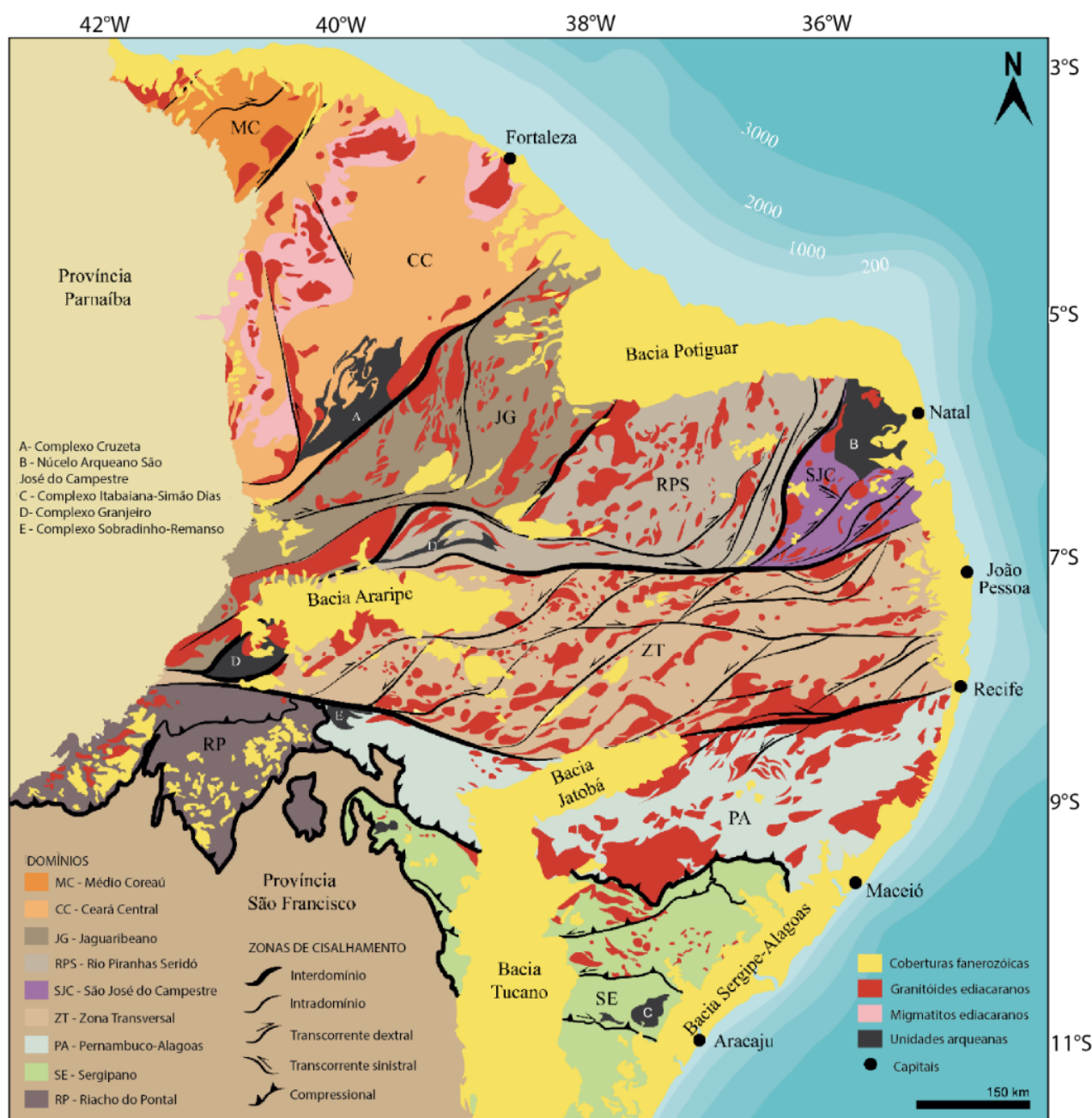


Figura 1. Província Borborema dividida em domínios. Extraído de Medeiros et al., (2017).

Van Schmus et al. (2011) propuseram a divisão da Província Borborema em três subprovíncias principais, a saber: Sul, Central e Norte. A Subprovíncia Norte, situada acima do Lineamento Patos, é composta pelo Domínio Médio Coreaú, Ceará Central e Domínio Rio Grande do Norte. Este último, é subdividido em Subdomínio Jaguaribeano, Subdomínio São José do Campestre e Subdomínio Rio Piranhas-Seridó (Medeiros et al., 2017). A evolução destes subdomínios está relacionada ao rifteamento intracrustal pós-transamazônico e a deposição de sequências vulcanossedimentares, seguidas de intrusões diversas (Neves, 2003).

2.1. Faixa Seridó

A Faixa Seridó (FS), é uma região clássica do Nordeste brasileiro, situada no limite leste do Subdomínio Rio Piranhas-Seridó, limitada ao sul e oeste respectivamente pelas zonas de cisalhamento Patos (Lineamento Patos) e Portalegre, enquanto que a norte e a leste pelo terreno São José do Campestre (Jardim de Sá, 1994).

Compreende uma sequência metavulcanossedimentar (Grupo Seridó), depositada discordantemente sobre um embasamento Arqueano-Paleoproterozóico designado como Complexo Caicó, submetida a forte deformação transpressional, intrusão de volumoso plutonismo granítico brasileiro e retrabalhamento por estruturas transcorrentes que imprimiram um trend N-NE à Faixa (Nascimento, 2002), esta sequência foi depositada (idade U-Pb de 650 ± 50 Ma; Van Schmus et al., 2003; Hollanda et al. 2015) em um ambiente plataformar turbidítico (Domingos et al., 2020). A FS pode ter sido originada em um curto ciclo tectônico extensional e contracional entre 700 e 600 Ma, sucedido de sua deformação. Este ciclo tectônico poderia ter ocorrido em um ambiente extensional do tipo backarc, próximo a

uma margem continental ativa (Jardim de Sá, 1994). De acordo com Archanjo et al. (2013), o pico de deformação, magmatismo e metamorfismo pode ter ocorrido entre 575–565Ma.

O Complexo Caicó (CC), que constitui-se predominantemente de uma associação de gnaisses bandados, gnaisses dioríticos a graníticos e migmatitos associados a intercalações de rochas máficas (Souza et al., 2007). O contato entre o CC e as supracrustais marcados por zonas de cisalhamento tangenciais ou transcorrentes (Jardim de Sá, 1994)

Sobre o CC estão depositadas as rochas do Grupo Seridó. Jardim de Sá (1994) definiu o Grupo Seridó como uma unidade composta por três formações, da base para o topo: Jucurutu, Equador e Seridó.

A Formação Jucurutu (FJu) é constituída de biotita paragneisses com intercalações de rochas calciossilicáticas e mármore, formações ferríferas e metaconglomerados. Em sua localidade tipo, a FJu apresenta paragneisses quartzo feldspáticos com pouca biotita, muscovita e epidoto. O plagioclásio é mais abundante que o feldspato potássico, porém com quartzo dominante (às vezes superior a 50%). A associação de mármore, formações ferríferas e a tendência calcítica-quartzítica dos paragneisses da FJu (associação tipo quartzito-pelito-carbonato) é correlacionada a um ambiente marinho raso (Nascimento, 2002).

A Formação Equador (FEq), representada por quartzitos e metaconglomerados, é constituída basicamente por muscovita-quartzitos com fácies arcoseanas e metaconglomeráticas. Os muscovita-quartzitos são de coloração branca, foliação bem desenvolvida, granulometria fina a média e textura equigranular. Segundo Da Silva (1993), os muscovita-quartzitos são constituídos de quartzo (50-70%), muscovita (27-30%) e microclina

(>20%), tendo como acessórios epidoto, biotita, titanita, apatita, zircão, turmalina, fuchcita, hematita, magnetita e sillimanita. Os metaconglomerados são polimíticos, com seixos de quartzo, gnaiss, granito, pegmatito, matriz de coloração cinza a esverdeada, predominantemente quartzosa, localmente arcoseana e possuem foliação pouco desenvolvida e forte lineação de estiramento NNE-SSW,

representada pelo alinhamento do eixo maior dos seixos (Ferreira & Santos, 1998). A FEq representaria a fração terrígena de um ambiente marinho (ainda na associação tipo quartzito-pelito-carbonato), talvez num contexto mais estável, associado a uma área ou lapso de tempo, específicos na bacia (Nascimento, 2002).

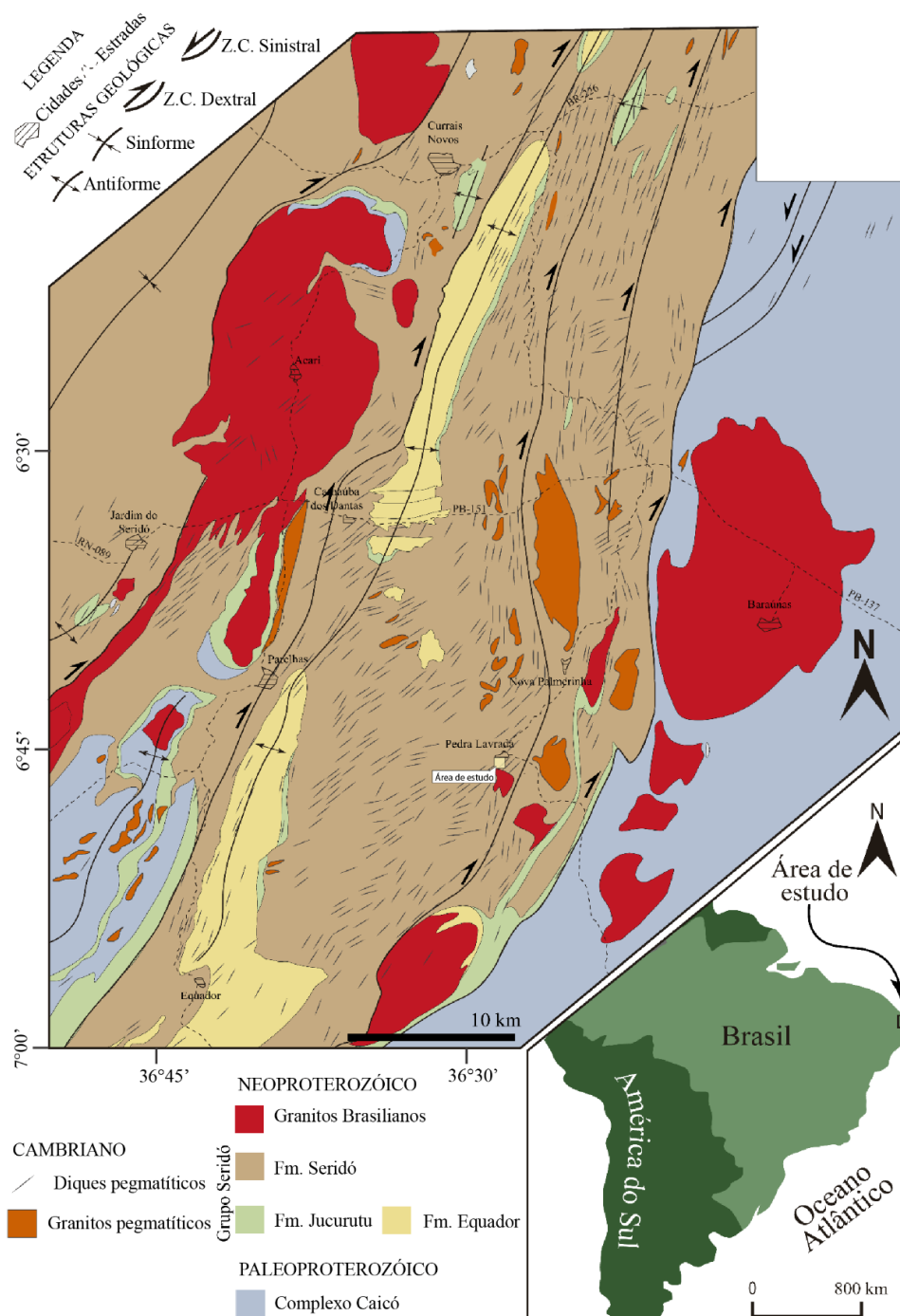


Figura 2. Mapa geológico simplificado da Faixa Seridó, com ênfase nos diques pegmatíticos. Extraído de Sales (2020).

A Formação Seridó (FSe) é composta principalmente por xistos e filitos. Esta unidade estratigráfica, a mais típica da região do Seridó, é constituída por uma sequência pelítica (com granada-biotita xisto como litologia dominante), com variações para psamítica (muscovita-quartzitos intercalados na sequência pelítica) e carbonática (calciossilicáticas intercaladas nos granada-biotita xisto e calcários cristalinos), conforme Ferreira & Santos (1998). A sequência pelítica é representada por granada-biotita xisto, localmente com elevado teor de feldspatos, com quartzo e sillimanita, podendo também conter nódulos de cordierita. Também podem ocorrer na sequência pelítica quartzo-biotita xisto e biotita gnaiss. A sequência psamítica é representada por muscovita-quartzito intercalado na sequência pelítica. A sequência carbonática é representada por pequenas lentes de rochas calciossilicáticas intercaladas nos granada-biotita xistos e calcários cristalinos, geralmente nas proximidades dos contatos desta formação com outras unidades supracrustais, ou no contato com o embasamento (Ferreira & Santos, 1998).

Uma característica marcante da FS é a presença de milhares de corpos pegmatíticos cadastrados (Figura 2), entre não zonados (ou homogêneos) e zonados (ou heterogêneos), sendo estes últimos responsáveis por conter as principais mineralizações de Ta-Nb-Be-Li-Sn-Cu (Sales, 2020).

Na PPB os pegmatitos possuem modo de ocorrência variados, ocorrendo desde veios centimétricos até diques e sills com centenas de metros de extensão e largura, podendo atingir algumas dezenas de km² de área. Estas rochas são controladas estruturalmente por zonas de cisalhamento e pela foliação das rochas encaixantes, principalmente, nas direções N-S, NE-SW e E-W (Araújo et al., 2001). A maioria das intrusões pegmatíticas da FS não apresentam

zoneamento, apenas em alguns pegmatitos é possível observar um zoneamento mineral.

Os pegmatitos zonados geralmente ocorrem como diques e sills com algumas centenas de metros de comprimento e espessura de cerca de 40 metros. Eles são caracterizados por apresentar um núcleo de quartzo bem desenvolvido, envolto por uma zona rica em feldspato. Estes pegmatitos foram continuamente explorados nos últimos 80 anos, principalmente, para Nb-Ta, berilo, incluindo esmeralda e água-marinha, feldspato, mica, caulinita e gemas (Beurlen et al., 2001, 2008, 2014).

Estudos geocronológicos realizados por diversos pesquisadores (p.ex. Araújo et al., 2005; Baumgartner et al., 2006; Palinkas et al., 2019; Hollanda et al., 2019) têm revelado idades entre 491 e 515 Ma para a formação desses pegmatitos, relacionando-os com o final do Ciclo Brasileiro.

3. GEOLOGIA DO PEGMATITO ALTO DO PATRIMÔNIO

O Pegmatito Alto do Patrimônio (PAP), está localizado ao sul da cidade de Pedra Lavrada (Figura 3), é explotado desde a década de 70, com foco na extração de feldspato, berilo e tantalita-columbita. O PAP intrude os xistos da Formação Seridó (FSe), que na área de estudo apresentam coloração acinzentada, por vezes mais escura (Figura 4A). A mineralogia dessas rochas é composta essencialmente por quartzo, feldspato, biotita, muscovita e granada. Veios (exudações) de quartzo ocorrem de forma constante, principalmente nas regiões mais próximas ao pegmatito (Figura 4B). Na região de contato, ainda, é possível se observar diques de leucogranito (Figura 4C) de granulação fina a muito fina, com muscovita e biotita. Diques de basalto, afaníticos e orientados E-W ocorrem na porção norte do corpo (Figura 4D).

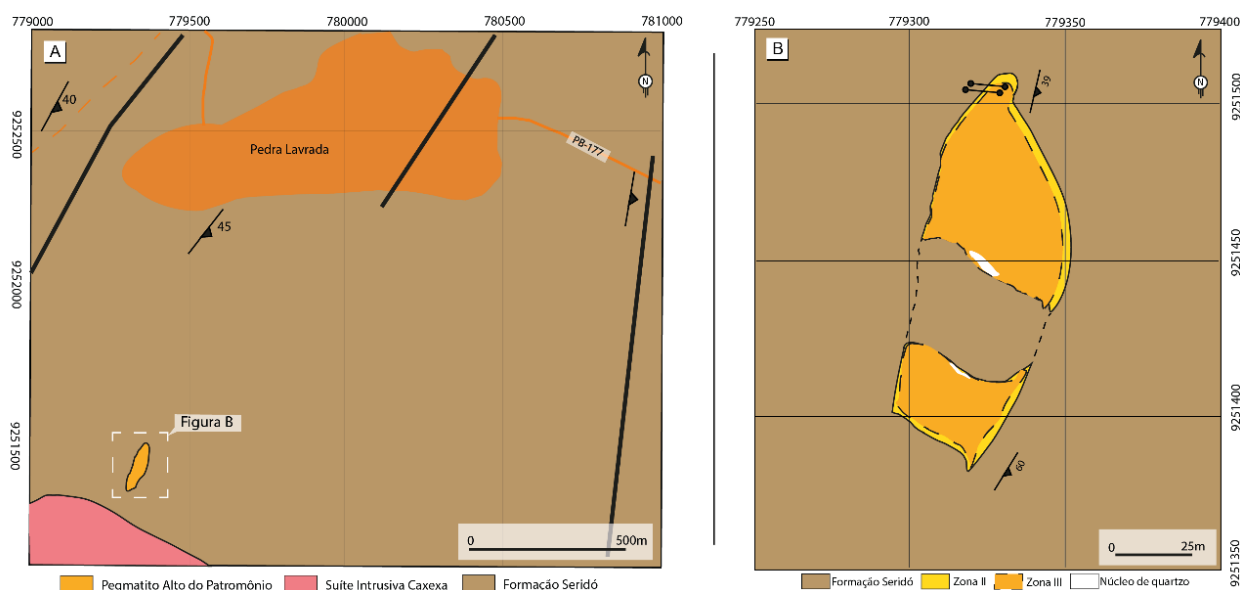


Figura 3. A) Mapa de localização do PAP; B) Mapa geológico de detalhe do PAP.

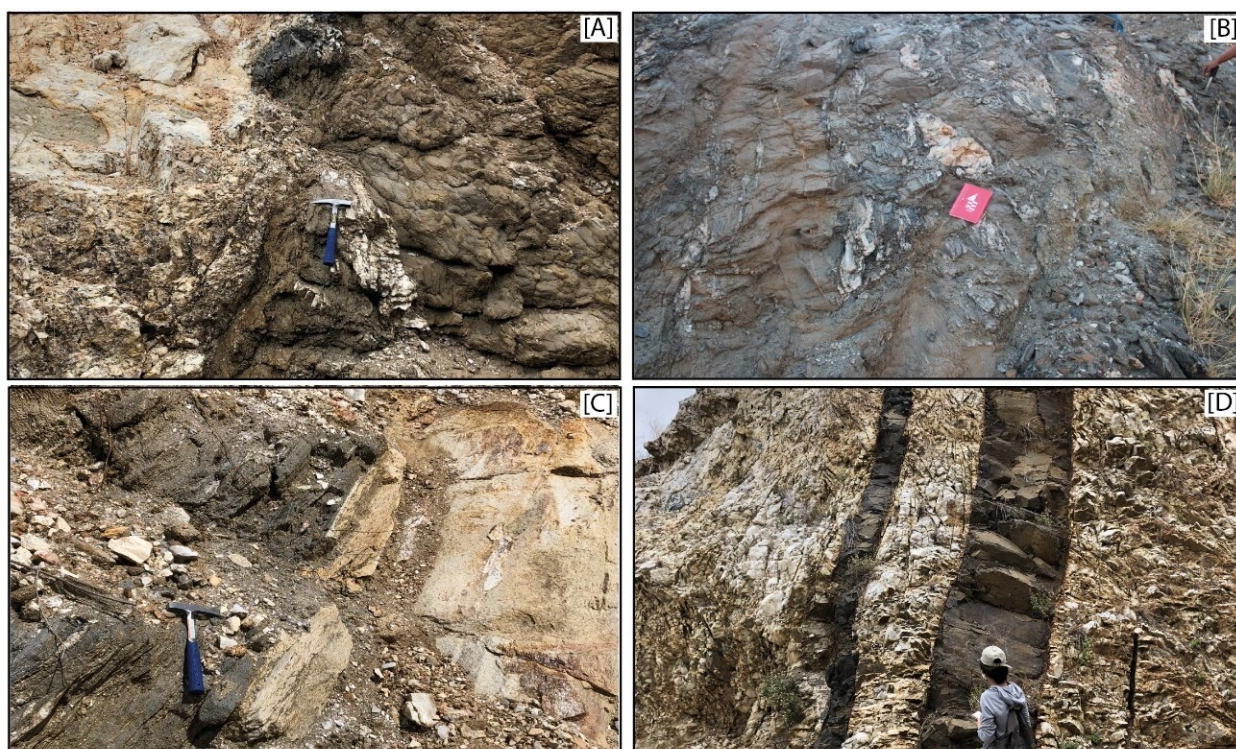


Figura 4. Aspecto de campo das rochas na região de contato com o PAP. A) Região de contato entre os xistos da FSe e o PAP. B) Exudações de quartzo no biotita xisto. C) Dique de leucogranito intrudindo o biotita xisto. D) Diques de basalto afanítico.

Como pode-se observar na Figura 3, o PAP é um corpo com aproximadamente 120 m de extensão e espessura máxima de 46m. Possui forma lenticular, com direção N-S e mergulho

para Oeste. A mineralogia desse pegmatito é composta por: quartzo, K-feldspato, albita, biotita, muscovita, berilo, nióbio-tantalatos, granada, heliodoro, água marinha, apatita, zircão e outros fosfatos. O PAP é um pegmatito zonado

(ou heterogêneo), no qual é possível identificar as quatro zonas, além dos corpos de substituição, que serão descritas a seguir.

Zona I (zona de borda)

É a zona mais externa do pegmatito, muitas vezes está em contato direto com o xisto, outras vezes ela não aparece na região de contato. Atinge, em alguns pontos, uma espessura entre 25 e 30 cm. Esta zona é marcada pela abundância de cristais de muscovita, com textura de solidificação unidirecional (Unidirectional Solidification Texture – UST), turmalina preta, raros cristais de granada também são observados nessa zona (Figura 5A).

Zona II (zona de muro)

Apresenta-se sob a forma de agregado equigranular de albita, K-feldspato, quartzo e muscovita, com granulometria normalmente variando entre 2 e 5 cm, com espessura de até 3 m. Esta zona caracteriza-se pela presença localizada de cristais de feldspato com textura gráfica, muscovita e alguns cristais de berilo (Figura 5B) e turmalina preta, às vezes com arranjos radiais, normalmente orientados para o interior da zona.

Zona III (zona intermediária)

Esta é a zona de maior extensão no pegmatito e seu limite com a zona II é geralmente gradativo, com aumento gradual na frequência e dimensão dos cristais. Tem espessura de até 20m, com granulação grossa (cristais métricos). É constituída principalmente por grandes cristais de K-feldspato perítico, albita, muscovita e alguns bolsões de quartzo leitoso. É nesta zona que ocorrem os minerais acessórios de maior interesse

econômico, a saber: nióbio-tantalatos, berilo, fosfatos e apatita (Figuras 5C e 5D).

Zona IV (Núcleo de quartzo)

O núcleo de quartzo neste pegmatito ocorre de forma descontínua, em lentes ou bolsões métricos a decimétricos sempre limitado ou envolvido pela zona III ou por corpos de substituição. O quartzo dominante é o leitoso, ocorrendo ainda porções significativas de quartzo róseo (Figura 5E). O núcleo tem uma espessura máxima de 5 m e seus limites com a zona III são bem marcados.

Corpos de substituição

Os corpos de substituição atingem, às vezes, dimensões superiores a 2 m. São constituídos, essencialmente, por micas, dispostas em pequenas placas (2 a 20 mm), K-feldspato e quartzo. Os diversos corpos de substituição observados no PAP ocorrem, principalmente, na zona III e possuem as mesmas características texturais e mineralógicas, com pequenas variações percentuais na sua mineralogia essencial (Figura 5F).

De acordo com Cameron et al. (1949) os corpos de substituição são unidades formadas por substituições localizadas em pegmatitos preexistentes, com ou sem controle estrutural. Eles ocorrem normalmente nas proximidades como núcleo de quartzo. Os corpos de substituição podem ser produtos de solução derivada de outra parte do mesmo pegmatito ou de solução derivada de uma fonte externa ao pegmatito (Soares, 2004).

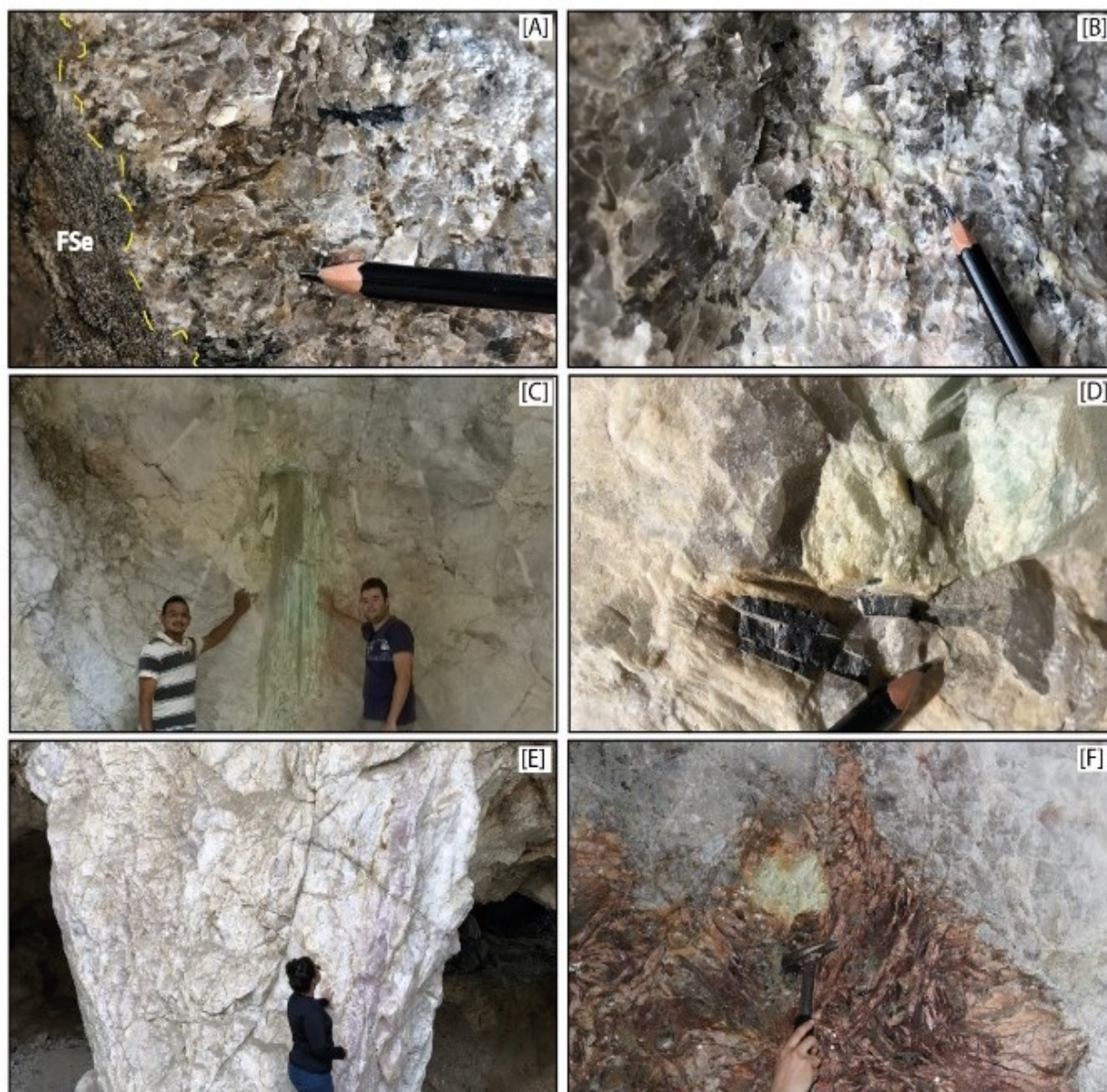


Figura 5. Aspectos de campo das rochas do PAP. A) Textura característica da zona I, vários cristais de muscovita e turmalina preta (em menor quantidade). A linha amarela tracejada marca o contato com o biotita xisto. B) Textura representativa da zona II, rocha equigranular de granulação grossa, composta por albita, K-feldspato, quartzo e muscovita. C) Cristal de berilo (verde), com cerca de 2 metros de comprimento. É possível notar, ainda, grandes cristais de K-feldspato (bege) e quartzo (branco). D) Detalhe dos minerais acessórios que ocorrem na zona III, tantalita-columbita (preto) e berilo (verde). E) Visão do núcleo de quartzo (zona IV) do PAP. F) Detalhe dos corpos de substituição observados, principalmente, na zona III do PAP. É possível se observar cristais secundários de mica associados com o feldspato, além da presença de um cristal de berilo (verde).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Durante os trabalhos de campo na área do pegmatito, foram descritos os aspectos texturais e mineralógicos dos diferentes tipos de rochas que afloram na

região (pegmatito e rocha encaixante). Além disso, foi feita uma coleta sistemática de amostras consideradas representativas dos minerais das diferentes zonas do pegmatito.

As composições químicas pontuais, dos cristais de feldspato e de nióbio-tantalatos, foram obtidas com Espectrômetro de Energia Dispersiva (EDS) modelo X-Act, da Oxford Instruments®, acoplado ao Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) Tescan Veja LMU3, do Laboratório de Microanálises do CLGeo-UFS. As condições analíticas adotadas neste estudo foram: tensão de 20 kV e intensidade de feixe de 17 nA, produzindo um feixe de elétrons com diâmetro compreendido entre 280 e 430 nm. O tempo médio de contagem foi de 60 segundos. O *software* utilizado para a obtenção das composições químicas pontuais foi AZtecEnergy®, rotina Quant, da Oxford Instrumentos®, utilizada para conversão das intensidades de energia em percentual de óxidos com fatores de correções automáticas do tipo ZAF.

5. QUÍMICA MINERAL

5.1. Feldspato

Foram estudadas amostras de feldspato alcalino da zona III do PAP, eles ocorrem como grandes cristais (alguns com até 5 m de tamanho) de cor branco, creme e rosa salmão. As análises representativas destes cristais podem ser observadas na Tabela 1. Os elementos SiO_2 e Al_2O_3 mostram pouca variação, MnO , TiO_2 e FeO ocorrem em concentrações muito baixas. Vale a pena destacar os conteúdos médios de Rb_2O (0,19%), BaO (0,04%) e Cs_2O (0,03%).

Os cristais de feldspato analisados correspondem a ortoclásio (Figura 6A) e apresentam-se pertíticos, as lamelas de exsolução possuem composição albítica quase pura com conteúdo da molécula de Ab 98%. Nas amostras estudadas, os valores da razão K/Rb varia de 48,2 a 138,9 (Figura 6B).

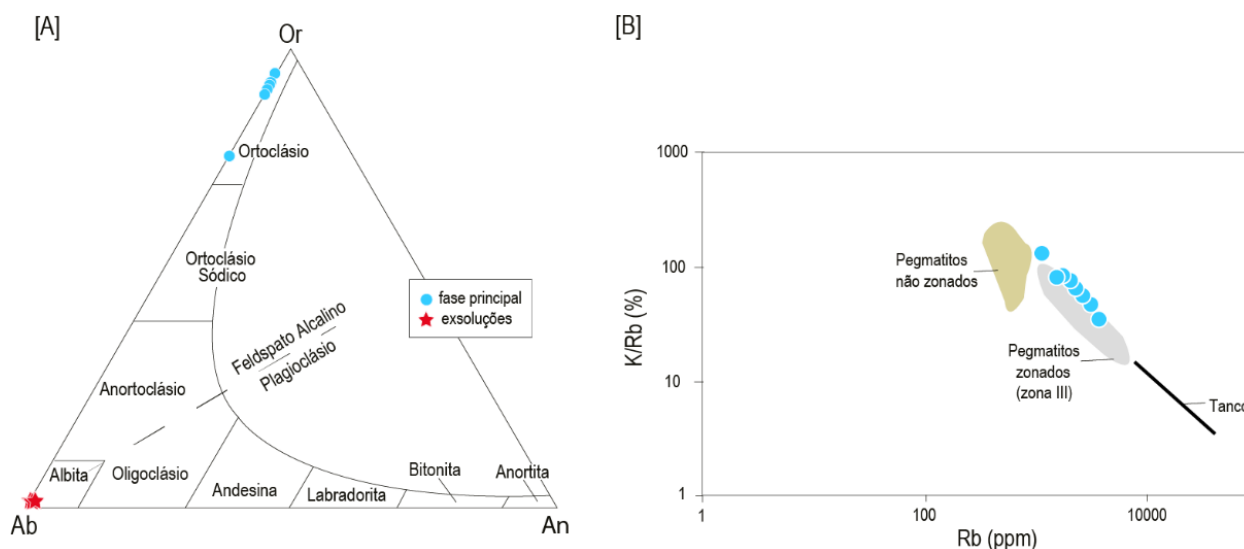


Figura 6. A) Diagrama ternário normativo (Ab-An-Or) dos feldspatos, com os campos segundo Deer et al. (1992). B) Diagrama K/Rb (%) versus Rb(ppm) para o feldspato do PAP. Os campos composicionais de K-feldspatos de pegmatitos não zonados, da zona III de pegmatitos zonados e do pegmatito Tanco (tipo LCT), foram extraídos de Da Silva et al. (1995).

Tabela 1. Análises representativas de cristais de feldspato do PAP.

Amostra Análise	PAP-5 1	PAP-5 2	PAP-5 3	PAP-5 4	PAP-5 6	PAP-5 8	PAP-5 9	PAP-5 10	PAP-5 11	PAP-5 12
SiO ₂	64,62	64,70	64,23	64,34	67,92	64,80	64,51	64,60	64,52	64,39
TiO ₂	-	-	-	0,02	0,02	0,01	0,01	-	-	-
Al ₂ O ₃	19,25	19,31	19,18	19,19	20,18	19,30	19,09	19,14	19,10	19,13
FeO	0,01	0,06	0,03	0,02	0,01	0,05	-	0,01	0,01	0,03
MnO	-	-	0,02	0,01	0,01	-	-	-	0,01	0,02
CaO	0,03	0,03	0,05	0,02	0,16	0,03	0,02	0,01	0,04	-
Na ₂ O	2,62	1,08	1,08	0,61	11,53	2,64	1,03	0,83	0,90	0,82
K ₂ O	13,06	14,82	14,97	15,56	0,15	12,94	15,06	15,28	15,14	15,28
BaO	0,04	-	0,08	0,04	0,01	0,06	0,04	0,01	0,07	0,07
Rb ₂ O	0,36	-	0,31	0,20	-	0,15	0,22	0,11	0,17	0,26
Cs ₂ O	-	-	0,05	-	0,01	0,03	0,02	0,01	0,03	0,01
Total	99,99	100,00	100,00	100,01	100,00	100,01	100,00	100,00	99,99	100,01
Si	2,9657	2,9726	2,9667	2,9705	2,9689	2,9673	2,9745	2,9761	2,9752	2,9725
Al	1,0413	1,0457	1,0442	1,0443	1,0397	1,0417	1,0375	1,0393	1,0381	1,0409
Ti	0,0000	0,0000	0,0000	0,0007	0,0007	0,0003	0,0003	0,0000	0,0000	0,0000
Fe	0,0004	0,0023	0,0012	0,0008	0,0004	0,0019	0,0000	0,0004	0,0004	0,0012
Mn	0,0000	0,0000	0,0008	0,0004	0,0004	0,0000	0,0000	0,0000	0,0004	0,0008
Mg	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Ca	0,0015	0,0015	0,0025	0,0010	0,0075	0,0015	0,0010	0,0005	0,0020	0,0000
Na	0,2331	0,0962	0,0967	0,0546	0,9773	0,2344	0,0921	0,0741	0,0805	0,0734
K	0,7645	0,8685	0,8820	0,9163	0,0084	0,7558	0,8857	0,8979	0,8905	0,8997
Ba	0,0007	0,0000	0,0014	0,0007	0,0002	0,0011	0,0007	0,0002	0,0013	0,0013
Rb	0,0106	0,0000	0,0092	0,0059	0,0000	0,0044	0,0065	0,0033	0,0050	0,0077
Cs	0,0000	0,0000	0,0010	0,0000	0,0002	0,0006	0,0004	0,0002	0,0006	0,0002
Total	5,018	4,987	5,006	4,995	5,003	5,009	4,999	4,992	4,994	4,998
Or	76,52	89,89	89,89	94,28	0,84	76,21	90,49	92,33	91,53	92,46
Ab	23,34	9,96	9,86	5,62	98,40	23,64	9,41	7,62	8,27	7,54
An	0,15	0,15	0,25	0,10	0,75	0,15	0,10	0,05	0,20	0,00

5.2 Nióbio-tantalatos

Os cristais estudados ocorrem frequentemente na zona III do PAP, associados com o berilo e com o feldspato, possuem hábito placoso e alguns centímetros de tamanho (Figura 5D). As amostras correspondem a ferro-

columbita (Figura 7) com razões Ta/(Ta+Nb) e Mn/(Mn+Fe) < 0,5. O conteúdo de Nb₂O₅ varia entre 61,97% e 66,06% (Tabela 2) e valores médios de Ta₂O₅ de 11,79%. Vale a pena destacar a presença de MnO (média 4,88%), Bi₂O₃ (média 0,60%) e Sb₂O₃ (média 0,44%) nas amostras estudadas.

Tabela 2. Análises representativas de cristais de ferro-columbita do PAP.

Amostra	PAP-1	PAP-1	PAP-1	PAP-1	PAP-1	PAP-1	PAP-1	PAP-1	PAP-1	PAP-1
Análise	2	3	4	5	6	7	9	10	11	12
TiO₂	1,10	1,23	1,20	1,06	1,12	1,18	1,05	1,23	1,10	0,62
Na₂O	0,16	0,16	0,13	0,10	0,01	0,06	0,11	0,10	0,06	1,12
FeO	14,16	13,87	14,06	14,57	14,49	14,08	14,49	14,23	13,88	15,57
Y₂O₃	-	-	1,05	-	-	1,03	-	1,18	1,05	3,01
Nb₂O₅	62,97	63,67	61,97	64,56	65,75	64,24	66,06	63,33	63,80	65,78
Al₂O₃	0,04	0,06	0,07	0,06	0,04	0,05	0,05	0,09	-	-
Sb₂O₃	-	-	-	-	-	-	0,09	-	-	1,21
Bi₂O₃	0,57	0,60	0,52	0,54	0,51	-	0,59	0,70	0,59	0,70
Ta₂O₅	12,56	12,01	12,64	12,28	11,59	11,71	11,30	12,15	11,80	8,79
PbO	1,32	1,44	1,34	-	-	-	-	-	1,47	-
MnO	5,18	5,05	5,05	5,17	5,10	5,08	5,18	5,24	5,01	2,41
MgO	0,27	0,26	0,28	0,20	0,33	0,31	0,30	0,23	0,22	0,23
CaO	0,01	0,02	0,05	0,01	0,05	0,05	0,03	0,04	0,02	0,20
SnO₂	0,00	0,05	0,12	-	-	0,01	0,07	-	0,04	-
UO₃	0,27	0,35	0,18	0,24	0,06	0,38	0,59	0,35	0,12	0,35
WO₃	1,38	1,25	1,31	1,22	0,97	1,26	0,59	1,13	0,83	-
Total	99,99	100,02	99,97	100,01	100,02	99,44	100,50	100,00	99,99	99,99
Ti	0,0662	0,0738	0,0724	0,0630	0,0661	0,0702	0,0618	0,0733	0,0660	0,0367
Na	0,0248	0,0247	0,0202	0,0153	0,0015	0,0092	0,0167	0,0154	0,0093	0,1710
Fe²⁺	0,9469	0,9245	0,9424	0,9624	0,9511	0,9315	0,9479	0,9428	0,9262	1,0253
Y	0,0000	0,0000	0,0224	0,0000	0,0000	0,0217	0,0000	0,0249	0,0223	0,0631
Nb	2,2763	2,2941	2,2452	2,3051	2,3330	2,2974	2,3361	2,2682	2,3015	2,3415
Al	0,0038	0,0056	0,0066	0,0056	0,0037	0,0047	0,0046	0,0084	0,0000	0,0000
Sb	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0029	0,0000	0,0000	0,0393
Bi	0,0118	0,0123	0,0107	0,0110	0,0103	0,0000	0,0119	0,0143	0,0121	0,0142
Ta	0,2731	0,2603	0,2755	0,2637	0,2474	0,2519	0,2404	0,2618	0,2560	0,1882
Pb	0,0284	0,0309	0,0289	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0316	0,0000
Mn	0,3508	0,3409	0,3428	0,3458	0,3390	0,3404	0,3432	0,3516	0,3386	0,1607
Mg	0,0322	0,0309	0,0335	0,0235	0,0386	0,0366	0,0350	0,0272	0,0262	0,0270
Ca	0,0009	0,0017	0,0043	0,0008	0,0042	0,0042	0,0025	0,0034	0,0017	0,0169
Sn	0,0000	0,0016	0,0038	0,0000	0,0000	0,0003	0,0022	0,0000	0,0013	0,0000
U	0,0045	0,0059	0,0030	0,0040	0,0010	0,0063	0,0097	0,0058	0,0020	0,0058
W	0,0286	0,0258	0,0272	0,0250	0,0197	0,0258	0,0120	0,0232	0,0172	0,0000
Total	4,0482	4,0330	4,0389	4,0252	4,0157	4,0002	4,0267	4,0203	4,0120	4,0897
Ta/(Ta+Nb)	0,11	0,10	0,11	0,10	0,10	0,10	0,09	0,10	0,10	0,07
Mn/(Mn+Fe)	0,27	0,27	0,27	0,26	0,26	0,27	0,27	0,27	0,27	0,14

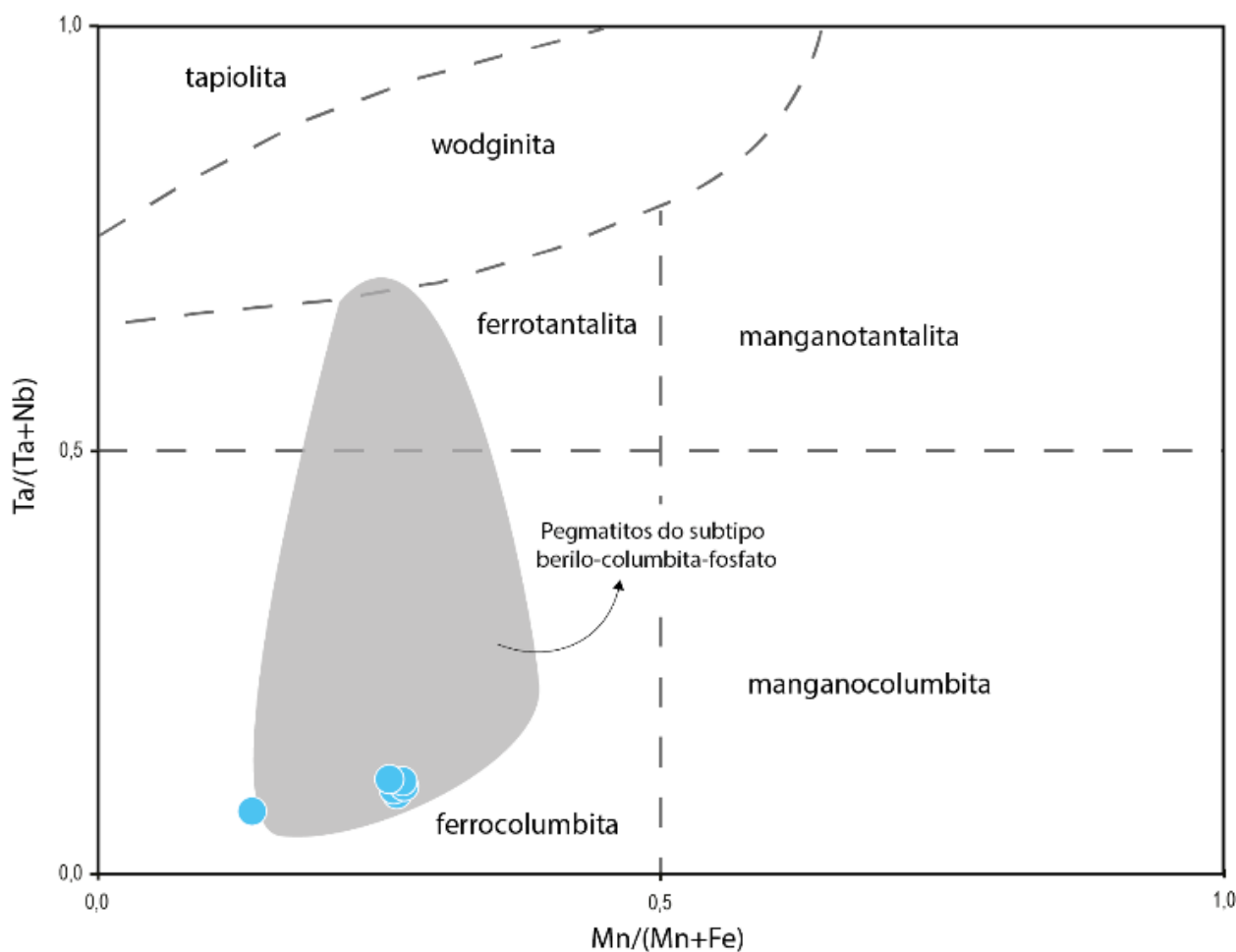


Figura 7. Diagrama binário $Mn/(Mn+Fe)$ versus $Ta/(Ta+Nb)$ com os campos composicionais propostos por Beurlen et al. (2008). O campo composicional dos pegmatitos do subtipo berilo-columbita-fosfato foi definido por Beurlen et al. (2008).

6. DISCUSSÕES CONSIDERAÇÕES FINAIS

O potencial exploratório do PAP, atualmente, é voltado para os minerais industriais. O Pegmatito Alto do Patrimônio é um dos principais fornecedores de matéria prima para indústria ceramista localizada na cidade. A zona III é a zona de maior extensão no pegmatito e seu limite com a zona II é geralmente gradativo, com aumento gradual na frequência dimensão dos cristais. É nessa zona que ocorrem os minerais acessórios de maior interesse econômico, como por exemplo: a ferro-columbita, berilo e apatita, além do feldspato de melhor qualidade.

No diagrama K/Rb versus Cs (Figura 8) observa-se uma boa correlação

negativa, mostrando enriquecimento de Cs ao longo da diferenciação. Os valores obtidos para as amostras do PAP são comparáveis aos observados nos feldspatos dos pegmatitos do Campo de Marilac (MG) que apresentam potencial de aproveitamento nas indústrias ceramista e vidreira. As análises químicas pontuais realizadas nos feldspatos do PAP revelaram baixo teor de FeO (máximo 0,1%), sendo esta uma característica fundamental para a produção de massas cerâmicas de boa qualidade (Aarão, 2015).

O Césio é um elemento extremamente importante que ocorrem em micas e feldspatos, geralmente substituindo o K, sendo usado na avaliação do grau de fracionamento em

pegmatitos, pois tende a se acumular nos estágios finais da cristalização (Soares, 2004). Nas amostras analisadas o conteúdo de Cs varia entre 100 e 500 ppm, teores semelhantes aos de feldspatos provenientes de pegmatitos mineralizados em Li-Be e Li-Cs-Be-Ta (Figura 8 - Gordiyenko, 1971).

A razão K/Rb também é utilizada em feldspatos para avaliar o grau de fracionamento de pegmatitos (Černý et al., 1985; Soares, 2004), tendo em vista que o Rb tende a se acumular nos estágios mais tardios de cristalização. O conteúdo de Rb nos feldspatos do PAP é sempre inferior a 3100 ppm e a razão K/Rb varia entre 48,2 e 138,9. Estes valores são semelhantes

aos de feldspato da zona III dos pegmatitos zonados da PPB analisados por Da Silva et al. (1995) (Figura 6B). Fernandes et al., (2022) consideram que estes pegmatitos apresentam baixo potencial para hospedar minerais de lítio.

Na PPB valores elevados de Rb (entre 11294 ppm e 13388 ppm) foram obtidos por Soares (2004) nos feldspatos do Pegmatito Quintos, estes teores são bem próximos aos observados nos feldspatos do Pegmatito Tanco, um pegmatito altamente fracionado que hospeda depósitos de Li, Cs e Ta e outros elementos raros (p. ex. Stilling et al., 2006).

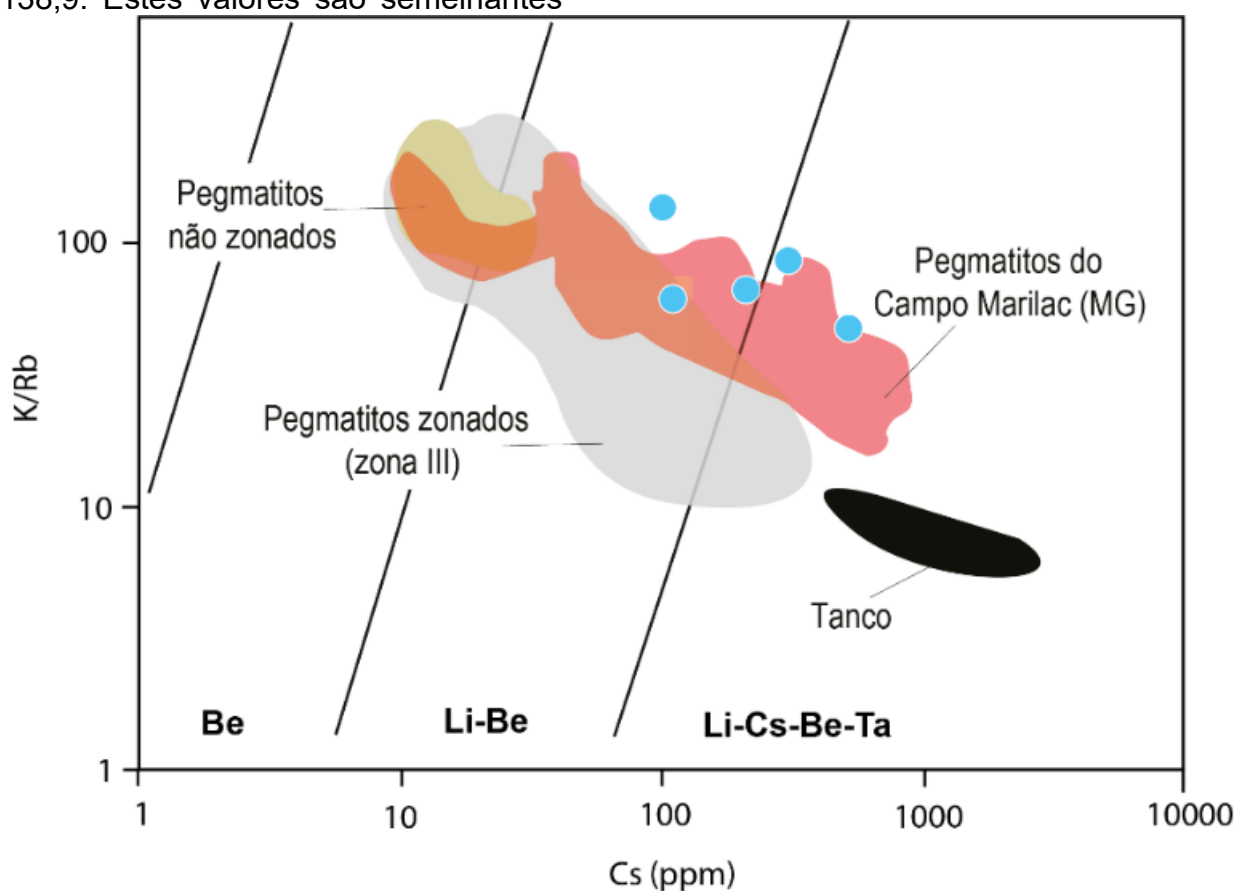


Figura 8. Gráfico K/Rb versus Cs do feldspato do PAP. Campos composicionais de K-feldspatos de pegmatitos não zonados e zonados (zona III) são de Da Silva et al. (1995), enquanto os dados do pegmatito Tanco foram extraídos de Beurlen et al. (2014). Limites entre pegmatitos férteis segundo Gordiyenko (1971). Os dados dos feldspatos do Campo de Marilac foram extraídos de Gandini (1999).

O estudo da química dos nióbio-tantalatos, do mesmo modo que dos

feldspatos, foram utilizados visando avaliar o nível de fracionamento do PAP.

Nesses minerais geralmente se observa o crescimento na razão Ta/(Ta+Nb) e uma diminuição na relação Mn/(Mn+Fe) no decorrer da cristalização dos pegmatitos (Grice et al., 1972). Os minerais da série tantalita-columbita são dominantes em pegmatitos moderadamente fracionados, sendo bastante comuns em pegmatitos de elementos raros, particularmente os dos subtipos berilo-columbita, espodumênio e lepidolita (Černý, 1989).

Nos cristais de ferro-columbita analisados a razão Ta/(Ta+Nb) é sempre inferior a 0,11, comparável com os valores definidos por Beurlen et al. (2008) para os pegmatitos do subtipo berilo-columbita-fosfato da PPB (Figura 7).

Tomando como base os critérios mineraloquímicos propostos por Černý & Ercit (2005), o PAP pode ser enquadrado como pertencente à família LCT, ou seja, pegmatitos ricos em minerais de lítio, cério e tântalo, da classe dos pegmatitos ricos em elementos raros (ELR), subclasse ELR-Li, tipo berilo, subtipo berilo-columbita-fosfato.

Além de Li, Cs e Ta, os pegmatitos da família LCT são enriquecidos em Be, B, F, P, Mn, Ga, Rb, Nb, Sn e Hf. Normalmente estão associados a magmas parentais peraluminosos originados a partir da anatexia de rochas metassedimentares ou pela baixa taxa de fusão parcial de rochas ígneas e/ou meta-ígneas (Černý & Ercit, 2005).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFPB) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelas bolsas concedidas e pelo financiamento do projeto de pesquisa através do Programa Institucional INTERCONECTA.

REFERÊNCIAS

- Aarão, G. M. 2015. Caracterização mineralógica e tecnológica de feldspatos piroexpansíveis de pegmatitos do distrito de Conselheiro Pena, MG. 2015. 132 f. Dissertação (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- Almeida, F. D., Hasui, Y., Brito Neves, B. D., Fuck, R. A. 1977. Províncias estruturais brasileiras. Simpósio de Geologia do Nordeste, 8, 363-391.
- Araújo, M., Alves da Silva, F. C., Jardim De Sá, E. F. 2001. Pegmatite Emplacement in the Serido Belt, Northeastern Brazil: Late Stage Kinematics of the Brasiliano Orogen. *Gondwana Research*, v. 4, n. 1, p.75-85. [https://doi.org/10.1016/S1342-937X\(05\)70656-0](https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)70656-0).
- Araújo, M.N.C., Vasconcelos, P.M., Silva, F.C.A., Jardim de Sá, E.F., SA, J.M. 2005. ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology of gold mineralization in Brasiliano strike-slip shear zones in the Borborema Province, NE Brazil. *J. S. Am. Earth Sci.* 19, 445-460. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2005.06.009>.
- Araújo, C. E., Costa, F. G., Pinéo, T. R., Cavalcante, J. C., Moura, C. A. 2012. Geochemistry and ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb zircon ages of granitoids from the southern portion of the Tamboril–Santa Quitéria granitic–migmatitic complex, Ceará Central Domain, Borborema Province (NE Brazil). *Journal of South American Earth Sciences*. 33, 21-33. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2011.07.009>.
- Araújo, C. E. G., Rubatto, D., Hermann, J., Cordani, U. G., Caby, R., Basei, M. A. 2014. Ediacaran 2,500-km-long synchronous deep continental subduction in the West Gondwana

- Orogen. *Nature communications*, 5, 51-98.
<https://doi.org/10.1038/ncomms6198>.
- Archanjo, C.J., Viegas, L.G., Hollanda, M.H.B.M., Souza, L.C., Liu, D. 2013. Timing of the HT/LP transpression in the Neoproterozoic Seridó Belt (Borborema Province, Brazil): Constraints from U-Pb (SHRIMP) geochronology and implications for the connections between NE Brazil and West Africa. *Gondwana Research*, 23, 701-714.
<https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.05.005>.
- Baumgartner, R., Romer, R.L., Moritz, R., Sallet, R., Chiaradia, M., 2006. Columbite-tantalite-bearing granitic pegmatites from the Serido Belt, northeastern Brazil: genetic constraints from U-Pb dating and Pb isotopes. *Can. Mineral.* 44, 69-86.
<https://doi.org/10.2113/gscanmin.44.1.69>.
- Beurlen, H., Da Silva, M.R.R., De Castro, C., 2001. Fluid inclusion microthermometry in Be-Ta-(Li-Sn)-bearing pegmatites from the Borborema Province. *Chem. Geol.* 173, 107-123.
[https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(00\)00270-9](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(00)00270-9).
- Beurlen, H., Da Silva, M.R.R., Thomas, R., Soares, D.R., Olivier, P. 2008. Na-Ta-(Ti-Sn)-oxide mineral chemistry as tracers of rare element granitic pegmatite fractionation in the Borborema Province, northeastern Brazil. *Mineral. Deposita.* 43, 207-228.
<https://doi.org/10.1007/s00126-007-0152-4>.
- Beurlen, H.; Thomas, R.; Silva, M. R. R.; Müller, A.; Rhede, D.; Soares, D. R. 2014. Perspectives for Li- and Ta-mineralization in the Borborema Pegmatite Province, NE-Brazil: a review. *Journal of South American Earth Sciences.* 56, 110-127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2014.08.007>.
- Cameron, E. N., Jahns, R. H., McNair, A. H., Page, L. R. 1949. Internal structure of granitic pegmatites. *Economic Geology (Monography)*. 115p.
- Černý, P. 1989. Characteristics of pegmatite deposits of tantalum. In: *Lanthanides, Tantalum and Niobium: Mineralogy, Geochemistry, Characteristics of Primary Ore Deposits, Prospecting, Processing and Applications Proceedings of a workshop in Berlin, November 1986*. Springer Berlin Heidelberg, p. 195-239.
- Černý, P., Meintzer, R. E., Anderson, A. J. 1985. Extreme fractionation in rare-element granitic pegmatites; selected examples of data and mechanisms. *The Canadian Mineralogist.* 23, 381-421.
- Černý, P., Ercit T. S. 2005. Classification of granitic pegmatites revisited. *The Canadian Mineralogist*, 43: 2005-2026.
<https://doi.org/10.2113/gscanmin.43.6.2005>.
- Da Silva, M. R. R. 1993. Petrographical and Geochemical Investigations of Pegmatites in the Borborema Pegmatitic Province of Northeastern Brasil. 1993. Ph.D. thesis. Ludwig Maximilian Universersitat München, Germany.
- Da Silva, M. R. R.; Höll, R.; Beurlen, H. 1995. Borborema Pegmatitic Province: geological and geochemical characteristics. *Journal of South American Earth Sciences.* 8, 355-364.
[https://doi.org/10.1016/0895-9811\(95\)00019-C](https://doi.org/10.1016/0895-9811(95)00019-C).
- Deer, W. A., Howie, R. A., Zussman, J. 1992. An introduction to the rock forming minerals ELBS second edition. 696p.
- Duuring, P. Rare-element pegmatites: a mineral systems analysis: Geological Survey of Western Australia, Record

- 2020/7, 6p, 2020.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35634.84166>.
- Fernandes, P. R., Cabral Neto, I., Silveira, F. V., Paes, V. J. D. C. 2022. Avaliação do potencial de lítio no Brasil-área: Província Pegmatítica da Borborema.
- Ferreira C.A., Santos E.J., 1998. Programa levantamentos Geológicos básicos do Brasil- Caicó (Folha SB.24-Z-B) – Escala 1:250.000 – Geologia e metalogenese. Brasília, CPRM. 70p
- Gandini, A. L. 1999. Aspectos da mineralogia, geoquímica, gêneses e potencialidade econômica do Campo Pegmatítico de Marilac, Minas Gerais. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- Gordiyenko, V. V. 1971. Concentrations of Li, Rb, and Cs in potash feldspar and muscovite as criteria for assessing the rare metal mineralization in granite pegmatites. *International Geology Review*. 13, 134-142.
<https://doi.org/10.1080/00206817109475411>.
- Grice, J. D.; Cerny, P.; Ferguson, R. B. 1972. The Tanco pegmatite at Bernic Lake, Manitoba; II, Wodginite, tantalite, pseudo-ixiolite and related minerals. *The Canadian Mineralogist*. 11, 609-642.
- 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*. 258, 186–207.
<https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.12.009>.
- Hollanda, M.H.B.M., Archanjo, C.J., Souza Neto, J.A., Sallet, R.G., 2019. Relações cronológicas entre eventos magmáticos e mineralizações na Faixa Serido. *Simp. Geol. Nordeste* 313.
- Jardim De Sá, E. F. 1994. A Faixa Seridó (Província Borborema, ne do Brasil) e o seu significado geodinâmico na cadeia Brasileira/Pan-africana. Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, Brasília, tese de Doutorado, 804 p.
- London, D. 1996. Granitic pegmatites. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh-Earth Sciences*. 87, 305-319.
<https://doi.org/doi:10.1017/S0263593300006702>.
- London, D. 2018. Ore-forming processes within granitic pegmatites. *Ore Geology Reviews*. 101, 349-383.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.04.020>.
- Medeiros, V. C. Cavalcante, R., Cunha, A. L. C., Dantas, A. R., Costa, A. P., Brito, A. A., Silva, M. A. 2017. O furo estratigráfico de Riacho Fechado (Currais Novos/RN), domínio Rio Piranhas-Seridó (província Borborema, NE Brasil): procedimentos e resultados. *Estudos Geológicos*. 27, 3-44.
<https://doi.org/10.18190/1980-8208/estudosgeologicos.v27n3p1-40>.
- Nascimento, R. S. C. 2002. Quimeoestratigrafia de $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$ e $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ aplicada à mármores da faixa seridó (Ne do Brasil): implicações geotectônicas e paleoambientais. 2002. 122 f. pós-graduação - Curso de Geologia, Centro Tecnólogo, Universidade Federal do Pernambuco, Recife.
- Neves, S. P. 2003. Proterozoic history of the Borborema province (NE Brazil): Correlations with neighboring cratons and Pan-African belts and implications for the evolution of western Gondwana. *Tectonics*. 22, 1031-1045.
<https://doi.org/10.1029/2001TC001352>.

- Neves, S. P. 2015. Constraints from zircon geochronology on the tectonic evolution of the Borborema Province (NE Brazil): widespread intracontinental Neoproterozoic reworking of a Paleoproterozoic accretionary orogen. *Journal of South American Earth Sciences*, 58, 150-164. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2014.08.004>.
- Oliveira, E. P., Windley, B. F., Araújo, M. N. 2010. The Neoproterozoic Sergipano orogenic belt, NE Brazil: a complete plate tectonic cycle in western Gondwana. *Precambrian Research*, 181, 64-84. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2010.05.014>.
- Palinkaš, S.S., Palinkaš, L., Neubauer, F., Scholz, R., Borojević Šoštarić, S., Bermanec, V. 2019. Formation conditions and $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ age of the gem-bearing boqueirao granitic pegmatite, Parelhas, Rio Grande do Norte, Brazil. *Minerals*, 9, 233. <https://doi.org/10.3390/min9040233>.
- Pitombeira, J. P. A., Da Silva Amaral, W., Uchôa Filho, E. C., Fuck, R. A., Dantas, E. L., Parente, C. V., Costa, F. G., Veríssimo, C. U. V. 2017. Vestiges of a continental margin ophiolite type in the Novo Oriente region, Borborema Province, NE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 73, 78-99. <https://doi.org/10.1590/2317-4889202020190122>.
- Sales, M. C. C. 2020. Considerações sobre os granitos pegmatíticos da Província Pegmatítica do Seridó: mapeamento geológico e geoquímica. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- SILva, M. R., Dantas, J.R. A. 1997. Província Pegmatítica da Borborema – Seridó, Paraíba e Rio Grande do Norte. In: DNPM, Principais Depósitos Minerais do Brasil, vl. IVB. p. 441, 467.
- Soares, D. R. 2004. Contribuição à petrologia de pegmatitos mineralizados em elementos raros e elbaítas gemológicas da Província Pegmatítica da Borborema, Nordeste do Brasil.
- Stilling, A.; Černý, P.; Vanstone, P. J. 2006. The Tanco pegmatite at Bernic Lake, Manitoba. XVI. Zonal and bulk compositions and their petrogenetic significance. *The Canadian Mineralogist*, 44, 599-623. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.44.3.599>.
- Souza, Z. S., Martin, H., Peucat, J. J., Jardim De Sá, E. F., Macedo, M. H. D. F. 2007. Calc-alkaline magmatism at the archaean–proterozoic transition: the Caicó complex basement (NE Brazil). *Journal of Petrology*, 48, 2149-2185. <https://doi.org/10.1093/petrology/egm055>.
- Van Schmus, W. R., Brito Neves, B. B., Williams, I. S., Hackspacher, P. C., Fetter, A. H., Dantas, E. L., 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, 287-327. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(03\)00197-9](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(03)00197-9).
- Van Schmus, W. R., Kozuch, M., Brito Neves, B. B. 2011. Precambrian history of the Transversal Zone of the Borborema Province, NE Brazil: insights from Sm–Nd and U–Pb geochronology. *Journal of South American Earth Sciences*, 31, p. 227-252. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2011.02.010>.