



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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 526

ESTUDO PETROGRÁFICO E ISOTÓPICO (Pb-Pb, U-Pb e Sm-Nd) DE ROCHAS METAVULCÂNICAS, MINERALIZAÇÕES AURÍFERAS E ROCHAS GRANITÓIDES RELACIONADAS AO *GREENSTONE BELT* TRÊS PALMEIRAS, VOLTA GRANDE DO XINGU, DOMÍNIO BACAJÁ, PARÁ

Dissertação apresentada por:

LUIZ CARLOS FERREIRA DE CRISTO

Orientador: Prof. Dr. Moacir José Buenano Macambira (UFPA)

**BELÉM
2018**

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

Cristo, Luiz Carlos Ferreira de, 1983-

Estudo petrográfico e isotópico (Pb-Pb, U-Pb e Sm-Nd) de rochas metavulcânicas, mineralizações auríferas e rochas granitóides relacionadas ao *Greenstone Belt* Três Palmeiras, Volta Grande do Xingu, Domínio Bacajá, Pará / Luiz Carlos Ferreira de Cristo. – 2018

xiii, 52 f. : il. ; 53 cm

Inclui bibliografias

Orientador: Moacir José Buenano Macambira

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Belém, 2018.

1. Geologia estratigráfica - Proterozóico. 2. Petrografia - Pará. 3. Chumbo - Isótopos - Pará. 4. Datação samário-neodímio - Pará. 5. Minérios de ouro - Pará. I. Título.

CDD 22. ed.: 551.715

Elaborada por
Hélio Braga Martins
CRB-2/698



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

ESTUDO PETROGRÁFICO E ISOTÓPICO (Pb-Pb, U-Pb e Sm-Nd) DE ROCHAS METAVULCÂNICAS, MINERALIZAÇÕES AURÍFERAS E ROCHAS GRANITÓIDES RELACIONADAS AO *GREENSTONE BELT* TRÊS PALMEIRAS, VOLTA GRANDE DO XINGU, DOMÍNIO BACAJÁ, PARÁ

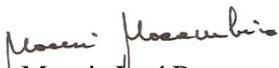
Dissertação apresentada por

LUIZ CARLOS FERREIRA DE CRISTO

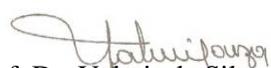
Como requisito parcial à obtenção de Grau de Mestre em Ciências na Área de GEOQUÍMICA E PETROLOGIA.

Data de Aprovação: 19 / 04 / 2018

Banca Examinadora:


Prof. Dr. Moacir José Buenano Macambira
Orientador - UFPA


Prof. Dr. Evandro Luiz Klein
Membro - UFPA


Prof. Dr. Valmir da Silva Souza
Membro - UNB

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à empresa Belo Sun Mining Corp. pela permissão e concessão das amostras utilizadas na elaboração deste trabalho.

Aos geólogos Kleber Souza e Mauricio Felmer pelo apoio de campo, informações geológicas e amostras cedidas.

Ao Prof. Dr. Moacir Macambira pela orientação dessa dissertação.

Ao Programa de Pós Graduação em Geologia e Geoquímica (PPGG) da Universidade Federal do Pará (UFPA), pela oportunidade de realização deste trabalho.

Ao Laboratório de Geologia Isotópica (Pará-Iso) do Instituto de Geociencias da Universidade Federal (UFPA), na pessoa do Prof. Dr. Marco Antônio Galarza.

À equipe de técnicos do PARÁ-ISO: Jefferson Souza, Maria Izanete e Paulo Bahia.

Aos bolsistas Bruna Nogueira e Juvenal Neto pela ajuda nas atividades analíticas.

Ao Instituto GEOCIAM, pelo suporte financeiro prestado na etapa de campo.

Ao Prof. MSc. Ronaldo Lima Lemos pelas discussões a respeito da petrografia.

Ao Prof. Dr. Cláudio Nery Lamarão, à MSc. Gisele Marques e às técnicas Paula e Viviam do Laboratório de Microanálises do IG/UFPA pela ajuda na obtenção de imagens de zircão por CL.

À Prof. MSc. Vania Maria Fernandes Barriga.

Aos amigos Pilar Lobo, Cleide Lobo, Otoniel Ramos, Karen Carmona, Daniele Lima, Daniela Soares, Antonio Franciso Jr, Samia Viana e Flavio Semblano.

RESUMO

O presente estudo foi baseado em estudos de petrografia, geoquímica isotópica e geocronologia, tendo como objetivo discutir a possível relação genética e temporal entre a formação das mineralizações auríferas, suas hospedeiras e as sequências metavulcânicas que formam o *Greenstone Belt* Três Palmeiras, noroeste do Domínio Bacajá, estado do Pará. Descrições de amostras de campo e de testemunhos de sondagem permitiram a classificação dos litotipos que ocorrem na área de estudo: (1) uma sequência de metabasaltos, xistos máficos e restritos corpos de metagabros (Anfibolito Itatá); (2) uma sequência de meta-andesitos porfiríticos e rochas metavulcanoclásticas (Micaxisto Bacajá). Essas rochas afloram às proximidades de rio Xingu e formam corpos alongados, com orientação WNW-ESE, que registram os efeitos da deformação predominante na área. Essas sequências são seccionadas por corpos de dioritos e granodioritos, que constituem a unidade Granodiorito Oca. Os depósitos são formados por veios de quartzo mineralizados em pirita, calcopirita e ouro, que se alojam nos granitoides intrusivos, sob a forma de microinclusões nesses sulfetos. Os dados isotópicos Pb-Pb por lixiviação obtidos em amostras de pirita de quartzo-diorito e meta-andesito, não associados aos depósitos de ouro, forneceram idades de 2146 ± 19 Ma e 2353 ± 43 Ma, respectivamente, enquanto o método de evaporação de Pb em zircão forneceu idades de 2417 ± 4 Ma (MSDW=0,64) para uma amostra de meta-andesito e 2410 ± 4 Ma (MSWD=4,3) para uma amostra de rocha metavulcanoclástica. Essas idades são similares àquela fornecida pela isócrona Sm-Nd (2465 ± 17 Ma) para metabasaltos e meta-andesitos. Finalmente, o método de evaporação de Pb em partículas de ouro, extraídas de corpos mineralizados, alojados em granodioritos e quartzo-dioritos, após diversas tentativas de gerar uma isócrona com baixo desvio, forneceu a idade de 2189 ± 11 Ma (MSWD=31). Essas idades indicam que a mineralização tenha se formado durante o Riáciano. Com base nas idades já determinadas para as rochas graníticas presentes na área, é provável que a mineralização tenha relação genética e temporal com essas rochas. Os dados isotópicos sugerem, até o momento, que as sequências metavulcânicas do *Greenstone Belt* Três Palmeiras não apresentam relação genética com as mineralizações auríferas. As idades-modelo NdT_{DM} de 2,49 a 2,39 Ga, obtidas neste trabalho para amostras de meta-andesitos e metadacitos do GBTP e seus $\epsilon_{Nd(T)}$ (+2,03 e +3,33) sugerem que essas rochas se originaram do manto no Paleoproterozoico, seguido de rápida residência crustal.

Palavras-chave: Paleoproterozoico. Isótopos de Pb. U-Pb e Sm-Nd. Domínio Bacajá

ABSTRACT

The present study was based on studies of petrography, isotopic geochemistry and geochronology, aiming to discuss the possible genetic and temporal relationship between the formation of auriferous mineralization, its host and the metavolcanic sequences that form the Três Palmeiras *Greenstone Belt*. Descriptions of outcrop and drilling holes samples allowed the definition of the following lithotypes in the study area: (1) a sequence of metabasalts, mafic schists and restricted metagabbro bodies (Anphibolite Itatá); (2) a sequence of porphyritic metandesites and metavolcanoclastic rocks (Micashist Bacaja). These rocks crop-out nearby of the Xingu River, as elongated bodies, with WNW-ESE direction and record the effects of the predominant deformation in the area. These sequences are sectioned by bodies of diorites and granodiorites, with 2160 ± 3 Ma in age, comprising Oca Granodiorite. The gold deposits are composed of mineralized quartz veins in pyrite, chalcopyrite and gold, housed in the bodies of quartz-diorites and granodiorites, in the form of microinclusions in these sulphides. Pb-Pb isotopic data, obtained on pyrite from quartz-diorite and metandesite samples by Pb-leaching technique, provided ages of 2146 ± 19 Ma and 2353 ± 43 Ma, respectively, whereas the Pb-evaporation method on zircon provided ages of 2417 ± 4 Ma (MSDW = 0.64) for a meta-andesite sample and 2410 ± 4.3 Ma (MSWD = 4.3) for a sample of metavolcanoclastic rock occurring in the same area. These ages are similar to the age furnished by a whole-rock Sm-Nd isochron (2465 ± 17 Ma). Finally, the Pb-evaporation method on gold particles provides the age of 2189 ± 11 Ma (MSWD = 31). These ages indicate that mineralization has formed during the Riacian period. Based on the ages already determined for the granitic rocks present in the area, it is probable that the mineralization has a genetic and temporal relationship with these rocks. Isotopic data discard, so far, any possible genetic relationship as greenstone metavolcanic sequences. Nd_{DM} model ages of 2.49 to 2.39 Ga obtained in this work for metandesite and metadacite samples from TPGb and its $\epsilon Nd_{(T)}$ (+2.03 and +3.33) suggest that these rocks originated from the mantle in the Paleoproterozoic, followed by a rapid crustal residence.

Key words: Paleoproterozoic. Pb. U-Pb and Sm-Nd isotopes. Bacajá Domain.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

PARTE 1

- Figura 1- Mapa de localização do Projeto de Ouro Volta Grande.....2
- Figura 2- Províncias geocronológicas do Cráton Amazônico.3
- Figura 3- Mapa Geológico da porção centro-leste do Domínio Bacajá.6
- Figura 4- Seção transversal do alvo Grotá Seca, exemplificando o modelo de mineralização na área do Projeto Volta Grande. O ouro concentra-se em corpos de quartzodiorito e granodiorito, preferencialmente em porções alteradas hidrotermalmente. As áreas mineralizadas ocorrem próximas ao contato entre granitoides e as rochas suprecrustais que formam o *Greenstone Belt* Três Palmeiras, onde são observadas porções de granitoides cisalhados e silificados.....8
- Figura 5- Mapa geológico da área do Projeto Volta Grande com localização dos corpos granitoides hospedeiros de mineralizações, a partir da interpretação de dados aerogeofísicos. A mineralização está associada ao contato entre as rochas graníticas e as sequências metavulcanossedimentares que formam o greenstone belt. Em destaque, os alvos Bloco Norte e Sul.....10
- Figura 6- Mineralização em diorito porfirítico, Alvo Ouro Verde. A mineralização ocorre, preferencialmente, em veios de quartzo com calcita e/ou associado à arsenopirita e pirita. A). Diorito porfirítico silicificado, cortado por veios de quartzo com carbonato e sulfetos. B). No detalhe, porção mineralizada. C). Granodiorito fino, moderadamente alterado e cloritizado. D). No detalhe, porção mineralizada. Nos dois casos, o ouro ocorre associado a sulfetos (pirita e arsenopirita, principalmente).....10

- Figura 7- Preparação de amostras para as metodologias de evaporação de Pb e U-Pb em cristais de zircão. Na parte superior da figura, são mostrados trituradores de mandíbula e moinho de disco, equipamentos de trituração e pulverização utilizados na Oficina de Preparação de Amostras (OPA). Na parte inferior da figura, são mostrados peneiras de nylon de diversas aberturas, separador magnético Isodynamic Frantz e lupa binocular, equipamentos da Sala de Separação de Minerais do Pará-Iso. A parte final da preparação consistiu na fixação de cristais de zircão em pastilha de resina epoxy (metodologia U-Pb) e em lâminas de vidro para posterior deposição em filamentos de Re (evaporação de Pb).....16
- Figura 8- Vista do espectrômetro de massa ICP-MS-MC Thermo-Finnigan, modelo Neptune (A) e do sistema de *laser ablation* (LA) CETAC, modelo LSX-213 G2, à esquerda (B), Laboratório de Geologia Isotópica (Pará-Iso).....17

PARTE 2

- Figura 1- Províncias e domínios tectônicos do estado do Pará. Em destaque, o *Greenstone Belt* Três Palmeiras.....27
- Figura 2- Mapa geológico da área de estudo, com indicação da área do Projeto de Ouro Volta Grande. O mapa mostra os blocos Norte (parte superior, a esquerda) e Sul (parte inferior, ao centro) e as metodologias aplicadas aos litotipos estudados.....28
- Figura 3- Fotomicrografias de rochas do *Greenstone Belt* Três Palmeiras. A) Anfibolito (metabasalto) exibindo foliação contínua, de caráter milonítico, desenvolve microlaminações composicionais de faixas irregulares de plagioclásio (Pl) e hornblenda (Hbl). B) Metagabro caracterizado pela textura intergranular subofítica grossa. Esse litotipo é composto, essencialmente, por cristais de hornblenda (Hb) e plagioclásio (Pl).....30
- Figura 4- Fotomicrografias de xistos máficos do *Greenstone Belt* Três Palmeiras. (A) Arranjo microtextural milionítico ressaltado pelos cristais oclares de hornblenda (Hb), contornados por cristais de plagioclásio (Pl), em um arranjo anastomosado. (B) Porfiroclastos de hornblenda envoltos por matriz nematoblástica definida pela orientação de cristais menores de anfibólios cálcicos (hornblenda e actinolita).....30

- Figura 5- Fotomicrografias exibindo as principais texturas de meta-andesito porfirítico do *Greenstone Belt* Três Palmeiras. A) Textura glomeroporfírica de cristais de plagioclásio (Pl); B) Textura traquítica incipiente, marcada pela orientação de plagioclásio e micas; C) Alteração hidrotermal em plagioclásio; D) Fenocristais de plagioclásio com zoneamento concêntrico.....31
- Figura 6- Fotomicrografias de rochas metavulcanoclásticas do *Greenstone Belt* Três Palmeiras. Rocha intensamente deformada com porfiroclastos de plagioclásio amendoados, com quartzo subordinado e bandas de biotita e hornblenda. A) Luz Natural; B) Luz Polarizada.....32
- Figura 7- Fotomicrografias do granodiorito intrusivo no *Greenstone Belt* Três Palmeiras. A) Fenocristais semi-ovalados de plagioclásio (Pl) imersos em matriz granular fina; B) Foliação milonítica, marcada por lamelas de biotita (Bt) e cristais anédricos de quartzo (Qtz) em arranjo granolepidoblástico; C) Cristal subédrico de plagioclásio com indícios de zoneamento normal e composicional; D) agregados de biotita...33
- Figura 8- Fotomicrografias de amostras de quartzo-diorito intrusivo no *Greenstone Belt* Três Palmeiras. A) Arranjo geral do litotipo com forte foliação milonítica e porfiroclastos de plagioclásio e microclina. B) Profiroclastos deformados de plagioclásio (Andesina), com maclamento albita-carlsbad. C) Leitões de quartzo recristalizado, formando sombra de deformação próxima a porfiroclastos de plagioclásio. D) Lamelas de biotita bordejando porfiroclastos de plagioclásio. Plagioclásio (Pl); Quartzo (Qtz); Microclina (Mc); Biotita (Bt); Clorita (Chl).....34
- Figura 9- Imagem em MEV-EDS de amostras dos alvos Grota Seca e Ouro Verde (Bloco Norte) e Itatá e Pequi (Bloco Sul), respectivamente de A a D, do Projeto Volta Grande. (A) Ocorrência de ouro (Au) incluso em cristais de pirita (Py) e quartzo (Qtz); (B), em cristais de pirita, associado a partículas de prata (Ag); (C) no contato entre quartzo e pirita; (D) e incluso em cristal de quartzo.....35
- Figura 10- Diagrama $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ vs. $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ de rochas metavulcânicas do *Greenstone Belt* Três Palmeiras.....36

- Figura 11- Imagens em catodoluminescência que mostram as características morfológicas e texturais dos zircões analisados da amostra de rocha vulcanoclástica (PVG-08), *Greenstone Belt* Três Palmeiras. Os círculos brancos representam os pontos analisados. Em amarelo, as idades calculadas para cada cristal em Ma. Tamanho médio dos cristais de zircão 125 μm38
- Figura 12- Diagrama Concórdia U-Pb, para a amostra de rocha vulcanoclástica (PVG-08) do *Greenstone Belt* Três Palmeiras.....38
- Figura 13- Diagramas de idades vs. cristais de zircão, obtidos pelo método Pb-Pb por evaporação das amostras de (A) meta-andesito porfirítico (PVG-05) e de (B) rocha metavulcanoclástica (PVG-08).....40
- Figura 14- Diagrama $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ para amostras de rochas vulcânicas de *Greenstone Belt* Três Palmeiras. As curvas de ambientes tectônicos, segundo o modelo Plumbotectônica (Zartman & Doe 1981), estão representadas no diagrama. Os losangos em vermelho representam os pontos cujos dados analíticos precisaram ser desconsiderados para os cálculos das idades, uma vez que apresentavam idades incoerentes com a geologia local e elevados desvio e MSWD.....42
- Figura 15- Diagrama $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ para lixiviados de pirita contida em: A) Quartzo-diorito (GS-02) intrusivo no *Greenstone Belt* Três Palmeiras. B) Meta-andesito (PVG-06) da sequência *Greenstone Belt* Três Palmeiras. Os triângulos em vermelho representam os pontos desconsiderados para os cálculos das idades.....43
- Figura 16- Diagrama isocrônico Pb/Pb para amostras de ouro analisadas pelo método de evaporação de Pb. Inicialmente, os pontos referentes as amostras de ouro não definem uma isócrona. Por outro lado, as amostras GS-II/02, OV-II/04, IT-I/05 e IT-I/11 (em negrito) definem um bom alinhamento e fornecem uma idade compatível com as rochas graníticas presentes na área.....44

LISTA DE TABELAS

PARTE 2

- Tabela 1- Dados isotópicos Sm-Nd para as amostras de rochas vulcânicas do *Greenstone Belt* Três Palmeiras. As amostras em cinza apresentaram forte fracionamento isotópico dos elementos.....36
- Tabela 2- Dados isotópicos U-Pb em cristais de zircão da amostra de metatufo vulcânico (rocha vulcanoclástica) VG-08 do *Greenstone Belt* Três Palmeiras. Em destaque os cristais cujas idades foram usadas para a construção do diagrama concórdia.....37
- Tabela 3- Resultados analíticos Pb-Pb dos cristais de zircão da amostra de meta-andesito porfirítico (PVG-05) da área do Projeto Volta Grande. As idades em negrito foram consideradas no cálculo da idade media.....39
- Tabela 4- Resultados analíticos Pb-Pb dos cristais de zircão da amostra de rocha vulcanoclástica (PVG-08), da área do Projeto Volta Grande. As idades em negrito foram consideradas no cálculo da idade media.....40
- Tabela 5- Análises isotópicas Pb-Pb (rocha total) para amostras de rochas metavulcânicas da sequência greenstone belt, lixiviados de piratas de quartzo-diorito (GS-02) e meta-andesito (PVG06) e partículas de Au de quatro depósitos na área do Projeto de Ouro Volta Grande. As amostras em cinza foram desconsideradas para os cálculos de idades em seus respectivos gráficos, por apresentarem erros muito altos ou em desalinhamento com as demais amostras do respectivo conjunto.....41

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	vii
LISTA DE TABELAS	xi
PARTE 1 APRESENTAÇÃO	1
1.1 LOCALIZAÇÃO.....	2
1.2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL.....	2
1.2.1 Província Maroni-Itacaiúnas	4
1.2.2 Domínio Bacajá	4
1.2.3 Greenstone Belt Três Palmeiras	7
1.2.3.1 Mineralizações auríferas na área do Greenstone Belt Três Palmeiras.....	7
1.2.3.2 Projeto de Ouro Volta Grande.....	9
1.3 PROBLEMÁTICA.....	11
1.4 OBJETIVOS.....	11
1.4.1 Objetivo Geral	11
1.4.2 Objetivos Específicos	12
1.5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	12
1.5.1 Pesquisa Bibliográfica	12
1.5.2 Trabalhos de campo	13
1.5.3 Petrografia	13
1.5.4 Análises por Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)	13
1.5.5 Extração de zircão	14
1.5.6 Análises isotópicas	14
1.5.6.1 Evaporação de Pb em zircão.....	14
1.5.6.2 U-Pb em zircão por LA-ICP-MS	15
1.5.6.3 Evaporação de Pb em partículas de ouro.....	17
1.5.6.4 Análise isotópica de Pb em rocha total.....	18
1.5.6.5 Análise isotópica de Pb por lixiviação sequencial em pirita.....	19
1.5.6.6 Método Sm-Nd em rocha total.....	20
PARTE 2 ESTUDO ISOTÓPICO (PB-PB, U-PB E SM-ND) DE ROCHAS ENCAIXANTES E MINERALIZAÇÕES AURÍFERAS ASSOCIADAS AO GREENSTONE BELT TRÊS PALMEIRAS, VOLTA GRANDE DO XINGU	22

1 INTRODUÇÃO	23
1.1 Métodos Analíticos	24
<i>1.1.1 Dissolução de Pb em rocha total</i>	24
<i>1.1.2 Lixiviação de Pb em pirita</i>	24
<i>1.1.3 Evaporação de Pb em ouro</i>	24
<i>1.1.4 Evaporação de Pb em zircão</i>	24
<i>1.1.5 U-Pb em zircão por LA-ICP-MS</i>	25
<i>1.1.6 Sm-Nd em rocha total</i>	25
2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	25
3 GEOLOGIA LOCAL	26
3.1 Anfibolitos (Metabasaltos)	28
3.2 Metagabros	29
3.3 Xistos máficos	29
3.4 Meta-andesitos	29
3.5 Rochas metavulcanoclásticas	31
3.6 Granodioritos	32
3.7 Quartzo-dioritos	33
3.8 Ouro em quartzo-diorito e granodiorito	34
5 GEOCRONOLOGIA E GEOQUÍMICA ISOTÓPICA	35
5.1 Sm-Nd em rocha total	35
5.2 U-Pb em zircão por LA-ICP-MS	37
5.3 Evaporação de Pb em cristais de zircão	38
5.4 Análises de isótopos Pb	40
6 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES	44
PARTE 3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
REFERÊNCIAS	49

PARTE 1 APRESENTAÇÃO

A descoberta de ouro nas margens do rio Xingu, estado do Pará, em um local conhecido como Volta Grande ocorreu, segundo relatos de moradores da região (informação verbal), no início da década de 1930. Porém, garimpeiros têm trabalhado na área de Volta Grande em pequenos depósitos aluvionares desde a década de 1950. Na década de 1990, garimpeiros começaram a explorar alguns depósitos de ouro em saprólitos e em rocha fresca, perfurando poços que atingiam consideráveis profundidades. As primeiras pesquisas por empresas de mineração foram realizadas na década de 1970 e a exploração sistemática começou em meados da década de 1990 (Belo Sun Mining Corp. 2015, 2017, Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade - SEMAS 2013,). O projeto de Ouro Volta Grande, atualmente desenvolvido pela empresa Belo Sun Mining Corp., está localizado na extremidade noroeste do *Greenstone Belt* Três Palmeiras, que abriga diversas ocorrências de ouro.

O Projeto Volta Grande tem reservas estimadas de, aproximadamente, $115,9 \times 10^6$ toneladas com teor médio de 1,02g/t ($\approx 3,8 \times 10^6$ Oz), podendo vir a ser uma importante área de extração de ouro do país, quando posto em operação, prevista para meados de 2018 (Belo Sun Mining Corp 2015, 2017). Até hoje, entretanto, foram poucos os estudos acadêmicos realizados a respeito do contexto geológico, evolução tectono-magmática dos depósitos, tipos e extensão das alterações hidrotermais das rochas hospedeiras/encaixantes e os processos mineralizadores que geraram os depósitos.

Neste trabalho, foram realizados estudos petrográficos, de geoquímica isotópica (dissolução/lixiviação Pb-Pb e Sm-Nd) e geocronologia (U-Pb e evaporação de Pb em zircão), com o objetivo de caracterizar a mineralização aurífera que ocorre nos depósitos Grotta Seca, Ouro Verde, Itatá e Pequí quanto a forma de ocorrência e idades de formação do ouro, além de datar os litotipos relacionados ao *Greenstone Belt* Três Palmeiras e a essas mineralizações. Pretende-se que os resultados obtidos possam contribuir para o conhecimento geológico e geocronológico das rochas encaixantes e das mineralizações auríferas que ocorrem na área do *Greenstone Belt* Três Palmeiras-

Este documento é composto de duas partes: a primeira apresenta um texto de integração que contém a explicação e relevância do que foi pesquisado, a localização da área de estudo, o contexto geológico regional no qual se insere o Projeto Volta Grande, assim como os objetivos do trabalho e os materiais e métodos utilizados. A segunda parte é composta pelo manuscrito intitulado “**Estudo petrográfico e isotópico (Pb-Pb, U-Pb e Sm-Nd) de rochas**

metavulcânicas, mineralizações auríferas e rochas granitóides relacionadas ao *Greenstone Belt Três Palmeiras, Volta Grande do Xingú, Domínio Bacajá, Pará*”, a ser submetido à Revista do Instituto de Geociências da USP no qual são incluídos os resultados das análises realizadas por diferentes métodos, a discussão e conclusões do trabalho.

1.1 LOCALIZAÇÃO

A área de estudo se localiza porção central do estado do Pará, na zona rural do município de São José Porfírio, às proximidades das localidades identificadas como Vila Ressaca e Vila Itatá, situadas na margem direita do rio Xingú, próximo à cidade de Altamira (Figura 1). A área abrange, aproximadamente, 1300 km² (Belo Sun Mining Corp 2017) e insere-se na Folha Altamira – SA-22. O acesso à área de estudo se dá pela Rodovia Transamazônica (BR-258) ou por via aérea até cidade de Altamira, de onde parte do trajeto é feito por via fluvial, através do rio Xingú, e parte por estrada de terra, por cerca de 70 km, com dificuldade de transporte em períodos chuvosos (SEMA 2013).



Figura 1 - Mapa de localização do Projeto de Ouro Volta Grande.
Fonte: Belo Sun Mining Corp. (2015).

1.2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

O Cráton Amazônico envolve o norte e noroeste do território brasileiro e estende-se a países vizinhos como Venezuela, Guiana, Suriname e Guiana Francesa. A leste e sudeste, limita-se pelo Cinturão Araguaia do Neoproterozoico e a oeste, pela Cadeia Andina. A sudoeste e sul, pelo cinturão Paraguai e por coberturas sedimentares do Fanerozoico (Almeida

1967). O Cráton Amazônico evoluiu a partir de sucessivos eventos de acreção crustal formados no Paleoproterozoico e Mesoproterozoico ao redor de núcleos arqueanos (Tassinari & Macambira 1999, 2004, Tassinari *et al.* 2000, Teixeira *et al.* 1989). Esse modelo sugere que houve reciclagem da crosta arqueana e acreção de material juvenil ao longo do tempo e divide o cráton em províncias geocronológicas. Nessa linha, Tassinari & Macambira (2004) dividiram o Cráton Amazônico em seis províncias geocronológicas (Figura 2): (i) Amazônia Central (>2,5 Ga), por sua vez dividida nos blocos Carajás e Xingu-Iricoumé; (ii) Maroni-Itacaiúnas (2,2-1,9 Ga); (iii) Ventuari-Tapajós (1,9-1,8 Ga); (iv) Rio Negro-Juruena (1,8-1,55 Ga); (v) Rondoniana-San Ignácio (1,5-1,3 Ga); (vi) Sunsás (1,25-1,0 Ga).

Sato & Tassinari (1997), com base em análises Sm-Nd, reconheceram os principais eventos de acreção manto-crosta continental no Cráton Amazônico. As idades T_{DM} Sm-Nd apresentaram valores variando de 3,0 até 1,0 Ga. Essas idades são consistentes com os modelos de evolução tectônica do cráton proposto por Teixeira *et al.* (1989). Santos *et al.* (2000) propuseram novos limites para as províncias do cráton, estendendo os domínios arqueanos para o sudeste do Escudo das Guianas, englobando esses segmentos na Província Carajás e correlacionando o Bloco Imataca e esse domínio arqueano.

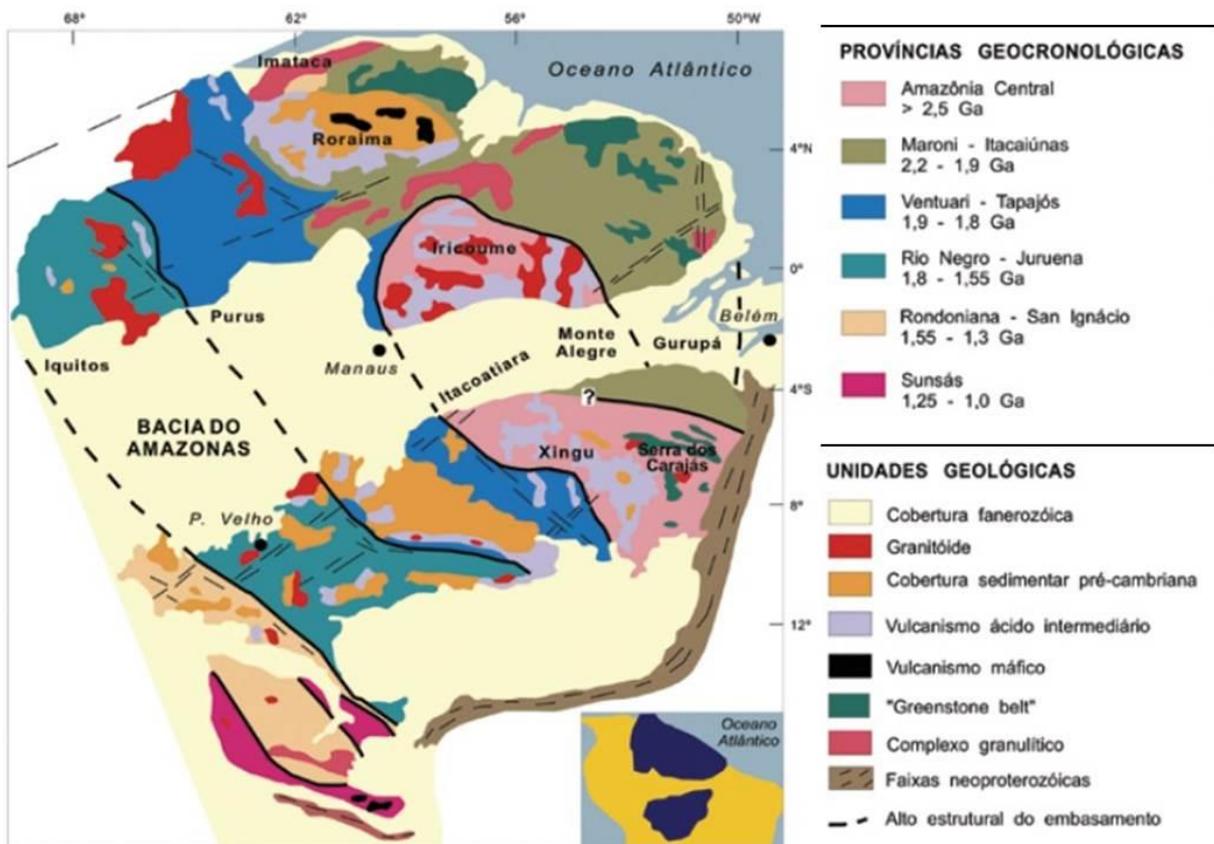


Figura 2 - Províncias geocronológicas do Cráton Amazônico.
Fonte: Tassinari & Macambira (2004).

1.2.1 Província Maroni-Itacaiúnas

A Província Maroni-Itacaiúnas corresponde, aproximadamente, à Província Transamazonas de Santos *et al.* (2000) e se estende pelas porções norte e nordeste do Cráton Amazônico, incluindo partes do estado do Amapá, assim como um prolongamento a sul da Bacia do Amazonas, denominado de Domínio Bacajá. Sua evolução está relacionada às orogêneses ocorridos no Ciclo Transamazônico (2,26 – 1,95 Ga), majoritariamente durante o Riáciano (Rosa-Costa *et al.*, 2006). Consiste de domínios de crosta juvenil paleoproterozoica e de remanescentes arqueanos retrabalhados no Paleoproterozoico (Rosa-Costa 2006, Teixeira *et al.* 1989, Tassinari 1996, Tassinari *et al.* 2000, Vasquez, 2006).

Com base nos padrões geocronológicos da Província Maroni-Itacaiúnas, Tassinari (1996) definiu, no estado do Amapá, dois grandes domínios, denominados de Simático e Ensiático, os quais estariam limitados pela Falha Oiapoque, de direção NE-SW. Entretanto, o surgimento de novos dados geocronológicos e o reconhecimento de protolitos arqueanos em maio a domínios paleoproterozoicos têm promovido extensos debates sobre a localização dos limites entre as províncias arqueanas e paleoproterozoicas na parte oriental do Cráton Amazonico.

1.2.2 Domínio Bacajá

O Domínio Bacajá (Figura 3) está localizado na porção leste do Cráton Amazônico, ao sul da Bacia Amazonas e representa o segmento meridional das Província Maroni-Itacaiúnas ou Transamazonas. Com base em dados Rb-Sr e K-Ar, Cordani *et al.* (1984) observaram que as rochas localizadas ao norte da serra dos Carajás, na região entre os rios Bacajá e Itacaiúnas, foram afetadas pela deformação atuante na região durante o Ciclo Transamazônico, diferentemente das rochas do Domínio Carajás. Santos *et al.* (1988), baseados em dados Rb-Sr, obtidos em rochas da região entre os rios Xingu e Iriri, sugeriram que naquele setor, além de retrabalhamento de rochas arqueanas, houve a formação de crosta juvenil durante o Ciclo Transamazônico. Teixeira *et al.* (1989), propuseram que a Província Maroni-Itacaiúnas fosse prolongada até a porção nordeste do Escudo Brasil Central, indo além da porção sul da Bacia do Amazonas, englobando o segmento atualmente conhecido como Domínio Bacajá, seguindo a designação proposta por Santos (2003).

Dados geocronológicos obtidos a partir da datações de zircão comprovam que a evolução do Domínio Bacajá está relacionada ao Ciclo Transamazônico, uma vez que foram

datadas rochas com idades entre 2,21 e 2,07 Ga (Macambira *et al.* 2003, Macambira *et al.* 2009, Vasquez 2006, Vasquez *et al.* 2008a). Em linhas gerais, o Domínio Bacajá é composto por associações tectônicas que representam fragmentos arqueanos e siderianos retrabalhados durante o Ciclo Transamazônico, granitoides de arcos magmáticos riacianos, granitoides e charnockitos relacionados ao clímax e estágios posteriores da colisão continental riaciana, podendo ser considerado como um orógeno colisional (Vasquez & Rosa-Costa 2008b).

O Domínio Bacajá reúne diversas rochas de alto grau, em menor proporção rochas supracrustais e uma notável tectônica transcorrente, marcada por extensas zonas de cisalhamento, orientadas segundo NW-SE e WNW-ESE (Ricci *et al.* 2003). Segundo Vasquez e Rosa-Costa (2008), esse domínio é subdividido em três fragmentos principais, que datam do Arqueano ao Sideriano e que foram retrabalhados no Riaciano: Associação Granulítica arqueana-paleoproterozoica (APPgl), representada pelas unidades metassedimentares Granulito Novolândia e Paragnaisse Ipiaçava, e pelo Ortogranulito Máfico Rio Preto, e complexos Cajazeiras e Aruanã, que representam os granulitos ortoderivados; Associação Granito-Gnaiss-Migmatítica (APPgn), constituída por ortognaisses de fácies anfibolito, com diferentes graus de migmatização, derivados dos ortognaisses Pacajá e Uruará e do Metatonalito Rio Bacajá; e *Greenstone Belts* arqueano-paleoproterozoicos (APPgb), formados pelas seqüências metavulcano-sedimentares, tais como a Sequência Três Palmeiras.

O limite sul do Domínio Bacajá com o Domínio Carajás é marcado por zonas de cisalhamento E-W do Lineamento Cinzento. Diversos trabalhos geocronológicos realizados às proximidades desse limite (Cordani *et al.* 1984, Macambira *et al.* 2009, Santos *et al.* 1988, Vasquez 2006) têm confirmado a formação e o retrabalhamento de crosta juvenil no Domínio Bacajá durante o Ciclo Transamazônico. Rochas vulcânicas e granitos do Domínio Iriri-Xingu recobrem e cortam as rochas do Domínio Bacajá na porção oeste, mas restritos afloramentos do embasamento do Domínio Iriri-Xingu, aliado a assinatura aeromagnetométrica do Domínio Bacajá, sugerem que esse domínio se estende nesse sentido (Vasquez 2006, Vasquez & Rosa-Costa 2008).

Vasquez (2006) define o metamorfismo do Domínio Bacajá como fácies granulito, baseado em feições de migmatização e nas paragêneses minerais. Idades obtidas pela metodologia U-Pb em monazita e zircão sugerem que a migmatização tenha ocorrido em condições de fácies anfibolito, sendo que o metamorfismo para a fácies granulito seria relacionado a espessamento crustal e um segundo evento de metamorfismo para a fácies granulito estaria relacionado ao adelgaçamento crustal, em condições de baixa pressão (Vasquez *et al.* 2008a).

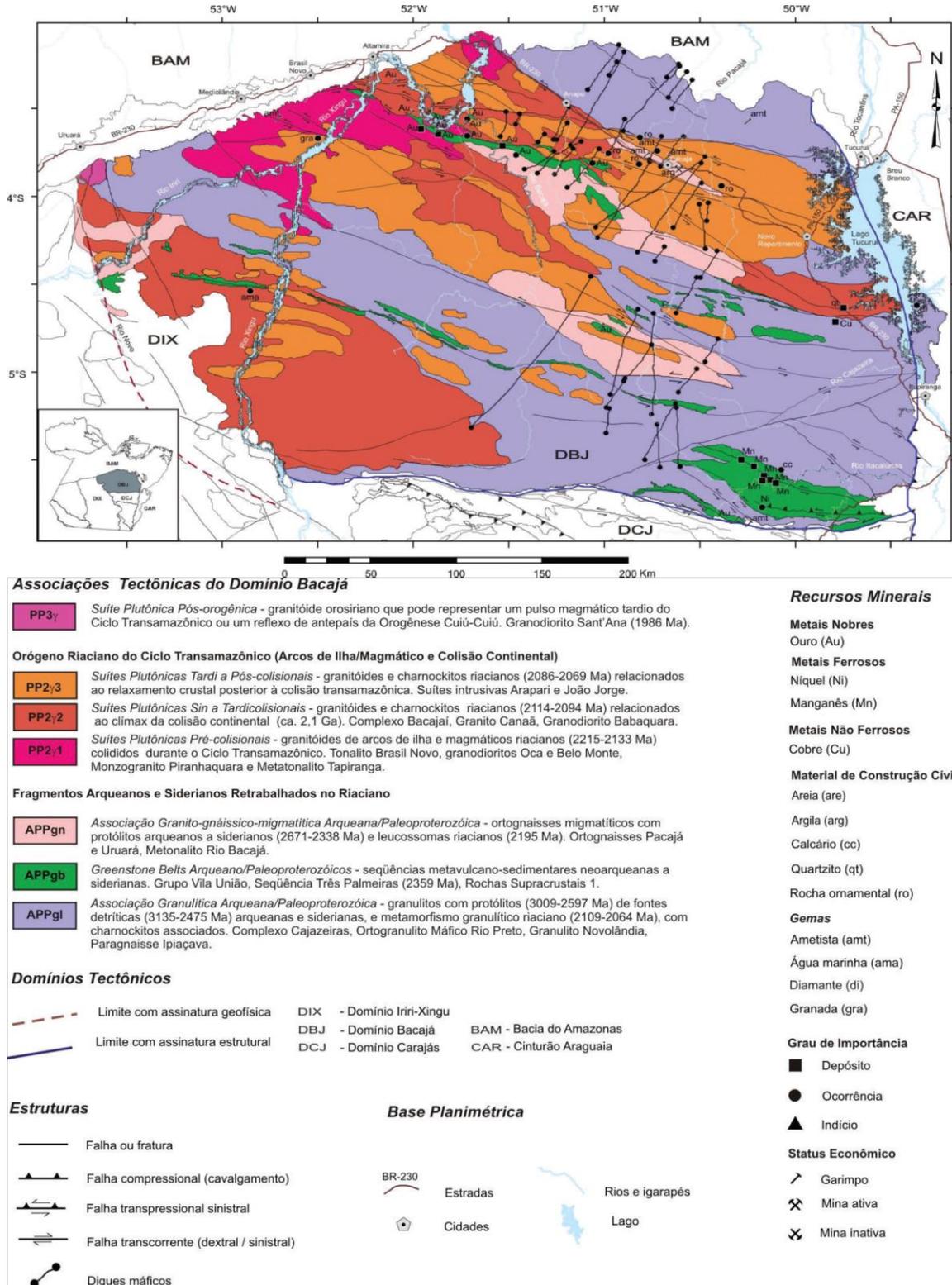


Figura 3 - Mapa Geológico da porção centro-leste do Domínio Bacajá.
 Fonte: Vasquez & Rosa-Costa (2008).

1.2.3 *Greenstone Belt* Três Palmeiras

Silva *et al.* (1974) que denominaram as sequências metassedimentares observadas na área próxima ao rio Xingu como Xisto Três Palmeiras. Jorge João *et al.* (2001) e Lobato *et al.* (1987) denominaram essas rochas de Suíte Metamórfica Três Palmeiras. Segundo esses autores, os dados geológicos de campo e de laboratório denunciavam tratar-se de uma sequência do tipo *greenstone belt* e permitiram uma subdivisão estratigráfica da sequência em duas unidades, denominadas, da base para o topo, de Anfibolito Itatá e Micaxisto Bacajá.

Vasquez (2006) apresenta datações de meta-andesitos e metadacitos com 2,36 Ga (obtidas por Macambira *et al.* 2003) e tonalitos associados, de 2,34 Ga. O autor considerou essas rochas como do Paleoproterozoico (Tardi-Sideriano) e suas idades modelo Sm-Nd seriam indicativas de uma acreção juvenil há cerca de 2,48 bilhões de anos, com cristalizações do magma crustal, há *ca.* 2,36 bilhões de anos.

Em suma, compreende um conjunto de rochas metavulcânicas máficas/ultramáficas e metassedimentares clásticas e químicas, que representam porções de sequências vulcanosedimentares, possivelmente do tipo *greenstone belt* e está envolvida predominantemente por rochas migmatíticas e gnáissicas.

Informações verbais prestadas por geólogos da empresa Belo Sun indicam que as rochas do *Greenstone Belt* Três Palmeiras estão distribuídas transversalmente aos rios Itatá e Bacajá, em forma de faixas ou lentes alongadas de direção WNW-ESE.

O Granodiorito Oca (Jorge João *et al.* 2001), corresponde à Suíte Granítica Anorogênica Granodiorito Oca descrita por Schobbenhaus *et al.* (2004), que caracterizaram dois corpos dentro da Suíte Granítica Anorogênica Granodiorito Oca e os consideraram, assim como os demais corpos pertencentes a Suíte, como de idade orosiriana (1,8-2,05 Ga). Esses corpos encontram-se na região da Volta Grande do Xingu, onde um deles foi descrito na área da antiga Mineração Oca (razão de sua denominação), enquanto o segundo foi descrito na região da foz do rio Bacajaí. Vasquez (2006), por meio de análises U-Pb SHRIMP em zircão, obteve idades de 2,16 Ga para o primeiro corpo e 2,15 Ga para o segundo, situando-os no Paleoproterozoico (Riaciano).

1.2.3.1 Mineralizações auríferas na área do *Greenstone Belt* Três Palmeiras

As mineralizações auríferas registradas na área do *Greenstone Belt* Três Palmeiras encontram-se hospedadas em granitoides e veios de quartzo que cortam as sequências

vulcanossedimentares, as quais formam a Serra Três Palmeiras, dividida em três áreas distintas: (1) Volta Grande do Rio Xingu, situada no extremo noroeste da serra, onde localizam-se oito depósitos/alvos distintos: Ouro Verde, Gaúcho, Canela, Serrinha, Grota Seca, Galo, Japão e Nobelino (Belo Sun Mining Corp., 2015). A mineralização aurífera desenvolveu-se em zonas de cisalhamento que cortam corpos granitoides, relacionados ao Granodiorito Oca (Agnerian, 2005 *apud*: Klein & Carvalho, 2008), de idade de 2160 ± 3 Ma (Vasquez 2006), próximo ao contato entre esses granitoides e as rochas supracrustais do *Greenstone Belt* Três Palmeiras (Figura 4). (2) Rio Bacajá, na porção central da Serra Três Palmeiras. Segundo descrições feitas pela Mineração Rio Jatobá Ltda. (1986 *apud*: Klein & Carvalho, 2008), a área do rio Bacajá é caracterizada por ocorrências auríferas filonianas, que estariam associadas a veios de quartzo encaixados em zonas de cisalhamento que cortam granodioritos, filitos e metabasaltos relacionados à Sequência Três Palmeiras. (3) Faixa Prima, no extremo sudeste da Serra Três Palmeiras. A mineralização primária hospeda-se em rochas supracrustais relacionadas ao *Greenstone Belt* Três Palmeiras e segue uma orientação subparalela à estruturação dessa sequência (N70°W). Os corpos mineralizados compreendem lentes métricas de metachert, veios de quartzo, zonas de falha em formações ferríferas e disseminações e venulações em rochas metavulcânicas muito alteradas (Essex S.A., 1988, *apud*: Klein & Carvalho, 2008).

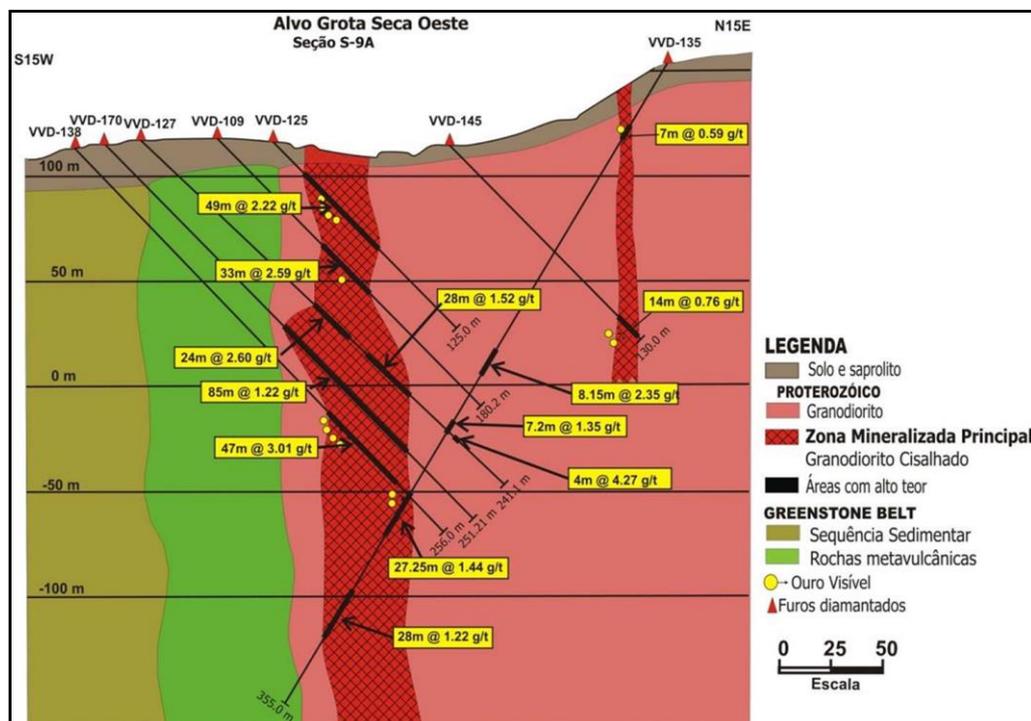


Figura 4 - Seção transversal do alvo Grota Seca, exemplificando o modelo de mineralização na área do Projeto Volta Grande. O ouro concentra-se em corpos de quartzo-diorito e granodiorito,

preferencialmente em porções alteradas hidrotermalmente. As áreas mineralizadas ocorrem próximas ao contato entre granitoides e as rochas suprecrustais que formam o *Greenstone Belt* Três Palmeiras, onde são observadas porções de granitoides cisalhados e silificados.

Fonte: Ruy (2009).

1.2.3.2 Projeto de Ouro Volta Grande

O Projeto Volta Grande abrange mais de 160.000 hectares (1600 km²), em meio ao *Greenstone Belt* Três Palmeiras, ao longo do qual se desenvolve pequenas atividades mineiras (garimpos) desde a década de 1960. No final da década de 1990, as empresas TVX e Battle Mountain Exploration (atualmente partes da Kinross) identificaram o grande potencial aurífero da região. A empresa Belo Sun assumiu o controle do Projeto Volta Grande em 2003 (Belo Sun Mining Corp., 2015). O projeto envolve duas áreas-alvo que consistem nos blocos Norte e Sul (Figura 5). O primeiro contém quatro grandes áreas mineralizadas: (i) Ouro Verde, no norte; (ii) Grota Seca, a sudeste; (iii) a área Junction (que agrupa os depósitos Grota Seca e Ouro Verde) e (iv) Greia, ao norte do depósito Grota Seca. O bloco Sul compreende três áreas-alvo: (i) Pequi, na porção norte do bloco, (ii) Grande, ao sul; e (iii) Itatá, na parte sudeste do Bloco Sul.

A mineralização de ouro primária está hospedada em corpos de quartzo-diorito e granodiorito alterados hidrotermalmente (Figura 6), situadas próximo aos contatos com rochas metavulcanossedimentares da sequência *greenstone*. O ouro ocorre em uma malha de zonas mineralizadas, com dimensões que alcançam até 1 km de extensão e 400 m de profundidade, com mergulhos que variam entre 50° e 85° S. (Belo Sun Mining Corp., 2015; 2017).

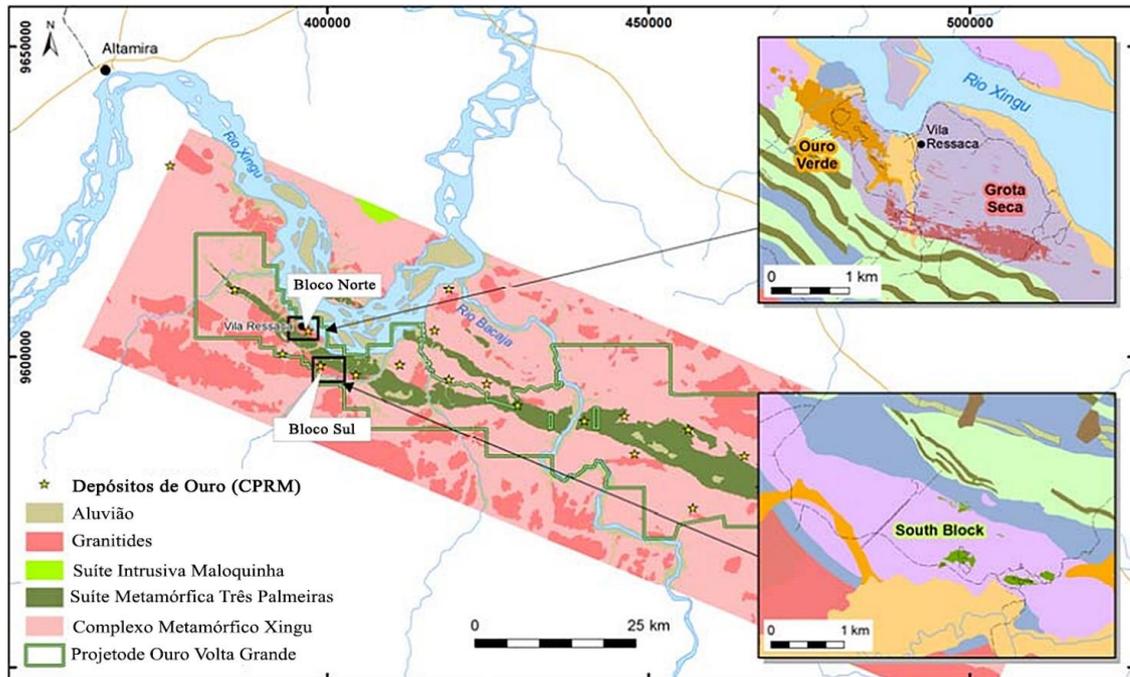


Figura 5 - Mapa geológico da área do Projeto Volta Grande com localização dos corpos granitoides hospedeiros de mineralizações, a partir da interpretação de dados aerogeofísicos. A mineralização está associada ao contato entre as rochas graníticas e as seqüências metavulcanossedimentares que formam o *greenstone belt*. Em destaque, os alvos Bloco Norte e Sul.

Fonte: Belo Sun Mining Corp. (2015).

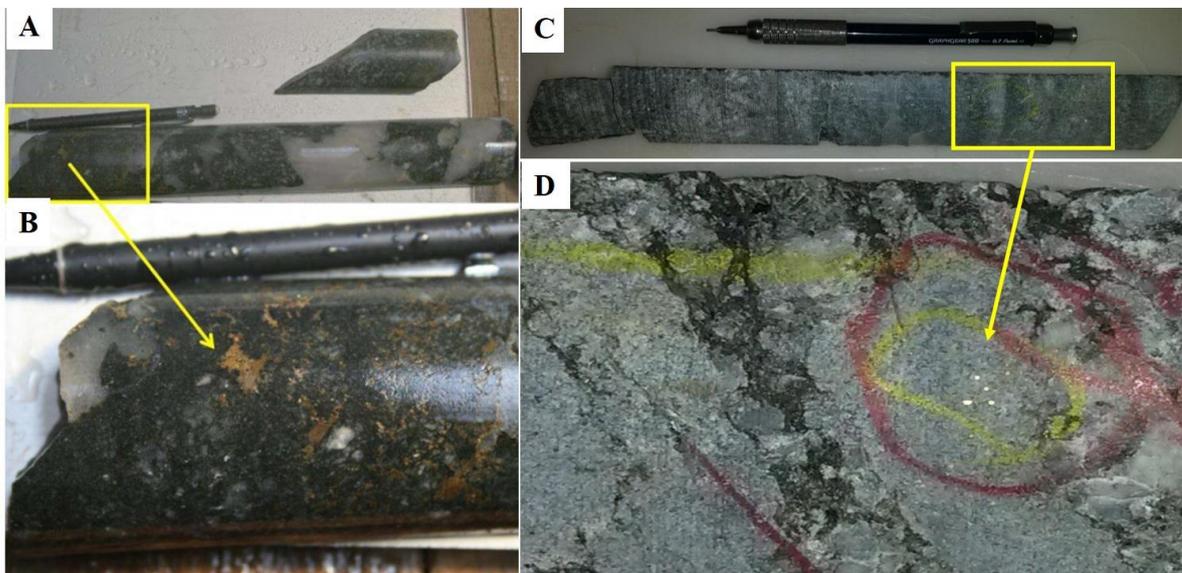


Figura 6: Mineralização em diorito porfirítico, Alvo Ouro Verde. A mineralização ocorre, preferencialmente, em veios de quartzo com calcita e/ou associado à arsenopirita e pirita. A). Diorito porfirítico silicificado, cortado por veios de quartzo com carbonato e sulfetos. B). No detalhe, porção mineralizada. C). Granodiorito fino, moderadamente alterado e cloritizado. D). No detalhe, porção mineralizada. Nos dois casos, o ouro ocorre associado a sulfetos (pirita e arsenopirita, principalmente).
Fonte figuras A e B: Belo Sun Mining Corp. (2015). Figuras C e D: do Autor.

1.3 PROBLEMÁTICA

O Domínio Bacajá possui uma ampla variedade litoestratigráfica, que vem sendo estudada e atualizada por diversos autores (Santos, 2000, Faraco *et al.* 2005; Vasquez, 2006; Vasquez *et al.*, 2008a; Ruy, 2009; Macambira *et al.* 2009). Nesse domínio, o *Greenstone Belt* Três Palmeiras apresenta importantes mineralizações, com destaque para o ouro (Vasquez *et al.* 2008b, Ruy, 2009). De acordo com De Wit & Ashwal (1997), as mineralizações de Au em *greenstone belts* ocorrem, preferencialmente, associadas a rochas máfica-ultramáficas, sucessões máfico-félsicas (sulfetos maciços com ouro associado) e em sequências sedimentares (*Bifs*, carbonatos, depósitos de *placer* de ouro e estanho). Os depósitos associados a rochas graníticas seriam raros e restritos.

Para Groves *et al.*, (1998; 2003), Goldfarb *et al.*, (2001), entretanto, depósitos auríferos podem ser formados em *greenstone belts* devido à circulação de fluidos metamórficos durante a formação de orógenos, geralmente ao longo de zonas de cisalhamento. Eles seriam formados como resultado do fluxo de fluido hidrotermal em um intervalo de tempo sincrônico a posterior com a atividade tectônica e ao pico do metamorfismo de terrenos vulcano-plutônicos, em fácies metamórficas que variam de xisto-verde a granulito (Groves *et al.*, 1998).

Na área do Projeto de Ouro Volta Grande as ocorrências auríferas se encontram, predominantemente, em corpos graníticos e em zonas de intensa alteração hidrotermal. Devido à dificuldade de acesso a várias partes da área, da escassez de afloramentos das sequências metavulcânicas e da ausência de dados geoquímicos dessas sequências, a fonte primária das mineralizações e o tipo de depósito que as encerra ainda permanecem desconhecidos. Nesse contexto, se faz necessário tentar avaliar se a fonte das mineralizações auríferas seriam os granitoides presentes na área ou as sequências metavulcânicas que compõem o *Greenstone Belt* Três Palmeiras.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral:

Avaliar a relação temporal das mineralizações auríferas registradas na área do Projeto de Ouro Volta Grande com as sequências vulcanossedimentares que formam o *Greenstone Belt* Três Palmeiras e com os granitoides presentes na área.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar microscopicamente os principais litotipos que compõem o *greenstone belt* e suas intrusivas graníticas, em especial as fases que hospedam mineralizações auríferas, incluindo o reconhecimento de paragêneses minerais resultantes da alteração hidrotermal;
- Definir a idade de cristalização das sequências metavulcânicas que compõem o *greenstone belt*, e determinar seu eventual relacionamento com eventos tectono-magmáticos já conhecidos na área;
- Estimar a idade de extração do manto de rochas metavulcânicas (metabasaltos e meta-andesitos) que compõem o *Greenstone Belt* Três Palmeiras através do método Sm-Nd em rocha total;
- Determinar a idade e discutir a possível origem da mineralização através da composição isotópica de Pb (pelo método de evaporação) em partículas de ouro em quatro depósitos auríferos;
- Discutir a relação genética e temporal entre a formação das mineralizações auríferas, suas hospedeiras e as sequências metavulcânicas que formam o *greenstone belt*.

1.5 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentadas as metodologias utilizadas nesta dissertação, as quais foram: levantamento bibliográfico, trabalhos de campo, descrições de testemunhos de sondagem, análises petrográficas, imageamento de cristais de zircão ao MEV e análises isotópicas.

1.5.1 Pesquisa Bibliográfica

O levantamento bibliográfico permitiu a obtenção de um conjunto significativo de dados e informações pré-existentes a respeito da área de estudo. Dentre as atividades que foram desenvolvidas no decorrer desta pesquisa, destacam-se a consulta e compilação de mapas geológicos pré-existentes e a revisão da literatura geológica de temas específicos (petrologia, geoquímica isotópica e geocronologia) e da geologia regional, continuamente atualizada ao longo do período de execução da pesquisa.

1.5.2 Trabalhos de campo

O trabalho de campo foi realizado em um período de 8 dias para amostragem e descrição macroscópica de 52 amostras, sendo 9 provenientes de afloramentos e 43 de testemunhos de furos de sondagem, com comprimento entre 20 e 40 cm.

1.5.3 Petrografia

A análise petrográfica de 42 seções delgadas (classificação textural/composicional, descrição mineralógica) integrada com as informações de campo, constituiu subsídio básico para a classificação das rochas seleção de elenco de amostras representativas visando as análises isotópicas e geocronológicas.

1.5.4 Análises por Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

Foram selecionadas 12 seções delgadas para serem analisadas em microscópio eletrônico de varredura (MEV) para uma obtenção análises semi-quantitativas e uma melhor caracterização do ouro e de sulfetos presentes nas rochas encaixantes, associados a mineralização aurífera. Foi utilizado o equipamento de modelo LEO-1430 do Laboratório de Microanálises da UFPA. As amostras foram metalizadas com ouro, sendo as imagens obtidas por elétrons retro-espalhados. As condições operacionais foram: voltagem de aceleração de 20 KV, corrente do feixe de elétrons de 90 μ A e distância de trabalho de 15 mm.

Previamente às análises U-Pb por LA-ICP-MS, os cristais de zircão foram inclusos em pastilhas de resina *epoxy* (Figura 8) e imageados por catodoluminescência (CL) ao MEV a fim de destacar estruturas internas dos cristais e auxiliar a escolha dos pontos de impactos do laser para análise isotópica. As pastilhas foram recobertas com uma fina camada de ouro para permitir o escape da corrente elétrica formada na superfície. As imagens em CL foram realizadas no Laboratório de Microanálises do Instituto de Geologia a UFPA, utilizando-se o MEV LEO-1430 com mono-catodoluminescência Gatan acoplada para obtenção de imagens de CL e elétrons retroespalhados (ERE). As condições analíticas empregadas foram: incidência sobre os cristais de zircão = 30 segundos, corrente do feixe de elétrons = 90 μ A, voltagem de aceleração = 20 kV e distância de trabalho = 15 mm.

1.5.5 Extração de zircão

Para extração de zircão, as amostras de rocha foram tratadas na Oficina de Preparação de Amostras (OPA) e na Sala de Separação de Minerais de Pará-Iso (IG-UFGA), por meio de trituração, moagem e peneiramento, a fim de separar-se as frações granulométricas de 250-180 μm ; 180-125 μm e 125-75 μm (Figura 8). Após o peneiramento, as amostras foram tratadas com o uso de bateias de 10 e 50 cm de diâmetro e os minerais ferromagnéticos foram extraídos da amostra, com o auxílio de imã de Nd e separador magnético *Isodynamic Frantz*, ajustado a 25° e 10° de inclinação longitudinal e lateral, respectivamente, e amperagem de 1,0 A. Após essa etapa, a fração pesada e não magnética foi separada por novo bateamento em álcool etílico (96%) e triagem com uso de lupa binocular e pinça. Os cristais selecionados foram separados conforme o método geocronológico a ser utilizado: para as análises por evaporação de Pb os cristais são organizados em lâmina delgada, fotografados e fixados em filamentos de rênio, enquanto para análises por LA-ICP-MS os cristais de zircão são organizados em pastilhas de resina *epoxy* para posterior imageamento por catodoluminescência (Figura 7).

1.5.6 Análises isotópicas

1.5.6.1 Evaporação de Pb em zircão

O método de evaporação de Pb em monocristal de zircão foi aplicado uma amostra de meta-andesito (PVG-05) e uma de rocha metavulcanoclástica (PVG08) e seguiu os procedimentos descritos por Kober (1986), adaptados as condições do Pará-Iso. As análises isotópicas foram feitas no espectrômetro de massa Finnigan MAT 262 e o tratamento estatístico dos resultados analíticos, bem como os cálculos das idades médias e dos desvios foram baseados em Gaudette *et al.* (1998). A técnica de evaporação de Pb em zircão utiliza filamentos duplos de Re, posicionados um em frente ao outro, sendo um filamento de evaporação, no qual é inserido o cristal de zircão a ser evaporado, e um filamento de ionização, no qual o Pb liberado durante a etapa de evaporação é analisado. O filamento de evaporação é aquecido gradativamente, em três diferentes etapas de evaporação (1450°C; 1500°C e 1550°C) por um tempo de, aproximadamente, 5 minutos por etapa. Em cada etapa de evaporação, ocorre a liberação do Pb contido no retículo cristalino do zircão. Esse Pb, então, se deposita no filamento de ionização, o qual é mantido em temperatura ambiente. Ao

final do processo de evaporação, o filamento de evaporação é desligado e o filamento de ionização é aquecido a uma temperatura em torno de 1050°C, ionizando o Pb ali depositado.

Para medir as emissões dos diferentes isótopos de Pb que são detectados pelo aparelho, utiliza-se um monocoletor (contador de íons) para os casos onde há uma baixa intensidade do sinal emitido pela evaporação do Pb, por meio de uma varredura das massas do Pb 206, 207, 208, 206, 207 e 204. Caso haja alta intensidade do sinal emitido durante a evaporação do Pb, utiliza-se um multicoletor (contador de íons associado ao Copo de Faraday), por meio da varredura da sequencial de massas de ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb e ^{204}Pb . Um bloco analítico obtido no contador de íons fornece 18 razões $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ e no multicoletor 10 razões $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$. Em cada etapa de evaporação são obtidos, em geral, até cinco blocos de dados nas análises em monocoletor e dez nas análises sem multicoletor. A média das razões $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ desses blocos define uma idade correspondente para cada etapa. Esses dados são representados em diagrama Idade (Ma) vs. blocos de dados. As idades obtidas correspondem às temperaturas de evaporação mais elevadas, pois o Pb analisado é proveniente das porções do cristal de zircão com maior retentividade desse elemento. Essas idades são mais representativas da época de cristalização do mineral. Os dados obtidos são tratados estatisticamente em programas específicos e segundo critérios metodológicos estabelecidos no Pará-Iso.

Para a obtenção das médias das idades, são desprezados blocos e etapas de razões isotópicas com $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ maiores que 0,0004 e os blocos com desvios superiores a 2σ em relação à média obtida para as idades dos cristais de zircão analisados em cada amostra. Além disso, elimina-se, de forma subjetiva, todos os resultados de blocos/etapas/cristais com “idades” discordantes da média das idades obtidas em cada etapa de evaporação.

1.5.6.2 U-Pb em zircão por LA-ICP-MS

As análises U-Pb em zircão foram realizadas em uma amostra de meta-andesito (PVG-05) e uma amostra de rocha metavulcanoclástica (PVG-08). O método utilizado foi o U-Pb em zircão por espectrometria de massa ICP-MS por abrasão a laser (*Laser ablation*). O equipamento utilizado é ICP-MS modelo *Neptune*, da Thermo-Finnigan (Figura 8A), equipado com multicoletores (MC). O *laser ablation* (LA) utilizado nesse método é um sistema da marca CETAC, modelo LSX-213 G2 (Figura 8B), também do Laboratório Pará-

Iso. Os procedimentos analíticos e equipamentos utilizados na determinação dos isótopos de U e Pb em cristais de zircão foram baseados no trabalho de Chemale Jr *et al.* (2012).

As análises de U-Pb por ICP-MS são realizadas de forma pontual, com *spots* de, aproximadamente, 25 µm de diâmetro, por 55 seg., com alternância de material de referência (zircão: padrões GJ-1 e 91500) para a determinação das concentrações e controle da qualidade analítica. A redução dos dados analíticos é feita por programas específicos para a obtenção das razões isotópicas $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$, $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ e $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, e seus respectivos erros após correção de Pb comum e de fracionamento de massa. Uma vez com os dados analíticos devidamente reduzidos e processados, os cálculos da idade são realizados em diagramas geocronológicos Concórdia, com auxílio do programa programa ISOPLOT versão 3.68 de Ludwig (2008) e apresentados com desvio de 2σ .

Oficina de preparação de amostras (OPA)



Sala de preparação de amostras do Pará-Iso

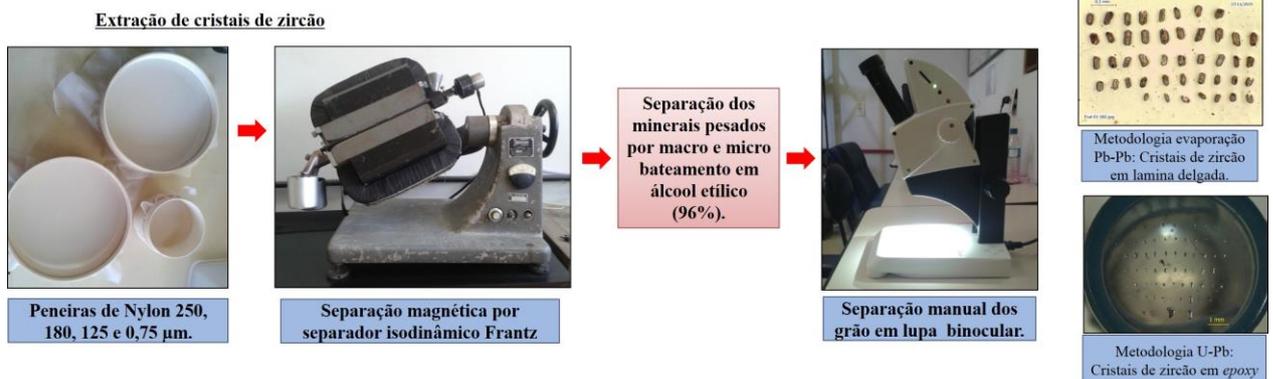


Figura 7 - Preparação de amostras para as metodologias de evaporação de Pb e U-Pb em cristais de zircão. Na parte superior da figura, são mostrados trituradores de mandíbula e moinho de disco, equipamentos de trituração e pulverização utilizados na Oficina de Preparação de Amostras (OPA). Na parte inferior da figura, são mostrados peneiras de nylon de diversas aberturas, separador magnético *Isodynamic* Frantz e lupa binocular, equipamentos da Sala de Separação de Minerais do Pará-Iso. A parte final da preparação consistiu na fixação de cristais de zircão em pastilha de resina epoxy (metodologia U-Pb) e em lâminas de vidro para posterior deposição em filamentos de Re (evaporação de Pb).

Fonte: do Autor.

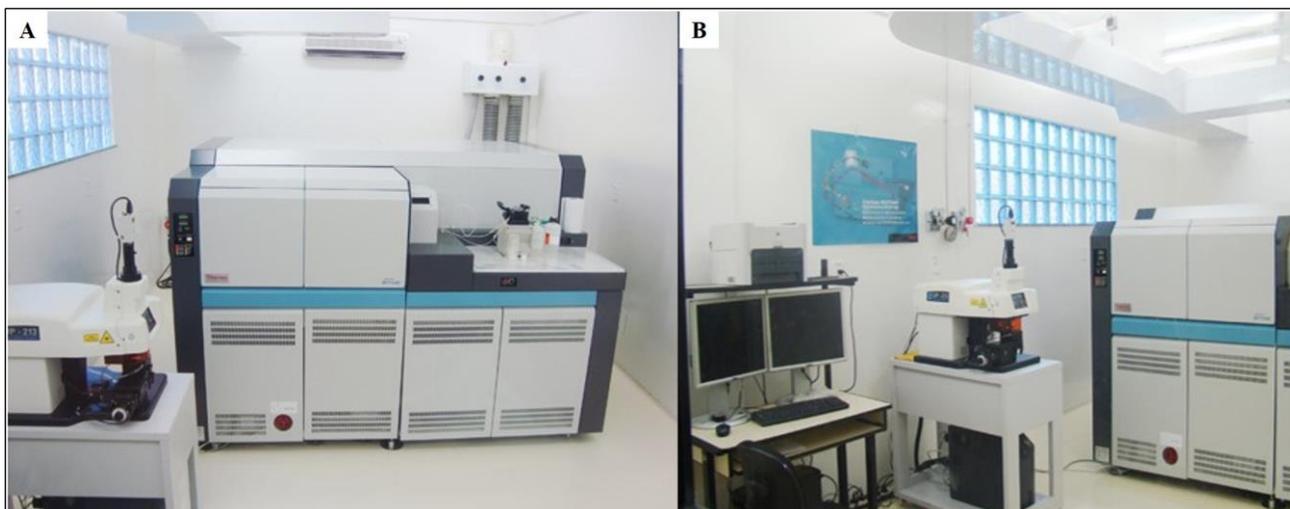


Figura 8 - Vista do espectrômetro de massa ICP-MS-MC Thermo-Finnigan, modelo *Neptune* (A) e do sistema de *laser ablation* (LA) CETAC, modelo LSX-213 G2, à esquerda (B), Laboratório Pará-Iso/UFPA.

Fonte: do Autor.

1.5.6.3 Evaporação de Pb em partículas de ouro

As análises de isótopos de Pb pelo método evaporação de ouro nativo foram realizados no Laboratório do Pará-Iso (UFPA) em partículas extraídas de amostras de 4 furos de sondagem (cujas profundidades variam entre 50 e 400m), cedidas pela empresa Belo Sun Mining Corp., seguindo o procedimento descrito por Krymsky (2002). Para a aplicação da metodologia foram selecionadas 4 amostras provenientes dos depósitos Grotta Seca, Ouro Verde, Itatá e Pequi, sendo uma de cada depósito. Essas rochas representam os corpos granitoides intrusivos nas sequências vulcanossedimentares do *Greenstone Belt* Três Palmeiras, bem como as rochas hospedeiras de mineralizações auríferas.

Para a separação das partículas de ouro, empregou-se as mesmas técnicas utilizadas para a separação de cristais de zircão. As partículas de ouro (125 μm a 250 μm) foram lavadas segundo uma sequência de soluções ácidas: HF (10N); HCl (6N) e HNO₃ (14N). Em cada etapa de lavagem, as amostras foram aquecidas a 100°C por 30 minutos, lavadas com H₂O *Milli* e levadas a chapa aquecedora para secagem. Após a etapa de lavagem, as partículas de ouro foram fixadas diretamente em monofilamentos de Re, nos quais se inseriu 2 μl de sílica gel. As partículas foram analisadas no espectrômetro de massa Finnigan MAT 262 do Laboratório Pará-Iso, por meio de evaporação e ionização direta a temperatura constante de 1250°C. Diferentemente da técnica de evaporação de Pb em cristais de zircão, a análise isotópica do Pb contido nas partículas de ouro ocorre simultaneamente ao processo de evaporação e por tempo indeterminado (mas não maior de 50 min), enquanto ainda houver Pb

a ser evaporado. Durante a evaporação ocorre a liberação do Pb ionizado que se deposita na sílica gel inserida no filamento. As emissões dos diferentes isótopos de Pb são detectadas e medidas em multicoleção, quando se usa o contador de íons associado ao Copo de Faraday. As análises ocorrem pela varredura da seguinte sequência de massas de Pb: 206, 207, 208 e 204.

Um bloco analítico em multicoletor fornece 10 razões $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$. Em cada etapa de evaporação são obtidos dez nas análises em multicoletor. A média das razões $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ desses blocos define uma razão isotópica e uma idade correspondente para cada amostra. Esses dados são representados em diagrama $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ e os dados obtidos são tratados estatisticamente segundo critérios metodológicos estabelecidos no Pará-Iso através do programa ISOPLOT versão 3.68 de Ludwig (2008) e apresentados com desvio de 2σ , correspondendo à confiabilidade de 95%.

1.5.6.4 Análise isotópica de Pb em rocha total

Essa técnica foi aplicada em cinco amostras de rochas metavulcânicas da sequência *greenstone belt*. Foram selecionadas duas amostras de anfibolito (metabasalto) (ANF-01 e ANF-02) e três amostras de meta-andesito porfirítico (DP-02, DP-03 e MSV-02). As amostras selecionadas para análise de rocha total foram fragmentadas em trituradores de mandíbulas, quarteadas e pulverizadas em *Shaterbox* a 100 *mesh*. 400 mg de cada amostra foram dissolvidos com HF** (48%) + HBr*** (8N) em duas etapas de digestão: uma a frio, por 7 horas, e outra a quente (100°C), por 12 horas.

As amostras foram evaporadas, solubilizadas com HCl*** (2N), submetida à separação por cromatografia de resina de troca iônica *Eichrom* Sr 50-100 μm (condicionada em meio ácido). O Pb foi eluído da coluna de resina usando-se HCl*** (6N) e evaporados com H_3PO_5 (0,125N). Na sequência, as amostras foram misturadas a 4 mL de sílica gel e depositados em monofilamento de Re. As análises isotópicas de Pb foram realizadas em espectrômetro de massa termo induzido (TIMS) modelo *Triton Plus* do Laboratório Pré-Iso. Os diagramas e cálculos das isócronas seguiram o modelo de York (1969) através do programa ISOPLOT versão 3.68 de Ludwig (2008) e apresentados com desvio de 2σ , correspondendo à confiabilidade de 95%.

1.5.6.5 Análise isotópica de Pb por lixiviação sequencial em pirita

A técnica da lixiviação de Pb foi aplicada em concentrados de pirita de uma amostra de meta-andesito porfirítico (PVG-06) e uma amostra de diorito (GS-02). A análise isotópica de Pb foi realizada seguindo o protocolo analítico do Laboratório Pará-Iso/UFGA. As amostras separadas para a obtenção dos concentrados de pirita foram trituradas, quarteadas e peneiradas na fração 80-200 *mesh*, atacadas com HF (concentrado) a frio para eliminar os minerais silicáticos. Os minerais remanescentes foram eliminados através da catação manual com lupa binocular. Os concentrados foram lavados por três vezes com água *Milli-Q*, em aparelho de ultra-som, com intervalos de 30 minutos. Na sequência, as amostras foram lavadas com acetona e secas em capela a 100°C. Cerca de 300 mg de pirita foram utilizados, em cada amostra, para aquisição de soluções enriquecidas em Pb, que foram coletadas em 6 etapas de lixiviação (L1 a L6). O procedimento seguiu as diretrizes estabelecidas por Frei & Kamber (1995), adaptadas às condições do Pará-Iso.

O lixiviado L1 foi obtido pela reação dos cristais de pirita imersos em uma solução de 4 mL de HBr*** 4 N e HCl*** 2 N na proporção 12:1, aquecida a 100°C por 15 minutos. Após esse tempo, foi coletada a solução sobrenadante (L1). O lixiviado L2 foi obtido a partir da reação do resíduo de L1 com 4 mL de HBr*** 2N, quente, após 4 horas. O lixiviado L3 foi obtido do resíduo de L2 com 4 mL de HCl*** 4N, quente, após 12 horas. O lixiviado L4 foi obtido pela reação do resíduo de L3 com 4 mL de HCl*** 6N, quente, após 6 horas. L5 foi adquirido da reação de L4 com 4 mL de água régia (50%), quente, após 24 horas. E, finalmente, L6 foi adquirido da reação L5 com 2 mL HCl_{Conc.} 2 mL HNO₃_{Conc.} e 4 gotas de HBr 8N, quente, após 24 horas. A reação química final processou-se com o resíduo de L6 e 4 mL de HNO₃ 14N por 24 horas. Durante esse período, os cristais de pirita reagiram com o HNO₃, liberando gas sulfídrico e NO₂ gasoso. Essa reação formou complexos catiônicos que se precipitaram em um composto amorfo e esbranquiçado. A solução final foi recolhida para a análise de Pb.

Nessa técnica, as soluções dos lixiviados foram evaporadas, solubilizadas com HCl*** (2N) e submetidas à separação do Pb com resina de troca iônica *Spec Sr* 50–100 µm (condicionada com HNO₃**). Após a secagem das soluções de cada lixiviado, o Pb foi coletado com auxílio de micropipeta e depositado em filamento de Re, previamente degaseificado a 1,8 A, com auxílio de 1 µL H₃PO₄ + 1 µL sílica gel e secas à corrente de 1,5 A. Em seguida, colocaram-se 2 µL de água *Milli-Q* no cadinho da amostra e retirou-se 1 µL

da solução que foi depositada em filamento e secada mais uma vez em 1,5 A, a fim de completar 2 μL da amostra sobre o filamento. As análises isotópicas de Pb foram realizadas em espectrômetro de massa de termo-ionização (TIMS) modelo *Triton Plus* do Laboratório Pará-Iso. Os cálculos de regressão e idade foram feitos com base no programa *Isoplot* (v.4.15) de Ludwig (2008). Os erros são apresentados a 2σ , que têm um nível de confiança de 95%.

1.5.6.6 Método Sm-Nd em rocha total

As amostras analisadas pelo método de dissolução de Pb em rocha total também foram analisados pelo método Sm-Nd em rocha total. Essas amostras foram trituradas com britadores de mandíbulas, quarteadas e pulverizadas a 100 *mesh*. O procedimento analítico para a separação de Sm e Nd em rocha total ocorreu de acordo com o protocolo experimental do Pará-Iso/UFGA, descrito por Oliveira *et al.* (2008). Para aplicação dessa metodologia, 100 mg de cada amostra foram misturadas com 100 mg de traçador misto ^{149}Sm - ^{150}Nd em um cadinho (bombas) de Teflon *Savillex*. A solução contendo a amostra e traçador passou por abertura química e dissolução utilizando os ácidos HNO_3^{**} , HCl^{**} 2N e HCl^{**} 6,2 N, na proporção de 2:1, agitadas em aparelho de micro-ondas por 30 minutos e aquecida a 100°C por 12 horas. A etapa seguinte consistiu em evaporar as soluções resultantes da abertura para extração dos elementos terras-raras (ETR), através de duas etapas.

Na primeira etapa, as colunas de resina catiônica *Dowex 50wx8* (200-400 mesh) foram purificadas com o uso de HCl^{**} 6,2N e HCl^{**} 2N. Os resíduos secos provenientes da etapa de abertura foram dissolvidos com a introdução de 100 μL de HCl^{**} 2N e inseridas nas colunas de separação e lavadas sucessivas vezes como o uso dos ácidos HCl^{**} 2N, para extrair os elementos Pb, Rb e Sr das amostras. Em seguida, utilizou-se HNO_3^{**} 3N para a coleta dos ETR das amostras. Essas soluções contendo ETR foram secas e os resíduos resultantes foram concentrados com 1 mL de HCl 2N e depositados em colunas de pó de teflon, contendo resina *Eichrom® Ln-Spec*, para a extração do Sm e Nd separadamente. Depois de sucessivas lavagens com HCl^{**} 6N, HCl^{**} 0,2N e HCl^{**} 0,3N, foi possível a coleta de Nd e Sm das amostras.

Uma mistura de 1 μL de HNO_3 + 1 μL de H_3PO_4 foi adicionada as soluções de Sm e Nd e postas para secar. Os concentrados finais foram misturados a 2 μL de sílica-gel. A análise do Sm e Nd foi realizada no espectrômetro de massa de termo ionização modelo *Triton Plus* do Laboratório Pará-Iso. O Nd foi depositado em um filamento de tântalo e o de Sm em um filamento de rênio. Na análise espectrométrica é empregado um arranjo de

filamento duplo, constituído de um filamento de evaporação, onde é feito o depósito de Sm ou Nd, e um filamento de ionização.

As razões isotópicas medidas do Nd são corrigidas do fracionamento de massa utilizando como parâmetro de normalização a razão $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,7219$ (Michard *et al.* 1985). Para a razão $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ utilizou-se a equação $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0,60847 \times [\text{Sm}(\text{ppm})/\text{Nd}(\text{ppm})]$. Para os cálculos da concentração de Nd e de ϵNd , foram utilizadas as constantes de $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0,512638$ (Wasserburg *et al.*, 1980) e $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0,1967$ (Jacobsen e Wasserburg, 1980). Os cálculos das idades-modelo (T_{DM}) foram obtidos pela equação de DePaolo (1988). Os diagramas e cálculos de isócronas foram realizados através do software ISOPLOT (v. 4.15), de Ludwig (2008), com erro de 2σ .

PARTE 2 ESTUDO ISOTÓPICO (Pb-Pb, U-Pb E Sm-Nd) DE ROCHAS METAVULCÂNICAS, MINERALIZAÇÕES AURÍFERAS E ROCHAS GRANITÓIDES RELACIONADAS AO *GREENSTONE BELT* TRÊS PALMEIRAS, VOLTA GRANDE DO XINGU, DOMÍNIO BACAJÁ (PA).

Isotopic Study (Pb-Pb, U-Pb and Sm-Nd) of metavulcanic rocks, auriferous mineralizations and granitoid rocks related with Três Palmeiras *Greenstone Belt*, Xingu Volta Grande, Bacajá Domain (Pa).

Luiz Carlo Ferreira de Cristo¹ (luyzcristo@gmail.com),

Moacir José Buenano Macambira¹ (moamac@ufpa.br),

Marco Antonio Galarza Toro¹ (antogt@ufpa.br),

¹Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica (PPGG) – UFPA

¹Rua Augusto Corrêa, 01 - Guamá, Belém - PA, 66075-110.

RESUMO

O *Greenstone Belt* Três Palmeiras localiza-se no noroeste do Domínio Bacajá, no estado do Pará. Descrições de afloramentos e amostras de furos de perfuração permitiram identificar três unidades litológicas principais: (1) uma sequência de rochas metavulcânicas máficas, representadas por metabasaltos, xistos máficos e restritos corpos de metagabros; (2) uma sequência de rochas metavulcânicas intermediárias, representadas por meta-andesitos porfíricos e rochas metavulcanoclásticas. Essas sequências são cortadas por (3) corpos de quartzo-diorito e granodiorito, que constituem o Granodiorito Oca, anteriormente datado em 2160 ± 3 Ma. A mineralização de ouro ocorre como micro inclusões em pirita e calcopirita e, mais raramente, em quartzo. Evaporação de Pb em zircão forneceu idades de 2417 ± 4 Ma e 2410 ± 7 Ma para meta-andesito e rocha metavulcanoclástica, respectivamente, enquanto o método U-Pb em zircão (LA-ICP-MS) forneceu a idade de 2416 ± 49 Ma para a rocha metavulcanoclástica, também confirmado pela isócrona de Sm-Nd em rocha total (2465 ± 17 Ma) para amostras de metabasalto e meta-andesito. Essas idades revelam a existência de rochas vulcânicas siderianas, mais antigas do que anteriormente registradas no Domínio Bacajá. Os dados isotópicos de Pb obtidos por lixiviação sequencial em piritas hospedadas em meta-andesito e quartzo-diorito forneceram idades de 2353 ± 43 Ma e 2146 ± 19 Ma, respectivamente, enquanto que a evaporação de Pb em partículas de ouro fornece a idade de 2189 ± 11 Ma. As idades determinadas em amostras de pirita e em partículas de ouro em rochas graníticas sugerem, pelo menos, duas gerações de pirita, e que a mineralização seria temporalmente relacionada à granitogênese Riacciana registrada no Domínio Bacajá. As análises isotópicas Pb-Pb em rocha total em amostras de meta-andesitos e metabasaltos indicam a idade de 2403 ± 92 Ma, com MSWD e erro muito alto, mas semelhante à obtida pelos outros métodos para a sequência greenstone. As idades do modelo NdT_{DM} de 2,49 a 2,39 Ga, e ϵNd (+2,03 a +3,63) indicam uma origem essencialmente do manto para as rochas metavulcânicas. Embora ainda faltem dados para uma melhor determinação, a integração de dados de campo, mineralógicos, isotópicos e geocronológicos sugere que o evento de mineralização ocorreu em cerca de 2,16 Ga ou depois, e provavelmente esteve relacionado ao Ciclo Transamazônico.

Palavras-chave: Mineralizações de ouro; isótopos; Pb; U-Pb; Sm-Nd; Paleoproterozoico; Ciclo Transamazônico.

ABSTRACT

The Três Palmeiras *Greenstone Belt* is located in the northwestern Bacajá Domain, in the Pará state. Descriptions of outcrops and drilling holes samples allowed to identify three main lithological units: (1) a sequence of mafic metavolcanic rocks, represented by metabasalts, mafic schists and restricted metagabbro bodies; (2) a sequence of intermediate metavolcanic rocks, represented by porphyritic meta-andesites and metavolcanoclastic rocks. These sequences are cut by (3) quartz-diorite and granodiorite bodies, which constitute the Oca Granodiorite, previously dated at 2160 ± 3 Ma. Gold mineralization occurs as microinclusions in pyrite and chalcopyrite and, more rarely, in quartz. Pb-evaporation on zircon provided ages of 2417 ± 4 Ma and 2410 ± 7 Ma for meta-andesite and metavolcanoclastic rock, respectively, whereas U-Pb (LA-ICP-MS) zircon method provided the age of 2416 ± 49 Ma for metavolcanoclastic rock, also confirmed by a Sm-Nd whole-rock isochron (2465 ± 17 Ma) for metabasalt and meta-andesite samples. These ages disclose the existence of Siderian volcanic rocks, older than previously recorded in Bacajá Domain. Pb-isotopic data from pyrite leachates hosted in meta-andesite and quartz-diorite provided ages of 2353 ± 43 Ma and 2146 ± 19 Ma, respectively, whereas Pb-evaporation on gold particles provides the age of 2189 ± 11 Ma. The ages determined in samples of pyrite and in gold particles in granite rocks suggest, at least, two pyrite generations, and that the mineralization would be related to the Rhyacian granitogenesis registered in the Bacajá Domain. Pb whole-rock isotopic analyzes in samples of meta-andesites and metabasalts indicate the age of 2403 ± 92 Ma, with very high MSWD and error, but similar to that obtained by the other methods for the *greenstone* sequence. The NdT_{DM} model ages of 2.49 to 2.39 Ga, and ϵNd (+2.03 to +3.63) indicate an essentially mantle origin for the metavolcanic rocks. Although data are still lacking for a better determination, the integration of field, mineralogical, isotopic and geochronological data suggest that the mineralization event occurred at about 2.16 Ga or after, and was most likely linked to metamorphic-deformational processes associated with the Transamazonian cycle.

Keywords: Gold mineralization; Pb; U-Pb and Sm-Nd isotopes; Paleoproterozoic; Transamazonian Cycle.

1. INTRODUÇÃO

A Sequência Três Palmeiras é constituída por rochas metavulcanossedimentares, paleoproterozoicas, com orientação WNW-ESE, subdividida, da base para o topo nas unidades Anfíbolito Itatá e Micaxisto Bacajá e que, segundo Jorge Joao *et. al* (2001) e Lobato *et al.* (1987), apresentam características geológicas, geoquímicas e petrográficas que sugerem tratar-se de uma sequência do tipo *greenstone belt*.

As unidades presentes na área do Projeto de Ouro Volta Grande correspondem a uma sequência de anfíbolitos (metabasaltos), xistos máficos e metagabros (Anfíbolito Itatá) e uma sequência de meta-andesitos e rochas metavulcanoclásticas (Micaxisto Bacajá). Essa sequência é cortada por corpos de quartzo-dioritos e granodioritos, os quais hospedam as mineralizações de ouro. Apesar do potencial aurífero desses depósitos, ainda não há estudos que *caracterizem a geologia dos depósitos* ou que determinem as possíveis fontes e idade das mineralizações. Sabe-se apenas que a mineralização hospeda-se em rochas graníticas hidrotermalmente alteradas e que na zona mineralizada é observado um grande volume de venulações de quartzo.

Este trabalho tem por objetivo determinar a relação temporal e genética das mineralizações auríferas registradas na área do Projeto de Ouro Volta Grande com as sequências vulcanossedimentares que formam o *Greenstone Belt* Três Palmeiras, bem como

com os granitoides intrusivos. Esse objetivo apresenta um interesse de caráter prospectivo, considerando que as características do ouro nos depósitos do projeto, como tamanho dos grãos, modo de ocorrência, associação mineral, textura do ouro, idades e fontes podem nortear futuros trabalhos de prospecção.

1.1 Métodos analíticos

1.1.1 Dissolução de Pb em rocha total

Duas amostras de anfibolitos/metabasaltos (AFN-01 e AFN-02) e três de meta-andesitos (DP-02, DP-03 e MSV-02) forma fragmentadas, quarteadas e pulverizadas a 100 *mesh*. Cerca de 400mg de cada amostra sofreram ataque ácido HF** (48%) + HBr*** (8N) em duas etapas de digestão: uma a frio, por 7 horas, e outra a quente (100°C), por 12 horas. As amostras foram evaporadas, solubilizadas com HCl*** (2N), submetida à separação por cromatografia de resina de troca iônica *Eichrom Sr 50-100 μm* (condicionada em meio ácido). O Pb foi eluído da coluna de resina usando-se HCl*** (6N) e evaporados com H₃PO₅ (0,125N). Na sequência, as amostras foram misturadas a 4 mL de sílica gel e depositados em monofilamentos de Re em espectrômetro de massa termo induzido (TIMS) modelo *Triton Plus* do Laboratório de Geologia Isotópica da Universidade Federal do Pará (Pará-Iso). Os diagramas e cálculos das isócronas seguiram o modelo de York (1969) através do programa ISOPLOT versão 3.68 de Ludwig (2008) e apresentados com desvio de 2σ.

1.1.2. Lixiviação de Pb em pirita

Aproximadamente 300 mg de pirita em amostras de quarto-diorito e de meta-andesito forma parcilmente dissolvidas e utilizadas para produzir soluções sobrenadantes, coletadas em seis etapas de lixiviação (L1-L6), mais um estágio de dissolução total específico para o resíduo resultante. Os procedimentos foram modificados de Frei e Kamber (1995) e adaptado as condições do Pará-Iso. Os resíduos foram dissolvido com HCl*** (2N) e separado com resina de troca iônica *Spec Sr 50- 100 μm* (condicionada com HNO₃**). O chumbo das amostras foi precipitado com HCl (6N), concentrado com 1 μL H₃PO₄ + 1 μL sílica gel e depois depositado em filamento de Re para análise em espectrômetro de massa termo ionização (TIMS) modelo *Triton Plus* do Laboratório Pará-Iso.

1.1.3. Evaporação de Pb em ouro

As análises de isótopos de Pb partículas extraídas de amostras provenientes dos depósitos Grota Seca, Ouro Verde, Itatá e Pequi, sendo uma de cada depósito seguindo o procedimento descrito por Krymsky (2002). A separação das partículas de ouro empregou-se as mesmas técnicas utilizadas para a separação de cristais de zircão. Após a lavagem sucessiva com HF (10N), HCl (6N), HNO₃ (14N) e H₂O (Milli-Q), as partículas de ouro foram fixadas diretamente em um monofilamento de renio com 2 μl de sílica gel, depois analisados no espectrômetro de massa Finningan MAT 262 do Laboratório Pará-Iso, por meio de evaporação e ionização direta a temperatura constante de 1250°C.

1.1.4. Evaporação de Pb em zircão

O método de evaporação de Pb em monocristal de zircão seguiu os procedimentos descritos por Kober (1986), adaptados as condições do Pará-Iso. A extração dos cristais de zircão seguiu a sistemática tradicional com trituração, pulverização e peneiramento das amostras; separação de minerais pesados por bateamento em álcool etílico e susceptibilidade magnética; seleção dos cristais em estereomicroscópio. As análises isotópicas foram feitas no espectrômetro de massa Finningan MAT 262, o tratamento estatístico dos resultados

analíticos, os cálculos das idades médias e dos desvios foram baseados em Gaudette *et al.* (1998). Nessa técnica, cada cristal de zircão é colocado em um filamento de rênio e submetido a três etapas de evaporação, em diferentes temperaturas (1450°C, 1500°C e 1550°C), durante 5 min., cada etapa. O Pb liberado durante a evaporação é fixado em um segundo filamento, de ionização, que é aquecido a temperatura de 1050°C. Durante o aquecimento deste filamento são analisadas, no espectrômetro, as intensidades das emissões dos diferentes isótopos de Pb. Os dados obtidos por esse aquecimento são representados em diagrama Idade (Ma) *vs.* blocos de dados, onde cada etapa de evaporação/ionização fornece uma idade. Para a obtenção das médias das idades, são desprezados blocos e etapas de razões isotópicas com $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ maiores que 0,0004 e os blocos com desvios superiores a 2σ em relação à média obtida para as idades dos cristais de zircão analisados em cada amostra. Além disso, elimina-se, de forma subjetiva, todos os resultados de blocos/etapas/cristais com “idades” discordantes da média das idades obtidas em cada etapa de evaporação.

1.1.5. U-Pb em zircão por LA-ICP-MS

Após a extração dos cristais de zircão (ver item 1.1.4), as análises isotópicas pontuais de U e Pb por LA-ICP-MS foram precedidas da obtenção de imagens por catodoluminescência de cada cristal em microscopia eletrônica de varredura (MEV). A análise isotópica dos elementos U e Pb e determinação das concentrações desses elementos por LA-ICP-MS são realizadas de forma pontuais em cada cristal, com alternância de material de referência (zircão padrão GJ-1) para a determinação das concentrações e controle da qualidade analítica. A redução dos dados analíticos é feita em programas específicos para a obtenção das razões isotópicas $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$, $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ e $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ e seus respectivos erros, após correção de Pb comum e de fracionamento isotópico. O tratamento dos dados e os cálculos da idade são realizados em diagramas geocronológicos Concórdia, com auxílio do programa ISOPLOT/EXCEL de Ludwig (2008).

1.1.6. Sm-Nd em rocha total

Duas amostras de anfibolitos/metabasaltos (AFN-01 e AFN-02) e três de metaandesitos (DP02, DP-03 e MSV-02) forma fragmentadas, quarteadas e pulverizadas a 100 *mesh*. Cerca de 400mg de cada amostra sofreram ataque ácido HNO_3^{**} , HCl^{**} 2N e HCl^{**} 6,2 N, agitadas em aparelho de micro-ondas. Em seguida, foi realizada a separação química em duas etapas, utilizando-se colunas de cromatografia de troca iônica. Na primeira coluna é feita a separação dos elementos terras raras dos demais elementos maiores pela sucessiva aplicação de HCl^{**} 2N e HNO_3^{**} 3N. Na segunda coluna é feita a separação de Sm e Nd dos elementos terras raras após sucessivas lavagens com HCl^{**} 6N, HCl^{**} 0,2N e HCl^{**} 0,3N. A análise é realizada por espectrometria de massa de termo ionização modelo Triton Plus do Laboratório Pará-Iso, sendo que o depósito de Nd é feito em filamento de Ta e o de Sm em filamento de Re. Na análise química é empregado um arranjo de filamento duplo, constituído de um filamento de evaporação, onde é feito o depósito de Sm ou Nd, e um filamento de ionização. As razões isotópicas medidas do Nd são corrigidas para o fracionamento de massa utilizando como parâmetro de normalização a razão $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,7219$. Os cálculos das idades-modelo foram feitos com base na curva de evolução do manto empobrecido de DePaolo (1981).

2. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

O Domínio Bacajá está localizado na porção sudeste do Cráton Amazônico e representa o segmento meridional da Província Maroni-Itacaiúnas (Tassinari e Macambira, 1999, 2004) e/ou corresponde a parte da porção sul da Província Transamazônica de Santos *et*

al. (2000, 2003) (Figura 1). Apresenta orientação geral WNW e cerca de 150 km de extensão (Ricci *et al.*, 2003). Esse domínio é composto por uma série de fragmentos arqueanos e siderianos retrabalhados no Riáciano e registra litotipos como granitoides de arcos magmáticos continentais riácianos, granitoides e rochas charnoquíticas, relacionados a estágios sin- (2,11-2,09 Ga) e pós-colisionais (2,08-2,06 Ga) da orogenia riáciana, sequências de rochas supracrustais, gnaisses, migmatitos e granulitos (Macambira *et al.*, 2003; Ricci *et al.*, 2003; Vasquez & Rosa-Costa, 2008; Macambira *et al.*, 2009). Vasquez *et al.* (2008a) definem o metamorfismo da porção oeste do Domínio Bacajá como de fácies granulito, baseado em feições de migmatização e nas paragêneses minerais. Idades obtidas pela metodologia U-Pb em monazita e zircão sugerem que a migmatização tenha ocorrido em condições de fácies anfíbolito. O metamorfismo de fácies granulito seria relacionado ao espessamento crustal e um segundo evento de metamorfismo da fácies granulito estaria relacionado ao adelgaçamento crustal, em condições de baixa pressão. Datações de cristais de zircão (evaporação de Pb e U-Pb), comprovam que o Domínio Bacajá evoluiu, principalmente, durante o Ciclo Transamazônico, com a identificação de rochas riácianas (2,21-2,07 Ga), arqueanas e siderianas (Vasquez *et al.*, 2008; Macambira *et al.*, 2009).

3. GEOLOGIA LOCAL

Na área de estudo (Figura 2) foi reconhecida uma sequência de rochas metavulcânicas, com metavulcanoclásticas (tufos vulcânicos) associadas, que afloram às margens dos rios Xingu e Itatá, em forma de blocos e matacões. Também foram estudados os litotipos observados em testemunhos de furos de sondagem cedidos pela empresa Belo Sun Mining Corp. Os litotipos identificados constituem-se de rochas meta-ígneas formadas por anfíbolitos (metabasaltos), metagabros, xistos máficos, meta-andesitos porfiríticos e tufos vulcânicos. Localmente, é observada a ocorrência de enclaves de rocha máfica, caracterizada como metagabro, em meio aos anfíbolitos. Essas rochas são seccionadas por corpos de rochas plutônicas, vênulas e veios de quartzo associado com calcita e uma variedade de sulfetos (de Cu, Mo, Fe, Zn etc.).

As rochas plutônicas são compostas por granodioritos e quartzo-dioritos, que são reconhecidos como corpos constituintes do Granodiorito Oca, de idade paleoproterozoica (2160 ± 3 Ma; Vasquez, 2006). Essas rochas ocorrem de forma restrita na área, apresentando-se moderadamente foliados. Lateralmente observa-se que essas rochas mudam de granitoides foliados para granitoides milonitizados, com porfiroclastos/fenocristais imersos em uma matriz fina e recristalizada, conferindo-lhes um aspecto gnáissico. O processo hidrotermal é evidenciado pela presença de veios de quartzo, clorita, variados sulfetos, epidoto, biotita e carbonatos.

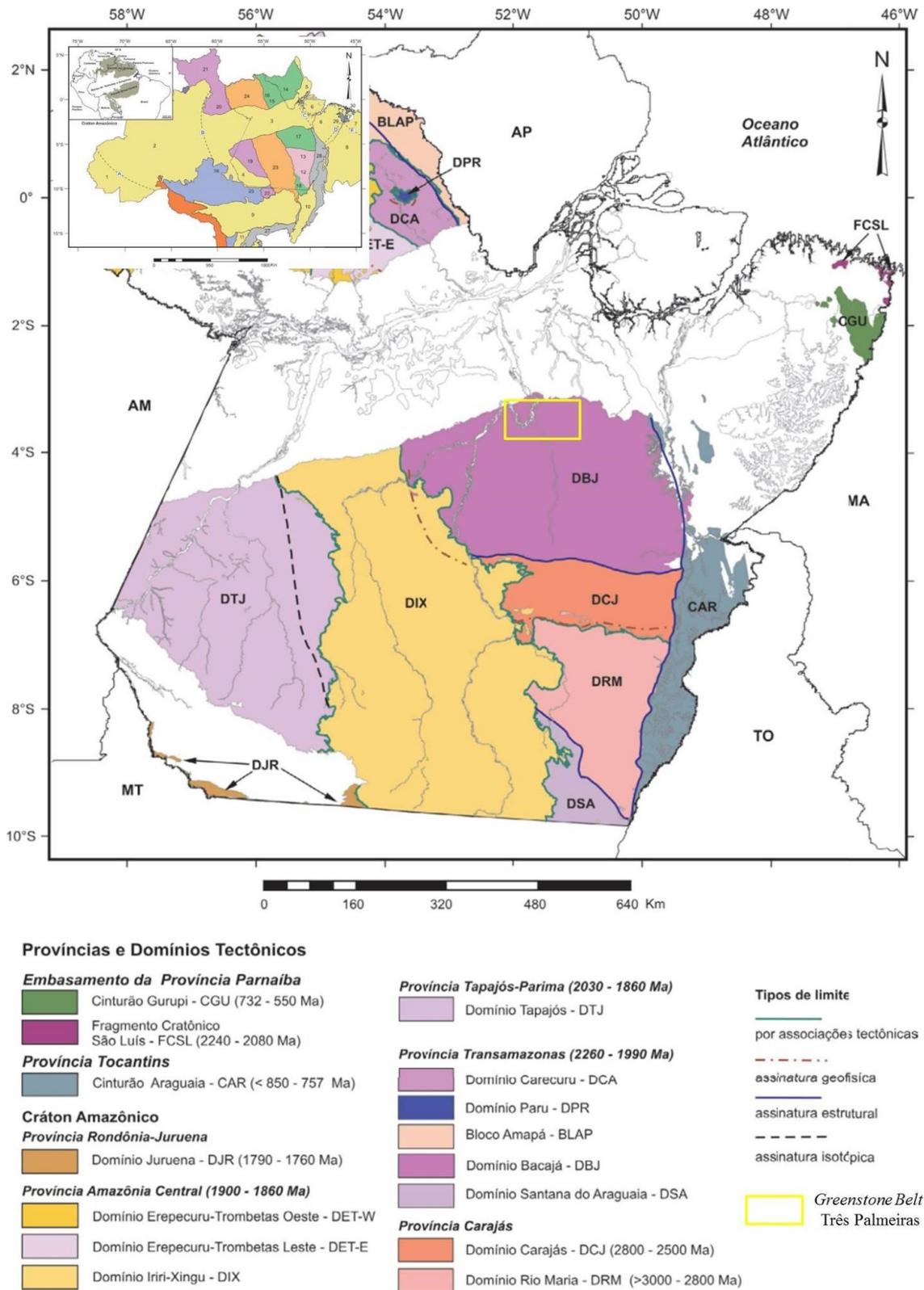


Figura 1: Províncias e domínios tectônicos do estado do Pará. Em destaque, o *Greenstone Belt* Três Palmeiras. Fonte: Vasquez e Rosa-Costa, (2008).).

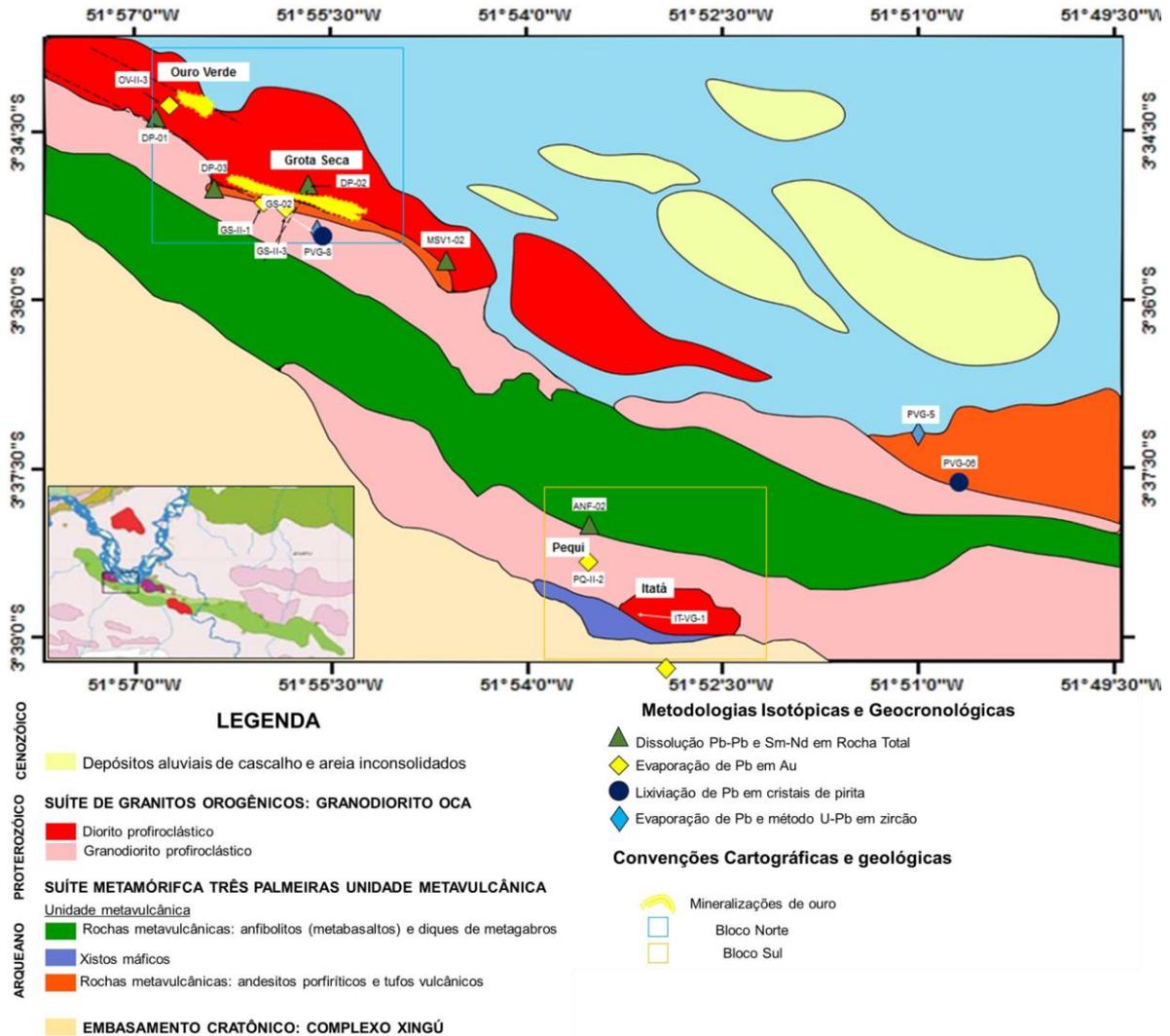


Figura 2: Mapa geológico da área de estudo, com indicação da área do Projeto de Ouro Volta Grande. O mapa mostra os blocos Norte (parte superior, a esquerda) e Sul (parte inferior, ao centro) e as metodologias aplicadas aos litotipos estudados. Adaptado de Vasquez & Rosa-Costa (2008) e Belo Sun Mining Corp. (2011).

3.1. Anfibolitos (metabasaltos)

Os anfibolitos (metabasaltos) predominam na área estudada e afloram ao longo de margens de rios. São rochas de cor preta, granulação fina a média e intensa foliação milonítica. Microscopicamente exibem textura nematoblástica, marcada pela orientação de cristais de anfibólio e plagioclásio, que definem uma foliação contínua, de caráter milonítico a qual desenvolve micro-laminações composicionais, caracterizadas pela alternância de faixas irregulares de plagioclásio e hornblenda (Figura 3) e exibem granulação fina e equigranular. Essas rochas são compostas modalmente por $\approx 75\%$ de hornblenda, $\approx 23\%$ de plagioclásio do tipo andesina (An_{40}), $\approx 1\%$ de quartzo e $\approx 1\%$ de minerais opacos, como fase acessória. Os raros cristais de biotita observados constituem a fase de alteração, com conteúdo modal inexpressivo.

A hornblenda, mineral predominante, exibe forte pleocroísmo em cores verde oliva-verde azulado. Formam cristais que variam entre 0,5 e 1,2 mm. Localmente formam porfiroclastos, que atingem até 1,6 mm. Variam diversos cristais exibem maclamento e contatos interlobados a curvilíneos. Esses cristais, por exibirem um aspecto fortemente

elongados, constituem a foliação da rocha. O plagioclásio forma cristais finos, raramente maclados. Diversos cristais exibem uma superfície livre de maclas, onde se percebe uma marcante extinção ondulante. Constitui agregados granoblásticos estirados, com quartzo subordinado, dispostos em lamelas lenticulares anastomosadas, ao longo da foliação milonítica.

3.2. Metagabros

As rochas desse litotipo ocorrem na porção NW da área estudada, associadas a corpos de metabasaltos, seccionando-os. Esse litotipo foi descrito apenas em furos de sondagem, de modo que sua real extensão é desconhecida. São rochas mesocráticas a melanocráticas, maciças, de cor cinza a cinza escuro, faneríticas de granulação média a grossa, inequigranulares. Ao microscópio, são caracterizadas a textura intergranular subofítica, de granulação predominantemente grossa (Figura 3B). Essas rochas são compostas essencialmente por hornblenda e plagioclásio. A hornblenda ocorre como fenocristais, de cor verde escuro, com tamanho médio de 3 e 4,5 mm, enquanto o plagioclásio (andesina - An₄₈), forma cristais subédricos e *ripiformes*, que variam de 1,9 a 2,1 mm. Como minerais acessórios ocorrem minerais opacos, apatita e zircão. Epidoto ocorre como produto de alteração do plagioclásio.

3.3. Xistos máficos

São rochas que ocorrem associadas a corpos de anfibolito (metabasalto), apresentam composição mineralógica parecida a desses litotipos e registram uma deformação milonítica de maior intensidade. São constituídas por anfibólitos cálcicos (hornblenda e actinolita subordinada) e plagioclásio do tipo andesina (An₃₈). A textura principal é nematoblástica milonítica média, definida pela orientação de cristais oclares de hornblenda e actinolita, que são envolvidos por cristais de plagioclásio em um arranjo anastomosado (Figura 4A). De forma subordinada, ocorre a textura blastoporfirítica, definida pela ocorrência localizada de porfiroclastos de Ca-anfibólitos prismáticos envolvidos pela foliação milonítica (Figura 4B). Minerais opacos (pirita, calcopirita) e titanita são acessórios inclusos nos anfibólitos, enquanto a clorita ocorre como produto de alteração dos Ca-anfibólitos. São classificados como plagioclásio-actinolita-hornblenda xistos miloníticos. Os anfibólitos cálcicos são representados pela hornblenda, como o mineral mais abundante desse litotipo ($\approx 72\%$), que forma cristais subédricos de cor verde-claro, variando entre 1,7 e 2,4 mm. A actinolita ($\approx 20\%$), forma cristais fibrosos, verde-pálidos, que variam de 1 e 3 mm. O plagioclásio ($\approx 8\%$) forma cristais ripiformes, que variam entre 0,5 e 1,0 mm, pouco orientados. Altera-se para sericita e raros cristais de epidoto.

3.4. Meta-andesitos

Os litotipos reconhecidos como meta-andesitos ocorrem, predominantemente, no Bloco Norte, no qual formam raros afloramentos de cortes de estrada e lajedos. São rochas de cor cinza a cinza claro, porfiríticas, de granulação média. Localmente, exibem moderada foliação milonítica. Microscopicamente, apresentam textura porfirítica a glomeroporfirítica, caracterizada por fenocristais de plagioclásio e Ca-anfibólito, que variam de 3,1 a 4,2 mm, imersos em uma matriz afanítica, exibindo arranjo textural traquítico (Figura 5). Essas rochas são constituídas essencialmente por plagioclásio do tipo andesina (An₃₅ $\approx 72\%$) e quartzo ($\approx 13\%$). Seus minerais máficos são anfibólito ($\approx 7\%$) e biotita ($\approx 5\%$). Zircão, apatita, titanita e minerais opacos ocorrem como acessórios, enquanto a clorita ocorre como alteração de anfibólitos e biotita.

O plagioclásio forma fenocristais ripiformes a prismáticos, subédricos, e frequentemente apresenta zoneamento oscilatório, com alteração fraca a moderada para sericita e argilo-minerais. O quartzo forma cristais finos a médios, policristalinos anédricos, granulares, intersticiais, moderadamente orientados e deformados, em forma de lamelas alongadas. O anfibólio (hornblenda) forma cristais subédricos de cor verde escuro, com fraco pleocroísmo, variando entre 0,5 e 2,3 mm. Localmente, apresenta maclamento simples e exibe inclusões de zircão, minerais opacos e titanita. A biotita ocorre sob a forma de delgadas lamelas (0,5 a 1,0 mm), de cor marrom alaranjado, fortemente orientada. Exibe inclusões de zircão, epídoto e minerais opacos. Os minerais opacos ocorrem na forma de cristais granulares, anédricos de 0,7 a 1,8 mm, associados a cristais de hornblenda. À luz refletida são identificados, predominantemente, como pirita, arsenopirita e galena.

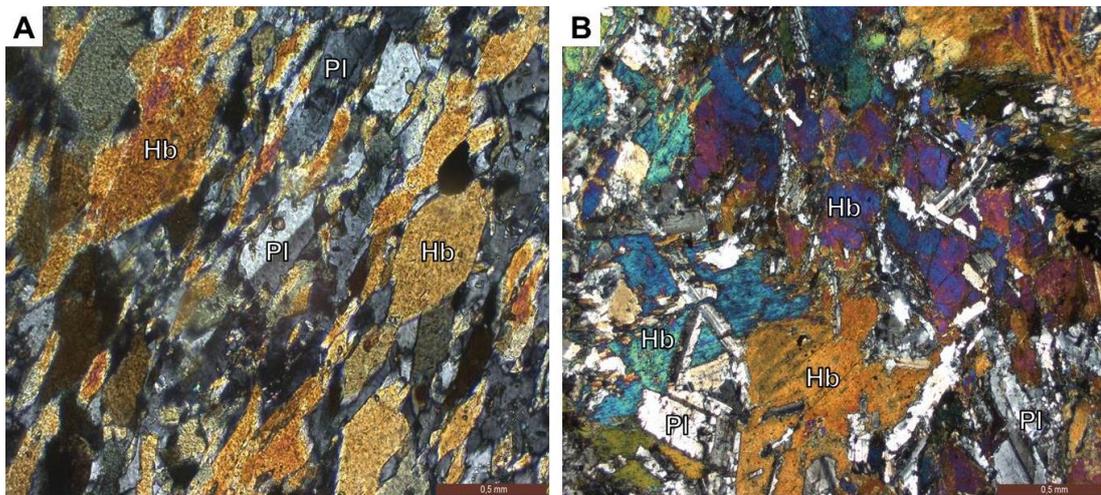


Figura 3: Fotomicrografias de rochas do *Greenstone Belt* Três Palmeiras. A) Anfibolito (metabasalto) exibindo foliação contínua, de caráter milonítico, desenvolve micro-laminações composicionais de faixas irregulares de plagioclásio (Pl) e hornblenda (Hb). B) Metagabro caracterizado pela textura intergranular subofítica grossa. Esse litotipo é composto, essencialmente, por cristais de hornblenda (Hb) e plagioclásio (Pl).

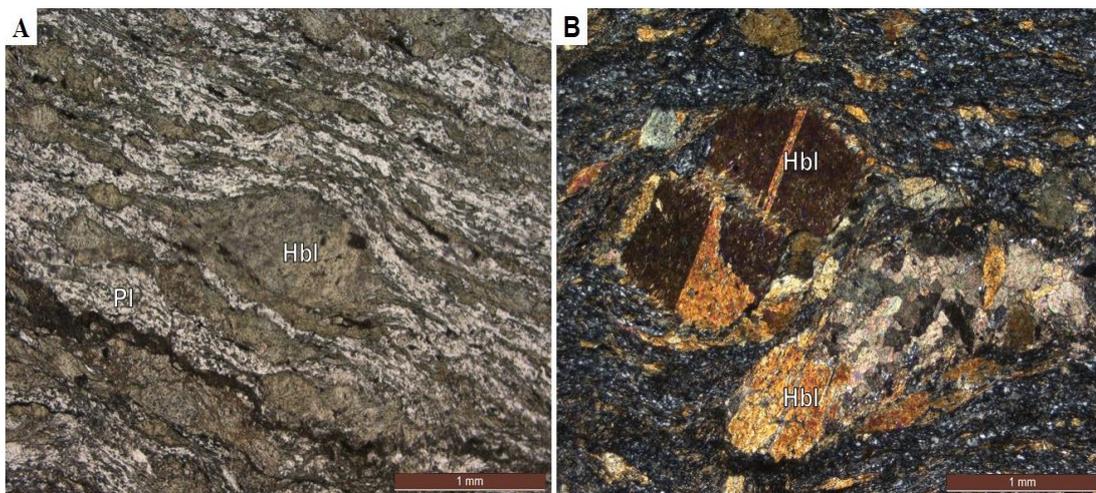


Figura 4: Fotomicrografias de xistos máficos do *Greenstone Belt* Três Palmeiras. (A) Arranjo microtextural milionítico ressaltado pelos cristais oclares de hornblenda (Hb), contornados por cristais de plagioclásio (Pl), em um arranjo anastomosado. (B) Porfiroclastos de

hornblenda envoltos por matriz nematoblástica definida pela orientação de cristais menores de anfibólios cálcicos (hornblenda e actinolita).

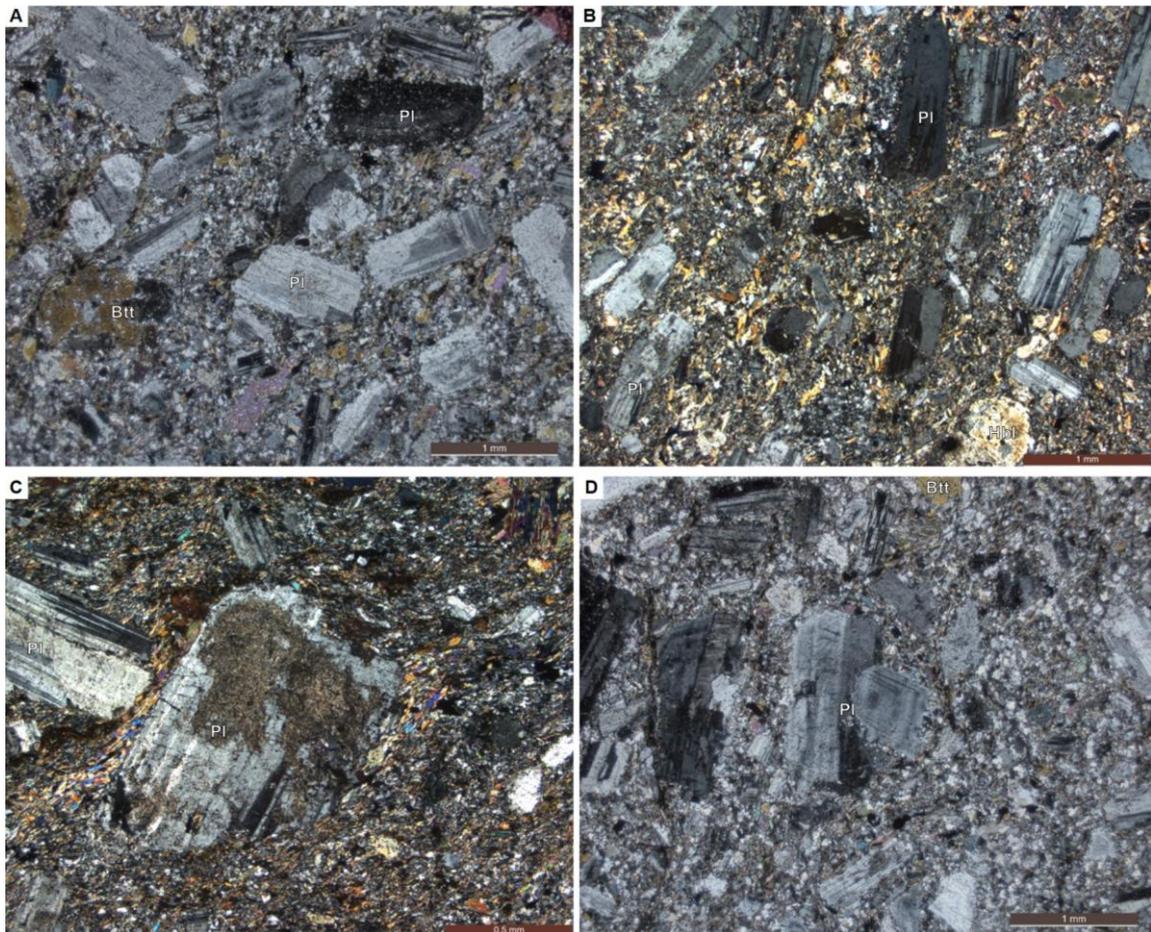


Figura 5: Fotomicrografias exibindo as principais texturas de meta-andesito porfiriticos do Greenstone Belt Três Palmeiras. A) Textura glomeroporfírica de cristais de plagioclásio (Pl); B) Textura traquítica incipiente, marcada pela orientação de plagioclásio e micas; C) Alteração hidrotermal em plagioclásio; D) Fenocristais de plagioclásio com zoneamento concêntrico.

3.5. Rochas metavulcanoclásticas

São rochas de granulação fina, de cor cinza-esbranquiçado, com tons avermelhados. Afloram no Bloco Norte e exibem fenocristais suportados por matriz estratificada, e milonitizada, com minerais estirados, marcando sua foliação. Microscopicamente, apresentam textura porfírica a glomeroporfírica. Essas rochas caracterizam-se pela grande proporção de porfiroclastos, ocasionalmente poiquilíticos, de hornblenda, plagioclásio (sem maclas), quartzo e biotita, que juntos constituem cerca de 70% da rocha. A matriz, de textura afanítica, provavelmente composta pelos mesmos minerais que constituem os fenocristais, corresponde aos outros 30% (Figura 6). Foram identificados também raros e diminutos cristais de epidoto primário. Titanita, zircão e minerais opacos ocorrem como acessórios. Argilominerais, epidoto e clorita ocorrem como produtos de alteração.

A hornblenda ocorre na forma de cristais subédricos, de cor verde pálido, com cerca de 0,5 mm de diâmetro, podendo constituir glomeros com inclusões de minerais opacos. O plagioclásio forma fenocristais irregulares, prismáticos, fracamente deformados, cujas bordas

apresentam-se irregulares. O quartzo forma cristais de até 1,4 mm, policristalinos, fortemente orientados. Cristais microcristalinos ocorrem como constituintes da matriz. A biotita ocorre em minúsculas palhetas disseminadas pela matriz ou em plaquetas formando agregados juntamente com a hornblenda e epidoto; raramente aparece como sombra de pressão nas bordas dos fenocristais de quartzo e plagioclásio.

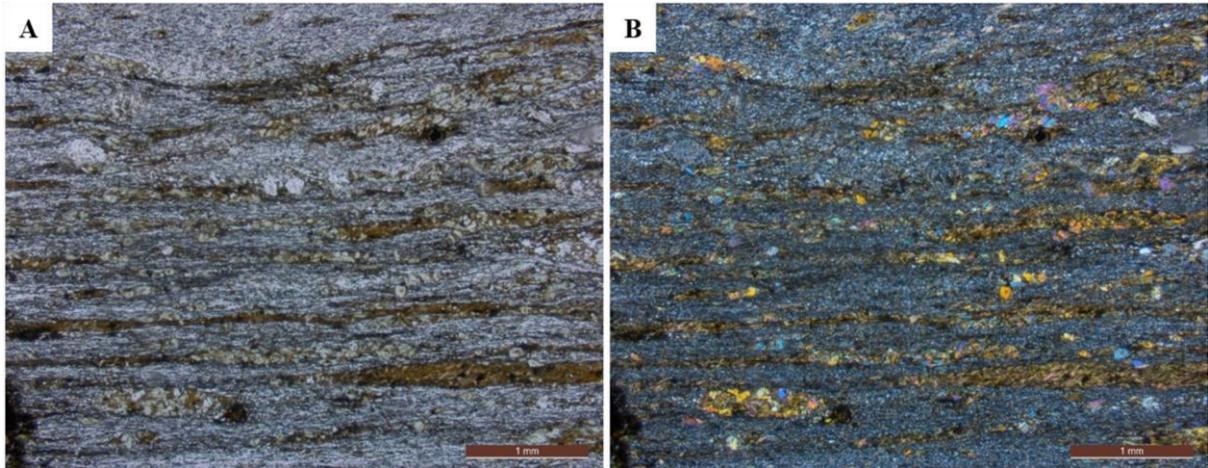


Figura 6: Fotomicrografias de rochas metavulcanoclásticas do *Greenstone Belt* Três Palmeiras. Rocha intensamente deformada com porfiroclastos de plagioclásio amendoados, com quartzo subordinado e bandas de biotita e hornblenda. A) Luz Natural; B) Luz Polarizada.

3.6. Granodioritos

São rochas de cor cinza a cinza-rosada, de granulação grossa a média, constituídas por plagioclásio, quartzo e feldspato posição subordinado. Esses litotipos foram observados apenas no Bloco Norte, sob a forma de lajedos. Apresentam trama ígnea, em geral, preservada, pouco a moderadamente recristalizada. Comumente apresentam profiroclastos ovulados de plagioclásio, imersos em uma matriz fina, provavelmente resultado de processos deformacionais. Por vezes exibem fraca foliação milonítica. Microscopicamente, caracterizam-se como rochas anisotrópicas, inequigranulares e exibem texturas hipidiomorfa e milonítica. Essas rochas são compostas modalmente por ≈ 55 a 66% de plagioclásio do tipo andesina (An_{40}), ≈ 26 a 29% de quartzo, microclino (≈ 4 e 6% , quando ocorre) e biotita ($\approx 3\%$). Minerais opacos, allanita, apatita e zircão (2% ao todo) constituem as principais fases acessórias, enquanto epidoto e titanita são produtos de alteração.

O plagioclásio ocorre sob a forma de fenocristais prismáticos subédricos, de tamanho entre 2 e 4,3 mm, podendo até mesmo formar agregados. Alguns cristais ocorrem zonados, feição evidenciada pela alteração para sericita e epidoto nos núcleos desses cristais (Figura 7A). Também são observados cristais sem maclas (Figura 7C), deformados. O quartzo ocorre na forma de cristais anédricos, policristalinos, inequigranulares a intersticiais. São observados cristais estirados segundo a foliação milonítica da rocha, ao entorno de porfiroclastos de plagioclásio (Figura 7B). As feições deformacionais observadas foram extinção ondulante, formação de subgrãos e de cristais policristalinos. O microclino ocorre, principalmente, sob a forma de cristais prismáticos, límpidos, subédricos a anédricos, de granulação fina e média. Poucos cristais ainda exibem maclamento carlsbad e textura pertítica. A biotita forma lamelas de granulação média, moderadamente orientada e associam-se com a hornblenda e epidoto, contornando fenocristais de plagioclásio (Figura 7D). Exibem inclusões de zircão, allanita, apatita e minerais opacos. O epidoto forma cristais subédricos, finos a médios, associado à

biotita. Ocorrem, ainda, como cristais anédricos muito finos, produto de alteração de plagioclásio.

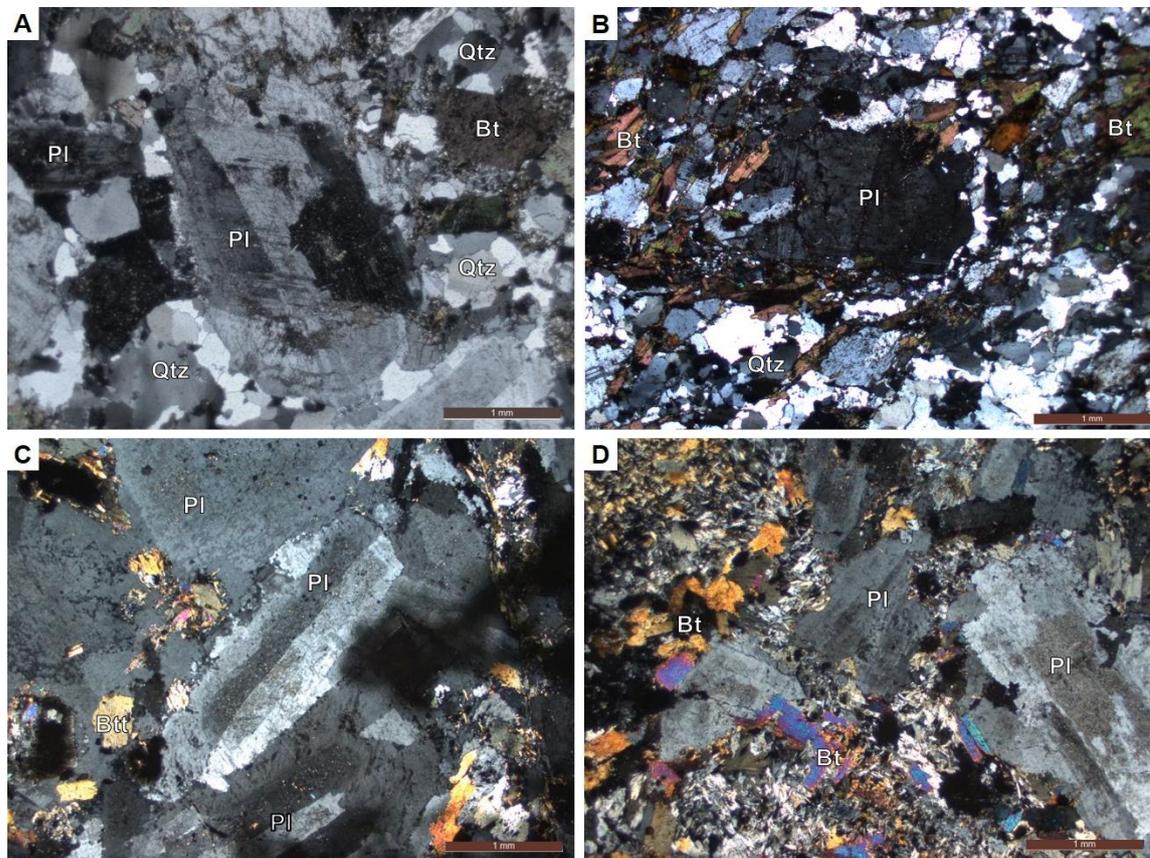


Figura 7: Fotomicrografias do granodiorito intrusivo no *Greenstone Belt* Três Palmeiras. A) Fenocristais semi-ovalados de plagioclásio (Pl) imersos em matriz granular fina; B) foliação milonítica, marcada por lamelas de biotita (Bt) e cristais anédricos de quartzo (Qtz) em arranjo granolepidoblástico; C) cristal subédrico de plagioclásio com indícios de zoneamento normal e composicional; D) agregados de biotita.

3.7. Quartzo-dioritos

São rochas de cor rosa, com granulação média, textura inequigranular e caráter anisotrópico. São constituídas por plagioclásio e quartzo, com proporções médias de 71% e 28%. A biotita ocorre com proporções menores que 9% e os minerais opacos ocorrem como acessórios. Microscopicamente, exibem uma trama mineral com sinais de recristalização, milonitização, estiramento mineral e foliação (Figura 8A). Minerais opacos, apatita e zircão ocorrem como acessórios. A titanita ocorre como produto de alteração da biotita.

Os fenocristais de plagioclásio são subédricos, com cristais que variam entre 2 e 3 mm podendo formar agregados e preservam suas feições ígneas originais. Ocorrem bordados por uma trama policristalina recristalizada (Figura 8B e 8C). Exibem ainda geminações albita ou albita-carlsbad e alteração para argilominerais e sericita. O quartzo ocorre de duas formas: (1) agregados de grãos recristalizados, de granulação média a fina, com extinção ondulante, podendo bordar fenocristais de plagioclásio; (2) cristais estirados em *ribbons*, orientados segundo a foliação da rocha (Figura 8C). A biotita ocorre em lamelas subédricas de granulação fina, alongadas, moderadamente orientadas, definindo a foliação da rocha e,

localmente, ocorre ao redor de fenocristais de plagioclásio (Figura 8D). Ao longo dos seus planos de clivagem, mostra localmente alteração para titanita.

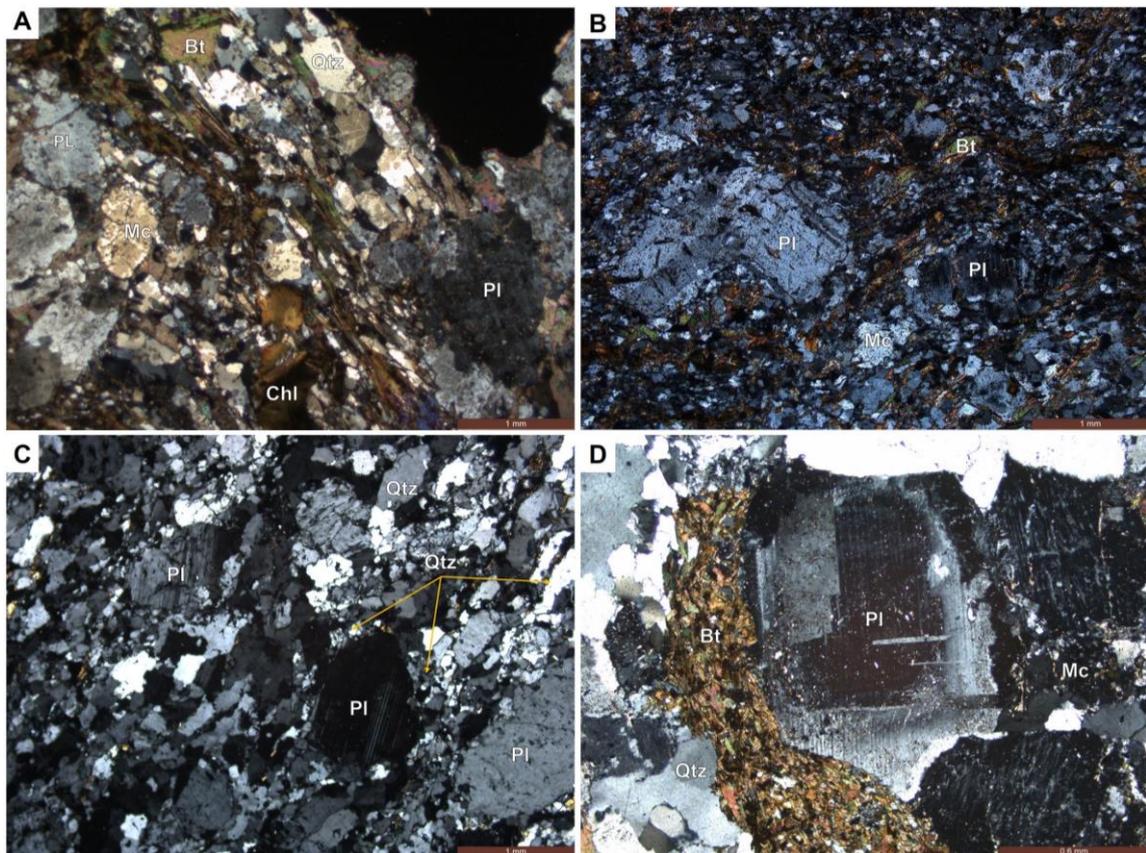


Figura 8: Fotomicrografias de amostras de quartzo-diorito intrusivo no *Greenstone Belt* Três Palmeiras. A) Arranjo geral do litotipo com forte foliação milonítica e porfiroclastos de plagioclásio e microclina. B) Profiroclastos deformados de plagioclásio (Andesina), com maclamento albita-carlsbad. C) Leitões de quartzo recristalizado, formando sombra de deformação próxima a porfiroclastos de plagioclásio. D) Lamelas de biotita bordejando porfiroclastos de plagioclásio. Plagioclásio (Pl); Quartzo (Qtz); Microclina (Mc); Biotita (Bt); Clorita (Chl).

3.8. Ouro em quartzo-diorito e granodiorito

A mineralização está associada a veios a quartzo-sulfetos (arsenopirita, pirita e calcopirita) que penetram corpos de quartzo-dioritos e granodioritos. Nos porcoes desses corpos onde ocorrem as mineralizações, percebe-se que os mesmos estão parcialmente obliterados. Amostras de furos de sondagem das porções mineralizadas foram coletadas para estudos petrográficos e mineralógicos. O imageamento por meio de MEV-EDS em seções polidas favoreceu o reconhecimento de uma assembleis mineral associado às zonas mineralizadas, com destaque especial para a arsenopirita (30%), pirita (23%), calcopirita (20%), esfalerita (13%), galena (8%) e molibdenita (4%). Nas amostras de rochas graníticas estudadas, o ouro ocorre como inclusões em cristais de pirita e arsenopirita. De forma subordinada, partículas de ouro são observadas inclusas em cristais de quartzo, nas porções mais silicificadas dessas rochas. Ao microscópio eletrônico, observa-se que o ouro forma grãos menores que 5 μm (Figura 9). Localmente observa-se uma possível associação entre partículas de ouro e prata, inclusas em cristais de pirita. A análise modal feita nessas amostras

indica que, *ca.* de 90% do ouro ocorre associado a sulfetos, enquanto 10% ocorre incluso em cristais de quartzo. Os demais minerais observados somam 2%, dos quais destacam-se: titanita, bismutinita, magnetita, monazita, wolframita, uraninita, thorianita, stibiotantalita e argentita.

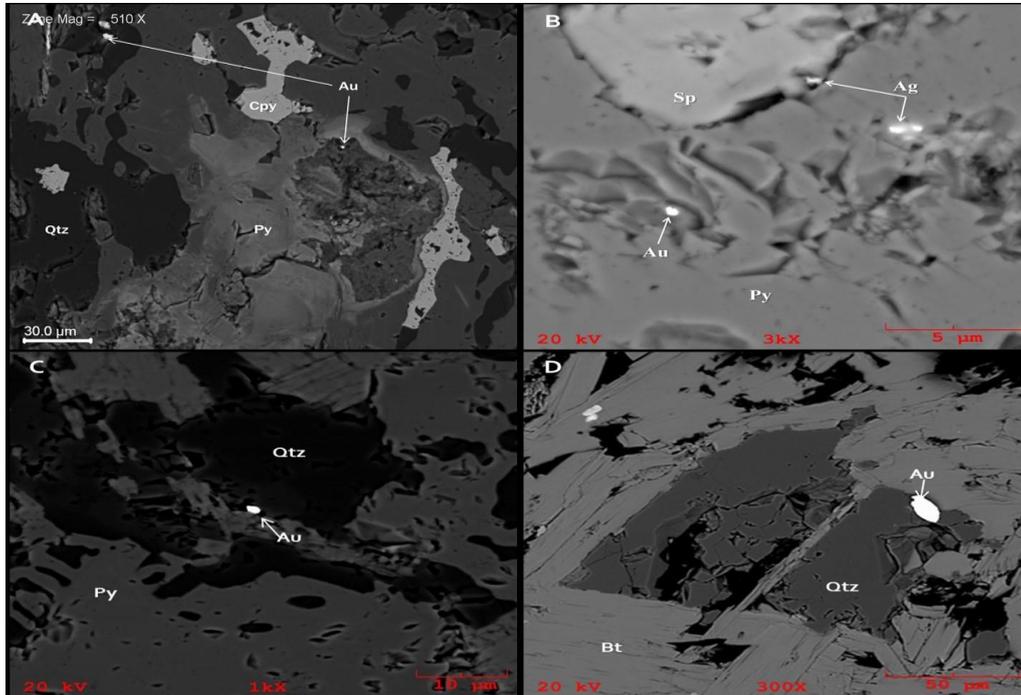


Figura 9: Imagem em MEV-EDS de amostras dos alvos Grota Seca e Ouro Verde (Bloco Norte) e Itatá e Pequi (Bloco Sul), respectivamente de A a D, do Projeto Volta Grande. (A) Ocorrência de ouro (Au) incluso em cristais de pirita (Py) e quartzo (Qtz); (B), em cristais de pirita, associado a partículas de prata (Ag); (C) no contato entre quartzo e pirita; (D) e incluso em cristal de quartzo.

5. GEOCRONOLOGIA E GEOQUÍMICA ISOTÓPICA

As metodologias isotópicas Pb-Pb e Sm-Nd em rocha total foram aplicadas em seis amostras de rochas total dos dois principais litotipos vulcânicos (metabasaltos e meta-andesitos) presentes na área do Projeto Volta Grande. Cada método, entretanto, forneceu dados de cinco dessas amostras, devido a problemas analíticos. Análises isotópicas pelos métodos U-Pb por LA-ICP-MS e por evaporação de Pb foram feitas, ambas, em uma amostra de meta-andesito porfirítico (PVG-05) e em uma amostra de rocha metavulcanoclástica (PVG-08). Foram, também, medidas as composições isotópicas de Pb contidos em sulfetos (pirita), extraídos de uma amostra de meta-andesito porfirítico e de uma amostra quartzo-diorito, este último extraído de uma profundidade sem sinais visíveis de mineralização. Por fim, foram feitas medidas das composições isotópicas de Pb em 37 partículas de ouro extraídas de duas amostras de quartzo-diorito e duas de granodiorito mineralizados. A localização dos pontos de coleta de amostras analisadas encontra-se na Figura 2.

5.1. Sm-Nd em rocha total

Cinco amostras de rochas metavulcânicas foram analisadas (**Tabela 1**). As idades-modelo Sm-Nd (T_{DM}) e o parâmetro isotópico $\epsilon Nd(t)$ das amostras foram calculados usando o modelo de DePaolo (1981). Para o cálculo do $\epsilon Nd(t)$ foi usada a idade de 2417 ± 4 Ma, obtida

pelo método de evaporação de Pb em zircão. Duas amostras de metabasaltos (AFN-01 e AFN-02), destacadas em cinza, apresentam altas razões $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$. A amostra AFN-02 teve sua idade-modelo calculada mediante a evolução do DM em estágio duplo.

As amostras estudadas possuem teores de Sm e Nd que variam entre 1,7 e 3,4 ppm, e 5,0 e 17,3 ppm, respectivamente. As razões isotópicas $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ estão no intervalo de 0,117763 a 0,208444, enquanto as razões de $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ variam de 0,511511 a 0,512929. Quando lançados no diagrama isocrônico $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ vs. $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ (Figura 10), os dados obtidos fornecem a idade de 2465 ± 17 Ma, com razão inicial $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ de $0,5097 \pm 0,00056$ e $\text{MSWD}=2,5$. Essa idade se superpõe, dentro dos limites dos erros analíticos, à obtida pela análise de zircão por U-Pb (LA-ICP-MS), mas não pelo método de evaporação de Pb de zircão.

As idades-modelo (T_{DM}) das amostras AFN-01, DP-02, DP-03 e MSV1-02 fornecem idades no intervalo de 2,39 e 2,49 Ga. A idade-modelo (T_{DM}) da amostra AFN-02 foi calculada em estágio duplo devido essa amostra ser muito fracionada. A amostra fornece a idade-modelo de 2,43 Ga, que se mostra similar àquelas obtidas para as demais amostras analisadas. Os valores de ϵ_{Nd} dessas amostras variam entre +2,14 e +3,33 (meta-andesitos) e entre +2,03 e +2,63 (metabasaltos), indicando uma fonte com contribuição mantélica. Dentre as amostras de meta-andesitos, a amostra DP-02 apresenta uma idade-modelo mais jovem que as demais, possivelmente devido fracionamento dos elementos (Sm e Nd).

Tabela 1: Dados isotópicos Sm-Nd para as amostras de rochas vulcânicas do *Greenstone Belt* Três Palmeiras. As amostras em cinza apresentaram forte fracionamento isotópico dos elementos.

Amostra	Sm(ppm)	Nd(ppm)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	2s	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2s	T_{DM1}	$\epsilon_{\text{Nd}}(2,42\text{Ga})$	T_{DM2}
ANF-01	1,66	5,02	0,1998	0,0011	0,512821	0,0000	2,48	2,63	2,39
ANF-02	2,23	6,46	0,2084	0,0005	0,512929	0,0000	-	2,03	2,43
DP-02	3,38	17,29	0,1181	0,0002	0,511553	0,0000	2,39	3,33	
DP-03	3,40	16,88	0,1218	0,0007	0,511552	0,0000	2,49	2,14	
MSV1-02	3,30	16,95	0,1178	0,0010	0,511523	0,0000	2,43	2,83	

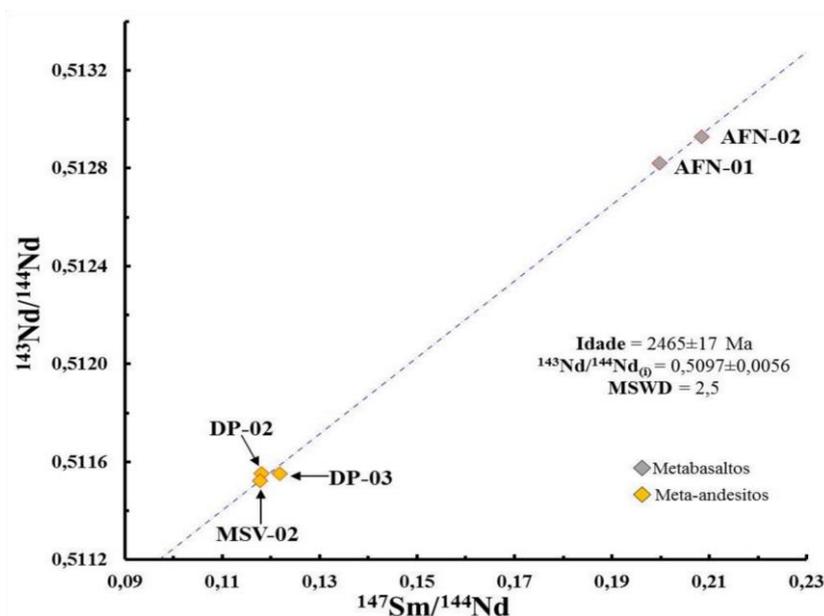


Figura 10: Diagrama $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ vs. $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ de rochas metavulcânicas do *Greenstone Belt* Três Palmeiras.

5.2 U-Pb em zircão por LA-ICP-MS

Os cristais de zircão analisados pelo método U-Pb em LA-ICP-MS (*Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*) provêm da amostra de rocha metavulcanoclástica analisada pela sistemática de evaporação Pb-Pb em cristais de zircão (PVG-08). As imagens de catodoluminescência – CL (Figura 11) indicam porções com alta e baixa luminescência, que sugerem zonas empobrecidas e zonas enriquecidas em U, respectivamente. Esses cristais são considerados de rochas ígneas devido à presença de zoneamento oscilatório, característico de cristalização magmática. Com base nas imagens acima descritas, selecionaram-se 25 cristais de zircão, que foram analisados por apenas um ponto (*spot*) por cristal, dado seu reduzido tamanho, preferencialmente com feições ígnea preservadas. Os resultados analíticos obtidos são apresentados na Tabela 2 e o tratamento desses dados em diagrama Concórdia encontra-se na Figura 12. As áreas analisadas cobrem grande parte dos cristais, nos quais são observadas porções de luminescências heterogêneas, caracterizadas por um marcante zoneamento oscilatório. A idade aparente $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ obtida dos pontos concordantes no diagrama foi de 2416 ± 49 Ma (MSWD = 4,4), interpretada como a idade de extrusão e cristalização do protólito desse litotipo, e corrobora a idade obtida pelo método de evaporação de zircão, na mesma amostra.

Tabela 2: Dados isotópicos U-Pb em cristais de zircão da amostra de metatufos vulcânico (rocha vulcanoclástica) VG-08 do *Greenstone Belt* Três Palmeiras. Em destaque os cristais cujas idades foram usadas para a construção do diagrama concórdia.

Amostras	Concentrações					Razões Isotópicas					Idades Calculadas (Ma)					
	U ppm	Pb ppm	Th ppm	Th /U	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	1s (%)	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	1s (%)	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	1s (%)	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	1s abs	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	1s abs	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	1s abs
PVG08 C2	629,0	65,3	464,7	0,7	8,679	8,5	0,434	0,9	0,145	4,1	2323	20,7	2305	195,2	2289	94,7
PVG08 C3	84,2	36,5	62,8	0,8	8,745	8,6	0,411	3,4	0,154	2,6	2221	75,9	2312	198,9	2393	62,5
PVG08 C7	76,0	40,8	31,7	0,4	9,704	6,2	0,460	2,2	0,153	2,2	2442	53,7	2407	149,0	2378	51,8
PVG08 C9	88,1	47,8	33,1	0,4	9,723	10,1	0,460	4,6	0,153	2,2	2440	111,1	2409	243,2	2383	51,9
PVG08 B11	101,6	43,8	49,2	0,5	8,905	6,6	0,420	2,5	0,154	2,2	2259	55,8	2328	153,6	2390	52,3
PVG08 B3	54,6	30,1	30,5	0,6	9,609	6,8	0,455	2,2	0,153	2,6	2419	53,1	2398	164,0	2380	62,4
PVG08 B2	156,4	78,2	83,7	0,5	9,203	9,9	0,435	4,4	0,154	2,2	2326	103,4	2358	234,4	2386	53,0
PVG08 A2	231,6	76,7	213,8	0,9	8,433	6,2	0,407	1,3	0,150	2,8	2201	28,7	2279	140,3	2349	65,5
PVG08 A5	170,6	65,3	240,8	1,4	8,876	10,1	0,412	4,1	0,156	3,0	2225	90,8	2325	235,5	2415	72,4
PVG08 A7	73,2	43,2	43,3	0,6	10,104	12,5	0,475	5,9	0,154	2,1	2505	147,2	2444	304,9	2394	50,0
PVG08 A10	1914,6	694,4	745,5	0,4	8,506	6,3	0,400	1,9	0,154	2,5	2168	42,0	2287	143,9	2394	59,4

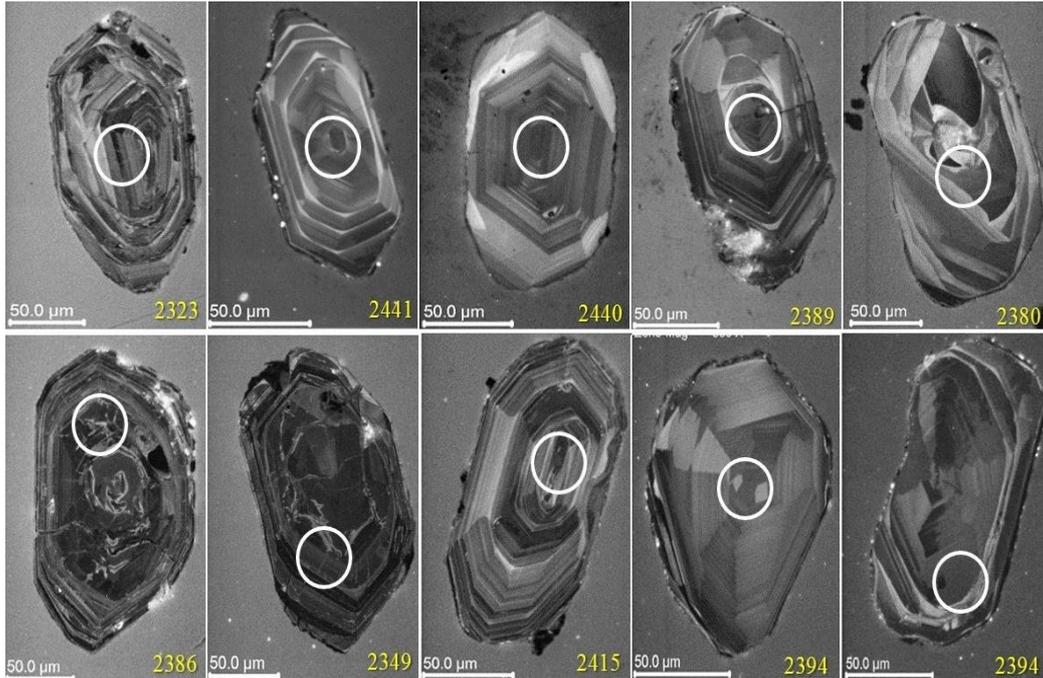


Figura 11: Imagens em catodoluminescência que mostram as características morfológicas e texturais dos zircões analisados da amostra de rocha vulcanoclástica (PVG-08), *Greenstone Belt* Três Palmeiras. Os círculos brancos representam os pontos analisados. Em amarelo, as idades calculadas para cada cristal em Ma. Tamanho médio dos cristais de zircão 125 μm .

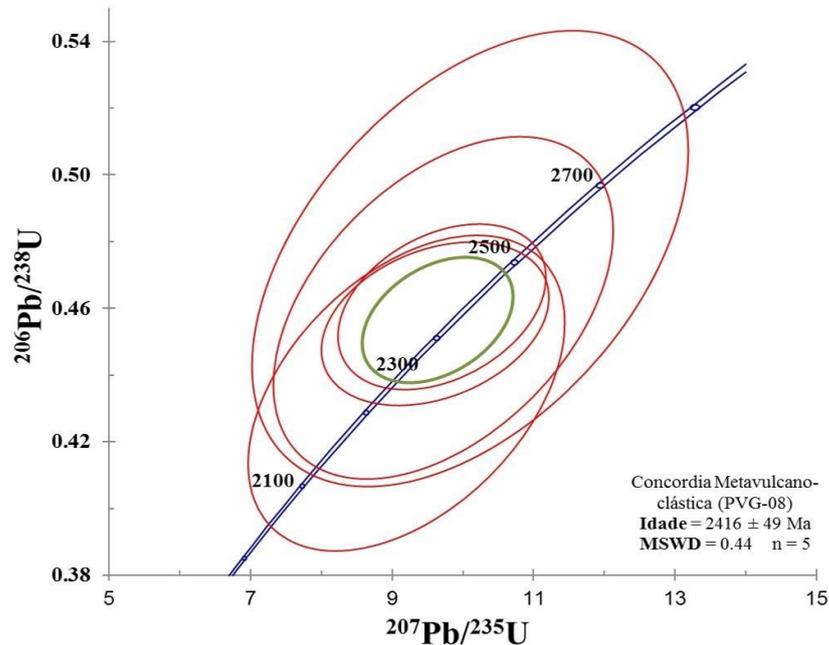


Figura 12: Diagrama Concórdia U-Pb, para a amostra de rocha vulcanoclástica (PVG-08) do *Greenstone Belt* Três Palmeiras.

5.3 Evaporação de Pb em cristais de zircão

Para a aplicação desse método, foram selecionadas uma amostra de meta-andesito porfírico (PVG-05) e uma de rocha metavulcanoclástica (PVG-08). Nos dois litotipos, os cristais de zircão são prismáticos, bipiramidais, com as bordas ligeiramente arredondadas. Exibem cores que variam do marrom escuro a castanho claro, com poucos cristais incolores a

esbranquiçados. São translúcidos a ligeiramente transparentes, com poucas inclusões e fraturas em seus núcleos e bordas. Nas análises isotópicas, os cristais forneceram idades nas etapas de 1450°C, 1500°C, 1550°C e 1600°C para a amostra de meta-andesito (PVG-05) e nas etapas de 1450°C e 1500°C para a amostra de rocha metavulcanoclástica (PVG-08). Devido a maior frequência e estabilidade na emissão de sinal de Pb, somente as idades obtidas na etapa de 1500°C foram consideradas para o cálculo da idade mínima dos cristais analisados.

Para a amostra de meta-andesito (PVG-05), foram analisados quinze cristais, mas apenas sete deles (Tabela 3 e Figura 13A) apresentaram sinal suficiente para a análise isotópica. Desses, os cristais PVG-5.4, PVG-5.5, PVG-5.7 e PVG-5.8 foram descartados por possuírem razão $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ superiores a 0,0004, elevado erro analítico ou idades abaixo da média. Os resultados dos cristais PVG-5.1, PVG-5.2 e PVG-5.6, analisados na etapa de 1500°C, foram considerados no cálculo da idade média para essa rocha, fornecendo resultado final de 2417 ± 4 Ma, considerada como idade de cristalização do protólito da rocha.

Para a amostra de rocha metavulcanoclástica (PVG-08) foram analisados onze cristais porém, apenas sete deles (Tabela 4 e Figura 13B) mostraram sinal suficiente para as medidas isotópicas. Os cristais PVG-8.8, PVG-8.10 e PVG-8.12 foram descartados por possuírem razão $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ superiores a 0,0004, elevado erro analítico ou idades abaixo da média. Os cristais PVG-8.1, PVG8.2, PVG-8.3 e PVG-8.4, com resultados obtidos na etapa de 1500°C, foram utilizados para o cálculo da idade da rocha, com valor final de 2410 ± 7 Ma, interpretado como a idade de cristalização do protólito dessa rocha.

Tabela 3: Resultados analíticos Pb-Pb dos cristais de zircão da amostra de meta-andesito porfírico (PVG-05) da área do Projeto Volta Grande. As idades em negrito foram consideradas no cálculo da idade média.

Cristal	Temp. (C°)	Número de razões	$^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2s	$(^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb})_c$	2s	$(^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb})_c$	2s	Idade	2s
PVG-5.1	#1450	0/6	0,000506	0,000048	0,13484	0,00165	0,14978	0,00066	2343,7	7,6
	1550	34/34	0,000092	0,000002	0,12002	0,00070	0,15604	0,00101	2413,6	11,0
PVG-5.2	1500	28/28	0,000107	0,000006	0,12127	0,00082	0,15667	0,00072	2420,3	7,8
PVG-5.4	#1550	0/6	0,001019	0,000074	0,08699	0,00249	0,14030	0,00180	2231,4	22,2
PVG-5.5	#1450	0/8	0,001497	0,000046	0,16009	0,00398	0,14060	0,00147	2235,0	18,1
	*1500	0/36	0,000146	0,000008	0,10933	0,00138	0,15200	0,00130	2368,8	14,6
	*1550	0/36	0,000286	0,000033	0,10612	0,00119	0,14751	0,00083	2317,6	9,6
PVG-5.6	1500	34/34	0,000186	0,000005	0,14215	0,00047	0,15633	0,00049	2416,7	5,4
	1550	26/34	0,000205	0,000006	0,14117	0,00127	0,15551	0,00145	2407,8	15,8
PVG-5.7	*1600	0/6	0,000338	0,000004	0,13330	0,00229	0,14762	0,00105	2318,9	12,2
PVG-5.7	#1500	0/20	0,000409	0,000022	0,11019	0,00120	0,15076	0,00206	2354,8	23,4
PVG-5.8	*1450	0/8	0,000279	0,000016	0,25329	0,00191	0,07322	0,00129	1020,3	35,8
	*1500	0/12	0,000358	0,000057	0,12009	0,00234	0,15032	0,00049	2349,9	5,5
Total = 122/142								Idade Média = 2417 Ma		4,0

(c) - razão $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ e $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ corrigida do Pb comum

(*) - etapa de evaporação eliminada subjetivamente

(#) - etapa de evaporação eliminada por apresentar razão $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ superior a 0,0004

Tabela 4: Resultados analíticos Pb-Pb dos cristais de zircão da amostra de rocha vulcanoclástica (PVG-08), da área do Projeto Volta Grande. As idades em negrito foram consideradas no cálculo da idade média.

Cristal	Temp. (C°)	Número de Razões	$^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2s	$(^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb})_c$	2s	$(^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb})_c$	2s	Idade	2s
PVG-8.1	#1450	0/14	0,001047	0,000223	0,1046	0,01168	0,06312	0,00673	712,6	226,5
	1500	30/30	0,000207	0,000022	0,11941	0,001	0,15454	0,00079	2397,3	8,7
PVG-8.2	#1500	0/20	0,001011	0,00004	0,12238	0,00065	0,14069	0,00068	2236,0	8,3
	1500	26/34	0,000265	0,000004	0,1151	0,0005	0,15585	0,00044	2411,5	4,8
PVG-8.3	#1450	0/8	0,001415	0,000008	0,12965	0,00076	0,14417	0,00081	2278,2	9,6
	1500	26/32	0,000351	0,000012	0,11624	0,00034	0,15607	0,00057	2413,9	6,2
	#1550	0/6	0,000811	0,000006	0,0977	0,00067	0,14414	0,00032	2277,8	3,9
PVG-8.4	1500	6/6	0,000284	0,000124	0,11582	0,00415	0,15417	0,00196	2392,9	21,6
PVG-8.8	#1500	0/30	0,000767	0,000019	0,12795	0,00114	0,15388	0,00108	2389,7	12,0
	*1550	0/16	0,000355	0,000036	0,12166	0,00145	0,14977	0,00051	2343,7	5,9
PVG-8.10	*1500	0/14	0,00023	0,000022	0,09489	0,00063	0,15127	0,00028	2360,6	3,2
PVG-8.12	#1500	0/14	0,000684	0,000006	0,1341	0,00295	0,14808	0,0021	2324,2	24,3
Total = 88/224									Idade Média = 2410 Ma	7,1

(c) - razão $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ e $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ corrigida do Pb comum

(*) - etapa de evaporação eliminada subjetivamente

(#) - etapa de evaporação eliminada por apresentar razão $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ superior a 0,0004

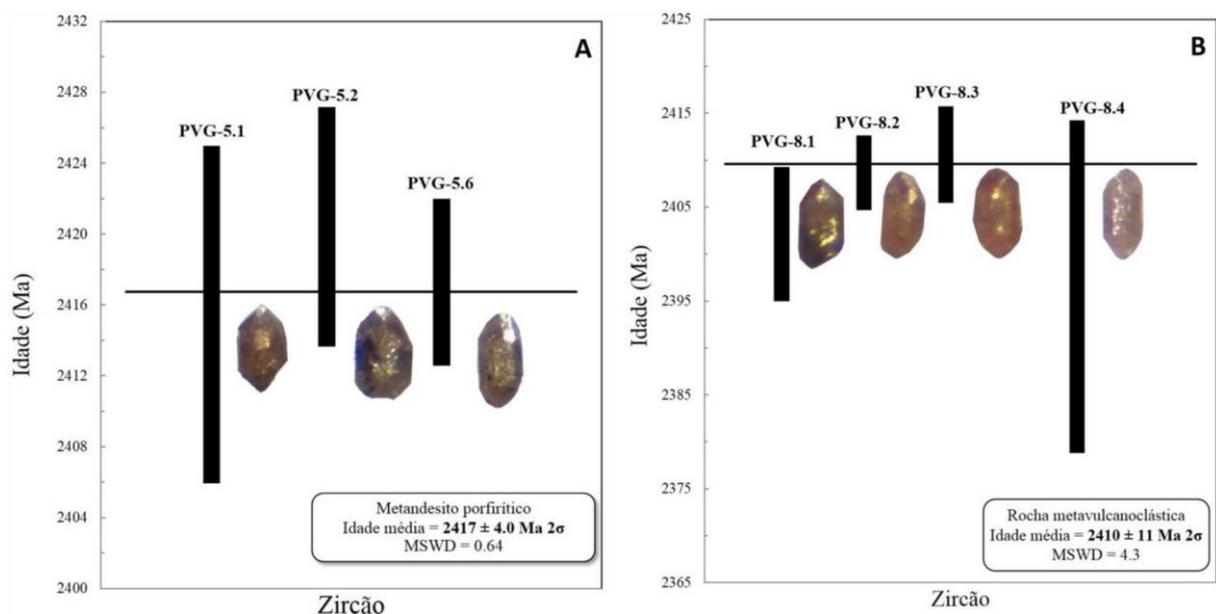


Figura 13: Diagramas de idades vs. cristais de zircão, obtidos pelo método Pb-Pb por evaporação das amostras de (A) meta-andesito porfirítico (PVG-05) e de (B) rocha metavulcanoclástica (PVG-08).

5.4. Análises de isótopos de Pb

Foram realizadas análises isotópicas de Pb em cinco amostras de rochas metavulcânicas (rocha total), em 2 duas amostras de pirita (técnica de lixiviação sequencial) extraídos de uma

amostras de quartzo-diorito e uma de meta-andesito, e em 27 partículas de ouro (evaporação) de dois corpos de diorito e de granodiorito mineralizados. As composições isotópicas de Pb medidas dessa amostras constam na Tabela 5.

Tabela 5: Análises isotópicas Pb-Pb (rocha total) para amostras de rochas metavulcânicas da sequência *greenstone belt*, lixiviados de piratas de quartzo-diorito (GS-02) e meta-andesito (PVG06) e partículas de Au de quatro depósitos na área do Projeto de Ouro Volta Grande. As amostras em cinza foram desconsideradas para os cálculos de idades em seus respectivos gráficos, por apresentarem erros muito altos ou em desalinhamento com as demais amostras do respectivo conjunto.

Amostra	Litotipo	Dissolução de rocha total					
		$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	2s	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	2s	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	2s
ANF-02	Meta-basalto	17,71	0,01	15,63	0,004	36,70	0,01
DP-01	Meta-andesito	24,00	0,01	16,41	0,003	42,30	0,01
DP-02	Meta-andesito	20,71	0,01	16,18	0,003	39,33	0,01
DP-03	Meta-andesito	28,74	0,01	17,12	0,003	43,82	0,01
MSV1-02	Meta-andesito	27,58	0,01	16,99	0,002	44,11	0,01
Lixiviação de pirita de quartzo-diorito							
GS-02-L1	Quartzo-diorito	15,98	0,01	15,54	0,014	35,62	0,03
GS-02-L2	Quartzo-diorito	16,19	0,01	15,63	0,013	35,87	0,03
GS-02-L3	Quartzo-diorito	18,21	0,01	15,83	0,007	37,59	0,02
GS-02-L4	Quartzo-diorito	24,15	0,01	16,63	0,010	42,20	0,02
Lixiviação de pirita de meta-andesito							
PVG-06-L3	Meta-andesito	20,43	0,01	16,14	0,005	39,67	0,01
PVG-06-L4	Meta-andesito	21,71	0,14	16,22	0,106	40,93	0,25
PVG-06-L8	Meta-andesito	18,20	0,01	15,69	0,005	37,70	0,01
Evaporação de Pb em partículas de ouro							
OV-II-1	Granodiorito	22,67	0,09	15,36	0,091	33,94	0,26
OV-II-2	Granodiorito	22,31	0,30	15,41	0,140	34,19	0,60
OV-II-3	Granodiorito	21,05	0,06	15,19	0,036	33,99	0,14
OV-II-4	Granodiorito	20,42	0,12	15,46	0,098	35,97	0,28
OV-II-5	Granodiorito	19,38	0,32	15,13	0,152	34,79	0,61
OV-II-10	Granodiorito	18,84	0,04	15,35	0,046	36,93	0,17
OV-II-11	Granodiorito	18,95	1,43	14,86	1,534	32,66	6,90
GS-II-1	Granodiorito	19,31	0,05	15,15	0,040	34,74	0,13
GS-II-2	Granodiorito	19,33	0,17	15,20	0,326	36,01	1,17
IT-I-4	Quartzo-diorito	22,55	0,06	15,54	0,044	34,60	0,22
IT-I-5	Quartzo-diorito	22,63	0,47	15,70	0,236	35,39	0,48
IT-I-11	Quartzo-diorito	17,64	0,48	14,96	0,315	35,37	1,48
PQ-II-2	Quartzo-diorito	17,82	0,08	15,36	0,050	37,03	0,23
PQ-II-4	Quartzo-diorito	20,04	0,08	15,58	0,071	36,88	0,32

Pb-Pb em rocha total

Cinco amostras de rochas metavulcânicas foram analisadas (**Tabela 5**). Em diagrama $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (Figura 14), observa-se que apenas a amostra ANF-02 (metabasalto) situa-se sobre a curva que corresponde à Crosta Superior, segundo o modelo de

Zartman & Doe (1981). Assim, é bastante provável que essa amostra tenha sofrido um deslocamento no diagrama a partir de sua cristalização, não permitindo especulações a respeito do ambiente tectônico. Apesar de possuírem baixos erros analíticos, as demais amostras apresentam elevado Pb radiogênico, posicionando-se acima dos limites das curvas de evolução do Pb. Por sua composição radiogênica, acredita-se que esses litotipos também tenham tido contribuição crustal. A regressão com todos os pontos indicou a idade de 2403 ± 92 Ma, mas com muito alto MSWD (93). Contudo, indica um valor similar aos obtidos por outros métodos para essas rochas, como será visto adiante, além de mostrar que os dois grupos de rochas (metabasaltos e meta-andesitos) são contemporâneos e, possivelmente, co-genéticos.

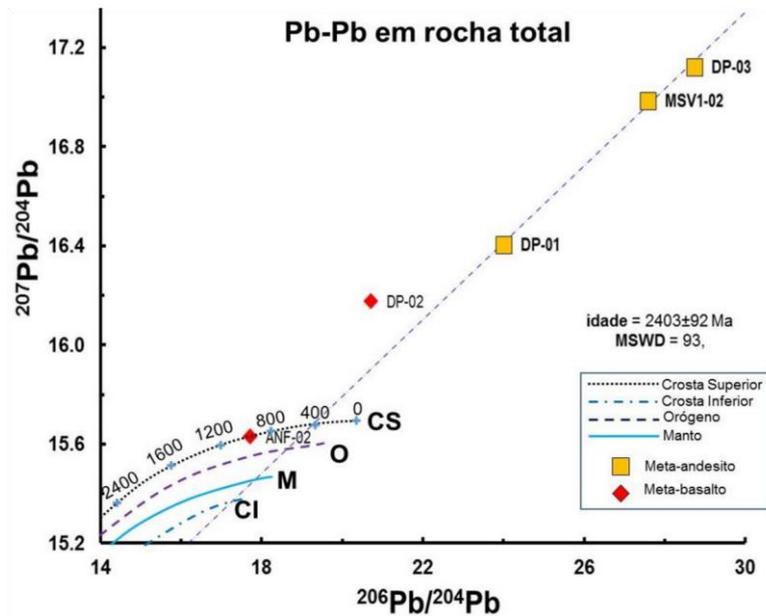


Figura 14: Diagrama $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ para amostras de rochas vulcânicas de *Greenstone Belt* Três Palmeiras. As curvas de ambientes tectônicos, segundo o modelo Plumbotectônica (Zartman & Doe 1981), estão representadas no diagrama. Os losangos em vermelho representam os pontos cujos dados analíticos precisaram ser desconsiderados para os cálculos das idades, uma vez que apresentavam idades incoerentes com a geologia local e elevados desvio e MSWD.

Lixiviação de Pb em cristais de pirita

A análise isotópica revelou que as razões $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ e $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ da amostra de pirita contida no quartzo-diorito (GS-02) variam de 15,98 a 24,15; 15,54 a 16,63, e 35,62 a 42,20, respectivamente, enquanto as razões para a amostra de pirita contida no meta-andesito (PVG-06) variam de 18,20 a 20,43; 15,69 a 16,22, e 37,70 a 40,93, respectivamente (**Tabela 5**).

Os lixiviados da amostra de pirita do quartzo-diorito apresentam-se muito radiogênicas. Em diagrama $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (Figura 15A), estão representados pelos pontos GS-02/L1, GS02/L3 e GS-02/L4, que fornecem idade de 2146 ± 19 Ma, com $\text{MSWD}=0,085$, além de um melhor ajuste a isócrona. Os dados referentes ao lixiviado GS-02/L2 não foram considerados para o cálculo da idade, por não alinhar com os demais resultados. A exemplo do que ocorre para a amostra de pirita em quartzo-diorito, os lixiviados da amostra de pirita de meta-andesito apresenta-se, também, muito radiogênicas. No diagrama $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (Figura 15B), os pontos PVG-06/L4 e PVG-06/L8, fornecem idade de 2353 ± 43

Ma, sendo desconsiderados aqui os dados do lixiviado PVG-06-L3, com vista a se obter um melhor alinhamento dos pontos. Levando em conta os desvios analíticos, ambas as idades são similares às esperadas para as respectivas rochas hospedeiras, conforme dados apresentados posteriormente.

Evaporação de Pb em ouro

Foram medidas as composições isotópicas de Pb de partículas de ouro provenientes de duas amostras de granodiorito (OV-VG-II e GS-VG-II, Bloco Norte) e duas de quartzo-diorito (IT-VG-I e PQ-VG-II, Bloco Sul). As amostras foram coletadas de testemunhos de furos de sondagem em diferentes profundidades. De 27 partículas de ouro analisadas, apenas 14 emitiram sinal suficiente para análise. As amostras de ouro são radiogênicas e mostram razões isotópicas de $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ e $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ variando entre 17,64 e 22,63; 14,86 e 15,70, e 32,66 e 37,03, respectivamente. Os dados analíticos constam na **Tabela 5**.

No diagrama $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (Figura 16), no qual as curvas de evolução do Pb (Stacey & Kramers, 1975) encontram-se exibidas para referência, os pontos estão dispersos e não definiram um bom alinhamento, impossibilitando a correta determinação da idade. Porém, após diversas tentativas, as amostras GS-II-02, OV-II-04 (granodioritos), IT-I-05 e IT-I-11 (quartzo-dioritos) definiram um alinhamento coerente (com o menor desvio obtido), fornecendo a idade de 2189 ± 11 Ma, com MSWD = 31. A idade obtida pela evaporação de Pb em ouro é condizente com aquela que foi determinada, neste trabalho, pela lixiviação de pirita em amostra de quartzo-diorito (2146 ± 19 Ma), e com aquela determinada para o Granodiorito Oca (2160 ± 3 Ma) por Vasquez (2006). Assim, fica sugestiva a contemporaneidade entre a mineralização e o granodiorito e quartzo-diorito intrusivos no *greenstone*.

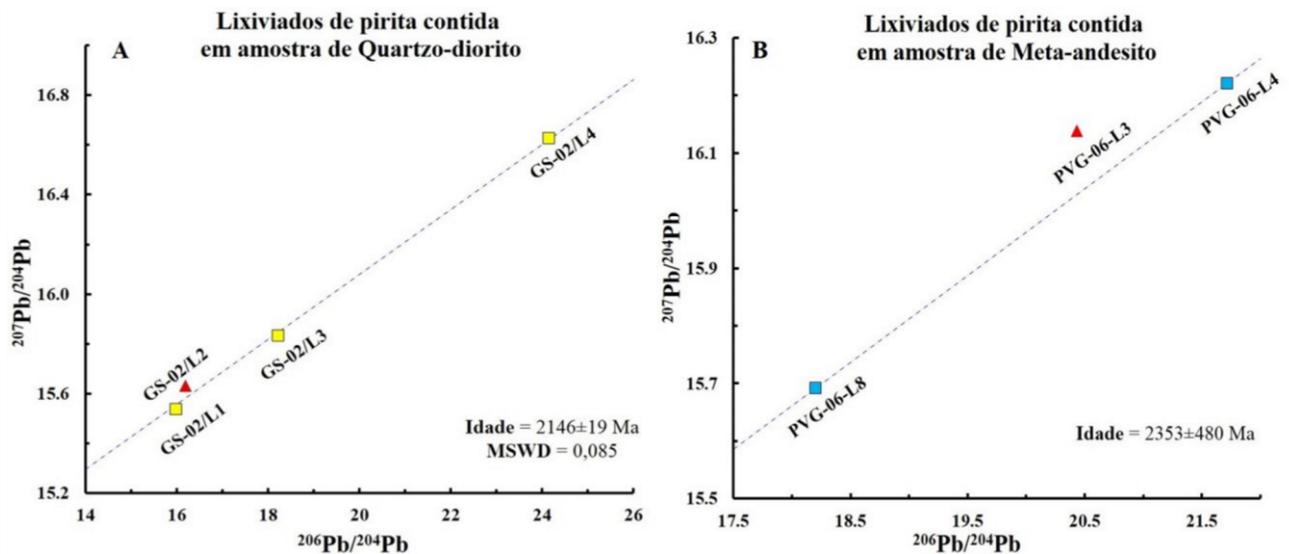


Figura 15: Diagrama $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ para lixiviados de pirita contida em: A) Quartzo-diorito (GS-02) intrusivo no *Greenstone Belt* Três Palmeiras. B) Meta-andesito (PVG-06) da sequência *Greenstone Belt* Três Palmeiras. Os triângulos em vermelho representam os pontos desconsiderados para os cálculos das idades.

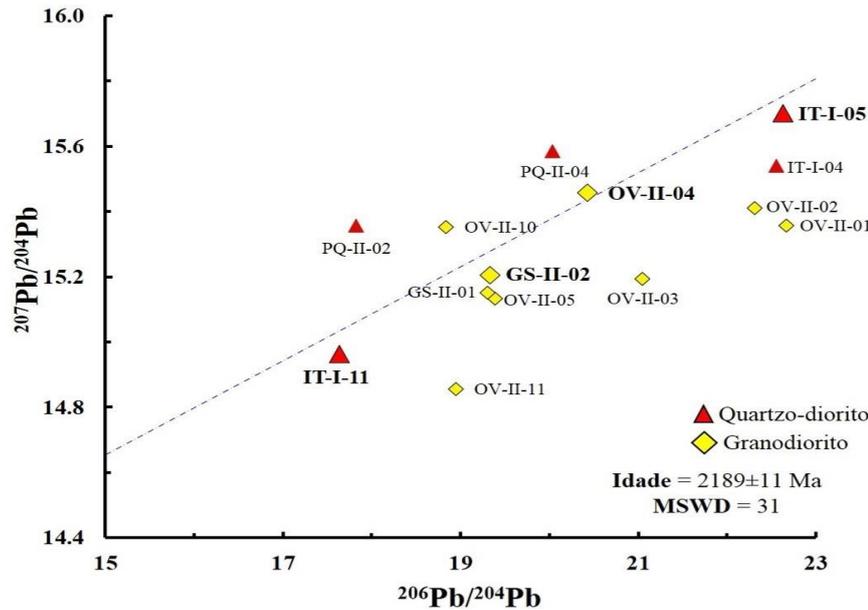


Figura 16: Diagrama isocrônico Pb/Pb para amostras de ouro analisadas pelo método de evaporação de Pb. Inicialmente, os pontos referentes as amostras de ouro não se alinham e não definem uma isócrona. Por outro lado, as amostras GS-II/02, OV-II/04, IT-I/05 e IT-I/11 (em negrito), definem o melhor alinhamento (assim como os menores erros e MSWD) obtido para essas amostras e fornecem uma idade compatível com as rochas graníticas presentes na área.

6. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Os trabalhos de campo e análises petrográficas permitiram a caracterização de sete diferentes litotipos na área da Volta Grande do rio Xingu, classificados como anfibolitos (metabasaltos), metagabros ricos em hornblenda, xistos máficos, meta-andesitos e rochas metavulcanoclásticas inclusos no *Greenstone Belt* Três Palmeiras, e granodioritos e quartzodioritos intrusivos. O litotipo metagabro foi identificado como um enclave em meio aos anfibolitos. Essas rochas são, via de regra, anisotrópicas e bastante foliadas.

Os depósitos associados aos corpos granitoides que intrudem as sequências vulcânicas do *greenstone* tem como principal característica a presença de ouro em veios de quartzo, associado a sulfetos, como pirita, arsenopirita e calcopirita, em diversas profundidades e que registram forte alteração hidrotermal. De forma subordinada, o ouro também ocorre em veios de quartzo associado a carbonatos, sem a presença de sulfetos. Óxidos, minerais de As e ETR também são observados. Estão presentes nesses depósitos, sob a forma de produto de alteração, clorita, sericita e epídoto.

Estudos de feições microscópicas sugerem que pelo menos um evento de deformação tenha ocorrido na área do *greenstone*, de natureza predominantemente dúctil. Faraco *et al.* (2005) definem essa deformação como um cisalhamento dúctil, transcorrente, com direção predominante NW-SE, que é evidenciado por características deformacionais observadas nos anfibolitos, meta-andesitos rochas metavulcanoclásticas e nos corpos de quartzo-diorito. Esse evento deformacional é mais novo que as rochas graníticas observadas na área, uma vez que os corpos de quartzo-diorito registram essa deformação.

A metodologia de evaporação de Pb em monocristais de zircão forneceu idades $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, de 2417 ± 4 Ma para a amostra de meta-andesito e de 2410 ± 7 Ma para a rocha metavulcanoclástica. Esta ainda foi submetida a análises pelo método U-Pb em zircão, por LA-ICPMS, que forneceu a idade de 2416 ± 49 Ma. A análise de isotópicos de Pb por lixiviação de piritas definiram idade de 2353 ± 43 Ma (meta-andesito) e 2146 ± 19 Ma

(quartzo-diorito) para as amostras analisadas. A idade de 2353 ± 43 Ma definida para os meta-andesitos é similar àquela definida para a amostra de meta-andesito datada por Macambira *et al.* (2009). Já a idade de 2146 ± 19 Ma definida para o quartzo-diorito sobrepõe-se à idade de um monzodiorito intrusivo no *greenstone* com valor de 2160 ± 3 Ma (Vasquez, 2006), considerado como o Granodiorito Oca.

As idades determinadas em zircão dos meta-andesitos e rochas metavulcanoclásticas constituem, até o momento, a referência cronológica de maior valor para o *Greenstone Belt* Três Palmeiras, sendo maior que a idade de 2359 ± 3 Ma obtida por Macambira *et al.*, (2009) para os meta-andesitos da sequência *greenstone* encontrados em seu extremo sudeste. As idades aproximam-se da idade obtida por Vasquez (2006) para uma amostra de brecha de meta-dacito (2452 ± 3 Ma) da área Ilha Grande (as proximidades do rio Iriri, afluente do rio Xingu, margem esquerda), considerada pelo autor como um possível registro de sequências metavulcanossedimentares do Neoarqueano-Sideriano, na porção ocidental do Domínio Bacajá.

As idades de 2417 ± 4 e 2410 ± 7 Ma para os meta-andesitos e metavulcanoclásticas datados neste trabalho sugerem que o magmatismo que gerou essas rochas tenha uma possível relação tardia com o magmatismo Neoarqueano-Sideriano de 2,50–2,44 Ga, ocorrido na porção ocidental do Domínio Bacajá. Por outro lado, essas rochas poderiam, também, poderiam representar um outro evento magmático ainda não registrado no Domínio Bacajá, ocorrido em torno de 2,42 Ga.

A metodologia Sm-Nd em rocha total forneceu idades-modelo T_{DM} de 2,43 a 2,49 Ga e valores de $\epsilon Nd_{(t)}$ que variam entre 2,14 e 3,33 para os meta-andesitos do *Greenstone Belt* Três Palmeiras enquanto os metabasaltos apresentam idades-modelo de 2,39 e 2,43 Ga e $\epsilon Nd_{(t)}$ que variam entre +2,03 e +2,63. A proximidade das idades-modelo com a idade de 2416 ± 49 Ma, obtida pelas análises de zircão pelo U-Pb por LA-ICP-MS, somado aos valores positivos de seus $\epsilon Nd_{(t)}$, sugerem que as rochas que compõem a sequência metavulcânica do *Greenstone Belt* Três Palmeiras tenham uma fonte de proveniência mantélica e juvenil.

Os resultados das análises de Sm-Nd em rocha total são similares aos obtidos por Vasquez (2006) em amostras de meta-andesitos e metadacitos ($T_{DM} =$ de 2,49 e 2,47 Ga; $\epsilon Nd_{(t)} = +1,73$ e +1,66, respectivamente) e de Macambira *et al.* (2009) para amostras de meta-andesitos ($T_{DM} = 2,56$ e 2,71 Ga $\epsilon Nd_{(t)} = +0,78$ e -0,87) no *Greenstone Belt* Três Palmeiras. Esses autores sugerem que o Domínio Bacajá teria se originado a partir de uma acreção ocorrida entre 2,36 e 2,48 bilhões de anos, com um subsequente retrabalhamento de crosta mesoarqueana e cristalização de magmas juvenis e crustal durante o Ciclo Transamazônico. Nessa linha, os dados obtidos neste trabalho corroboram com a hipótese defendida por Vasquez (2006) e Macambira *et al.* (2009) para a formação e evolução do Domínio Bacajá.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à empresa Belo Sun Mining Corp. pela permissão e concessão das amostras utilizadas na elaboração desse trabalho. Aos geólogos Kleber Souza e Mauricio Felmer pelo apoio de campo, informações geológicas e amostras cedidas. Ao Prof. Dr. Moacir Macambira pela orientação dessa dissertação. Ao Laboratório (Pará-Iso-UFGA), na pessoa do Prof. Dr. Marco Antônio Galarza, os técnicos Jefferson Souza, Maria Isamara, Paulo Bahia e os bolsistas Bruna Nogueira e Juvenal Neto pela ajuda nas atividades analíticas. Ao Instituto GEOCIAM, pelo suporte financeiro prestado na etapa de campo. Ao Prof. MSc. Ronaldo Lima Lemos pelas discussões a respeito da petrografia. Ao Prof. Dr. Cláudio Nery Lamarão, à MSc. Gisele Marques e às técnicas Paula e Viviam do Laboratório de Microanálises do IG/UFGA pela ajuda na obtenção de imagens de zircão por CL. Aos membros da banca de avaliação da dissertação, Prof. Dr. Evandro Luiz Klein (UFGA) e Prof. Dr. Valmir S. Souza (UNB) pelas correções, sugestões e contribuições para este trabalho.

REFERÊNCIAS

- Belo Sun Mining Corp. 2011. NI 43-101 Technical Report. *Belo Sun Mining Corp.* Volta Grande Project. Pará, Brazil. May/2011. 130p.
- Depaolo D.J. 1981. Neodymium isotopes in the Colorado front range and crust-mantle evolution in the Proterozoic. *Nature* **291**: 193-196.
- DePaolo D.J. 1988. Sm-Nd Dating. In: *Neodymium Isotope Geochemistry. Minerals and Rocks*, v. 20. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Frei, R.; Kamber, B.S. 1995. Single mineral lead-lead dating. *Earth and Planetary Science Letters*. **129**: 261-268.
- Gaudette, H.E., Lafon, J.M., Macambira, M.J.B., Moura, C.A.V., Scheller, T., 1998. Comparison of single filament Pb evaporation/ionization zircon ages with conventional U-Pb results: Examples from the Precambrian of Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*. **11**(4) 351-363.
- Kober, B. 1986. Whole-grain evaporation for $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age investigations on single zircons using a double-filament thermal ion source. *Contrib. Mineral Petrol.* pg.482-490.
- Krymsky, R.S.H. 2002. Pb-Pb evaporation method on native gold grains. *Goldschmidt Conference Abstracts*. pg. A421.
- Jacobsen, S.B., Wasserburg, G.J. 1980 Sm-Nd evolution of chondrites. *Earth Planet. Sci. Lett.* **50**:139-155.
- Ludwig, K.R., 2008. User's manual for ISOPLOT/EX: a geochronological toolkit for Microsoft Excel (version 3.68). Berkeley Geochronology Center. *Special Publication*, (4) 71p.
- Macambira, M.J.B.; Silva, D.C.; Barros, C.E.M.; Scheller, T. 2003. New isotope evidences confirming the existence of a Paleoproterozoic terrain in the region at north of the Carajás Mineral Province. In: *South American Symposium on Isotope Geology*, **4**, Salvador. *Short Papers*, Salvador. P.205-208.
- Macambira M.J.B., Vasquez M.L., Silva D.C., Galarza M.A., Barros C.E.M., Camelo J.F. 2009. Crustal growth of the central-eastern Paleoproterozoic domain, SE Amazonian craton: Juvenile accretion vs. Reworking. *Journal of South American Earth Sciences*, **27**: 235-246.
- Neves, S.P. 2001. Dinâmica do Manto e Deformação Continental: Uma Introdução a Geotectônica. Recife: Editora. Universitário da UFPE.
- Ricci P.S.F., Costa E.J.S., Oliveira J.R. 2003. The reanalyzed Carajás Block is interposed between the Bacajá (the crustal reworking “lost link” now being predicted) and Rio Maria Archean terranes – Guaporé Craton. In: SBG, Simpósio de Geologia da Amazônia, 8, *Resumos expandidos*. CD-ROM.
- Rosa-Costa, L. T. 2006. *Geocronologia $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, Sm-Nd, U-Th-Pb e $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ do segmento sudeste do Escudo Das Guianas*: Evolução crustal e termocronologia do Evento Transamazônico. TS de Doutorado Pós-Graduação. Instituto de geociências. Universidade Federal do Pará. Belém, 2006. 235p.
- Santos, J.O.S.; Hartmann, L.A.; Gaudette, H.E.; Groves, D.I.; Mcnaughton, N.J.; Fletcher, I.R. 2000. A new understanding of the provinces of the Amazon Craton based on integration of field mapping and U-Pb and Sm-Nd geochronology. *Gondwana Resource*, **3**(4). 453-488.
- Santos, J.O.S., 2003. Geotectônica dos Escudos da Guiana e Brasil Central. In: Bizzi, L.A.; Schobbenhaus, C; Vidotti, R.M.; Gonçalves J.H. (eds.) *Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil*. Texto, mapas e SIG. CPRM-Serviço Geológico do Brasil. p.169-226.
- Stacey, J.S; Kramers, J.D. 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a twostage model. *Earth and Planetary Science Letters*, **26**. 207-221.

- Tassinari, C.C.G. & Macambira, M.J.B. 1999. Geochronological provinces of the Amazonian Craton. *Episodes*, **22**. 174-182.
- Tassinari, C.C.G. & Macambira, M.J.B. 2004. A evolução tectônica do Cráton Amazônico. In: Mantesso-Neto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, C.D.R.; Brito Neves, B.B. (Eds.) *Geologia do continente Sul-americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. Beca, São Paulo. pag.471-485.
- Vasquez, M. L. 2006 *Geocronologia em zircão, monazita e granada e isótopos de Nd das associações litológicas da porção oeste do Domínio Bacajá: evolução crustal da porção meridional da Província Maroni-Itacaiúnas – sudeste do Cráton Amazônico*. TS de Doutorado. Pós-Graduação. Instituto de Geociências. Universidade Federal do Pará. Belém, 234p.
- Vasquez M.L., Macambira M.J.B., Armstrong R.A. 2008a. Zircon geochronology of granitoids from the western Bacajá domain, southeastern Amazonian craton, Brazil: Neoproterozoic to Orosirian evolution. *Prec. Res.*, **161**:279-302.
- Vasquez M.L., Rosa-Costa L.T., Silva C.M.G., Klein E.L. 2008b. Compartimentação tectônica. In: Vasquez, M.L. & Rosa-Costa L.T. (org.). *Geologia e Recursos Minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas – SIG: texto explicativo dos mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará*. Escala 1:1.000.000. Belém: CPRM, p. 39-112.
- York, Derek, 1969. Least-squares fitting of a straight line with correlated errors. *Earth Planet. Sci. Lett.* **5**: 320-324.
- Zartman R.E, Doe B.R, 1981. Plumbotectonics – the model. *Tectonophysics*, **75**: 135-162.

PARTE 3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir de trabalhos de campo e de um variedade de de técnicas analíticas, o ouro encontrado nos depósitos Grotta Seca, Ouro Verde, Itatá e Pequí Príncipe foi caracterizado e datado, assim como as principais sequencias metavulcânicas do Greenstone Belt Três Palmeiras, contribuindo para a evolução do conhecimento geológico da região. Todavia, alguns problemas foram enfrentados durante os procedimentos de amostragem e processamento para algumas análises geocronológicas e isotópicas.

O principal problema enfrentado neste trabalho refere-se a dificuldade de amostragem, uma vez que a maior parte das amostras que frequentemente encontravam-se intensamente alteradas por processos intempéricos ou hidrotermais. Outra dificuldade foi a escassez de afloramentos de determinadas rochas ou a obtenção de determinados minerais (como zircão).

Para as análises geocronológicas de U-Pb em zircão na amostra de meta-andesito (PVG-05), a quantidade e qualidade dos cristais desse mineral geraram dificuldades para a análise, processamento e interpretação dos dados obtidos para essa amostra, que apresentavam grandes discordâncias entre suas razões e idades. Dessa forma, se fez necessário a aplicação da metodologia de evaporação de Pb em zircão. A aplicação desse método nos forneceu idades compatíveis com a geologia da área para os meta-andesitos e mostrou, também, que há uma similaridade de dados entre os dois métodos.

No caso do Sm-Nd, apenas uma amostra de meta-andesitos (DP-01) não forneceu dados para análise e processamento, devido a uma possível perda de ETRs durante a preparação da amostra.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para um melhor entendimento das características das mineralizações auríferas dos depósitos Grotta Seca, Ouro Verde, Itatá e Pequí, estudos de detalhe devem ser feitos ao longo do *Greenstone Belt* Três Palmeiras. Espera-se que esses estudos futuros possam melhor compreender os mecanismos que propiciam a formação e acumulação dessas mineralizações em diferentes profundidades dentro dos corpos de rochas granitoides.

REFERÊNCIAS

- Almeida F. F. M. de. 1967. Origem e evolução da plataforma brasileira. *Boletim DNPM-DGM*, Rio de Janeiro, **241**. 36p.
- Belo Sun Mining Corp. 2015. Feasibility Study on Volta Grande Project, Pará, Brazil. *Nl 43-101 Technical Report*. 484p.
- Belo Sun Mining Corp. 2017. Developing an open pit gold project in Brazil. *Corporate Presentation*. February. TSX: BSX. 2017. 31.p.
- Chemale Jr F., Kawashita K., Dussin I.A., Ávila J.N., Justino D., Bertotti A. 2012. U-Pb zircon *in situ* dating with LA-MC-ICP-MS using a mixed detector configuration. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **84**(2): 275-295.
- Cordani U.G., Tassinari C.C.G., Teixeira W., Basei M.A.S., Kawashita K. 1979. Evolução tectônica da Amazônia com base nos dados geocronológicos. *In: Congress. Geol. Chileno*, 2, Arica, Chile. *Actas*, Arica. **4**:137-148.
- Cordani U.G., Tassinari C.C.G., Kawashita K. 1984. A Serra dos Carajás como região limítrofe entre províncias tectônicas. *Ciências da Terra*, **9**: 6-11.
- DePaolo D.J. 1988. *Neodymium isotope geochemistry: an introduction*. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag. 278p.
- De Wit M.J., Ashwal L.D. 1997. *Greenstone belts*. Oxford University Press, Oxford, (Eds.). p. 233-254.
- Faraco M.T.L.; Vale, A.G.; Santos, J.O.S.; Luzardo, R.; Ferreira, A.L.; Oliveira, M.A.; Marinho, P.A.C. 2005. Levantamento Geológico da Região ao Norte da Província Carajás *In: Souza, V. & Horbe, A.C. (eds.). Contribuições a Geologia da Amazônia*, **4**. 32-44.
- Frei R.; Kamber, B.S. 1995. Single mineral lead-lead dating. *Earth and Planetary Science Letters*. **129**:261-268 .
- Gaudette H.E., Lafon, J.M., Macambira, M.J.B., Moura, C.A.V., Scheller, T., 1998. Comparison of single filament Pb evaporation/ionization zircon ages with conventional U-Pb results: Examples from the Precambrian of Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*. **11**(4), 351-363.
- Goldfarb R.; Groves, D.I.; Gardoll, S. 2001. Orogenic gold and geologic time: a global synthesis. *Ore Geology*. **18**:1-75.
- Groves D.I.; Goldfarb, R.J.; Gebre-Mariam, M.; Hagemann, S.G.; Robert, F. 1998. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geology*. **13**:7-27.
- Groves D. I.; Goldfarb, R.J.; Robert, F.; Hart, C.J.R. 2003. Gold Deposits in Metamorphic Belts: Overview of Current Understanding, Outstanding Problems, Future Research, and Exploration Significance. *Economic Geology*. **98**:1-29.

- Jacobsen S.B., Wasserburg, G.J. 1980 Sm-Nd evolution of chondrites. *Earth Planet. Sci. Lett.* **50**:139-155.
- Jorge João X.S., Vale A.G., Lobato T.A.M. 2001. *Folha Altamira (PA) SA.22-Y-D*. Escala 1:250.000. Geologia regional. Brasília,DF, CPRM/DIEDIG/DEPAT, (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil). p. 03-27.
- Klein E.L., Carvalho J.M. de A. 2008. Recursos minerais. In: Vasquez M.L. & Rosa-Costa L.T. (Org.). *Geologia e recursos minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas – SIG: texto explicativo dos mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará*. Escala 1:1. 000.000. Belém, CPRM, p. 217-262.
- Kober B. 1986. Whole-grain evaporation for $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age investigations on single zircons using a double-filament thermal ion source. *Contrib. Mineral Petrol.* **93** (4): 482-490.
- Krymsky R.SH. 2002. Pb-Pb evaporation method on native gold grains. *Goldschmidt Conference Abstracts*. pg. A421.
- Lobato T. de A. M. et al. (Org.). *Altamira: folha SA.22-Y-D: texto explicativo: estado do Pará*. Escala 1:250.000. Rio de Janeiro, CPRM, CPRM/DNPM. (Relatório técnico). 31p.
- Ludwig K.R., 2008. User's manual for ISOPLOT/EX: a geochronological toolkit for Microsoft Excel (version 3.68). *Berkeley Geochronology Center*. Special Publication, **4**. 71p.
- Macambira M.J.B.; Silva, D.C.; Barros, C.E.M.; Scheller, T. 2003. New isotope evidences confirming the existence of a Paleoproterozoic terrain in the region at north of the Carajás Mineral Province. In: *South American Symposium on Isotope Geology*, **4**, Salvador. *Short Papers*, p 205-208.
- Macambira M.J.B., Vasquez M.L., Silva D.C., Galarza M.A., Barros C.E.M., Camelo J.F. 2009. Crustal growth of the central-eastern Paleoproterozoic domain, SE Amazonian craton: Juvenile accretion vs. Reworking. *Journal of South American Earth Sciences*, **27**: 235-246.
- Michard A., Gurriet, P., Soudant, M.; Albaréde, F. (1985): Nd isotopes in French Phanerozoic shales: external vs. internal aspects of crustal evolution. *Geochim. Cosmochim. Acta* **49**: 601-610.
- Oliveira, E. C., Lafon, J. M., Gioia, S. M. C. L., Pimentel, M. M. 2008. Datação Sm-Nd em rocha total e granada do metamorfismo granulítico da região de Tartarugal Grande, Amapá Central. *Revista Brasileira de Geociências*, **38**(1), 114-127.
- Ricci P.S.F., Costa E.J.S., Oliveira J.R. 2003. The reanalyzed Carajás Block is interposed between the Bacajá (the crustal reworking “lost link” now being predicted) and Rio Maria Archean terranes – Guaporé Craton. In: SBG, Simpósio de Geologia da Amazônia, v8, Manaus, *Resumos expandidos*. SBG. CD-ROM.
- Rosa-Costa L. T. 2006. *Geocronologia $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, Sm-Nd, U-Th-Pb e ^{40}Ar - ^{39}Ar do segmento Sudeste do Escudo das Guianas: evolução crustal e termocronologia do evento transamazônico*. TS Doutorado, Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 235p.

Ruy A. C. 2009. *Aplicação de dados magnéticos gradiométricos e gamaespectrométricos no terreno Granito-Greenstone Belt Três Palmeiras, Volta Grande do Xingu, Pará: implicações na caracterização geológico-geofísica e na seleção de alvos para exploração mineral*. DS Mestrado, Instituto de Geociências. Universidade de Brasília – UNB, 96p.

Sato K. & Tassinari, C.C.G. 1997. Principais eventos de acreção continental no Cráton Amazônico, baseados em idade modelo Sm-Nd, calculada em evoluções de estágio único e estágio duplo. *In: Costa, M.L. & Angélica, R.S. (coords.). Contribuições à Geologia da Amazônia*, v.1. p.91- 142.

Santos M.V.; Tassinari, C.C.G.; Souza Filho, E.E.; Teixeira, W.; Ribeiro, A.C.O.; Payolla, B.; Vasconi, A. 1988 . Litoestratigrafia das rochas precambrianas na Bacia do Médio Rio Xingu, Altamira, Pará. *In: SBG, Congresso Latino-Americano de Geologia*, v7. Belém. *Extended Abstracts*. p363-377.

Santos J.O.S.; Hartmann, L.A.; Gaudette, H.E.; Groves, D.I.; McNaughton, N.J.; Fletcher, I.R. 2000. A new understanding of the provinces of the Amazonian Craton based on integration of field mapping and U-Pb and Sm-Nd geochronology. *Gondwana Res.* 3(4). Pg 453-488.

Schobbenhaus C., Gonçalves J.H., Santos J.O.S., Abram M.B., Leão Neto R., Matos G.M.M., Vidotti R.M., Ramos M.A.B., Jesus J.D.A. de. 2004. Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo. *Sistema de Informações Geográficas*. Programa Geologia do Brasil. CPRM, Brasília. CD-ROM.

SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE (SEMAS). 2013. Proposta de termo de referência do Projeto Volta Grande. *Estudos ambientais para licenciamento prévio da Verena Mineração Ltda*. Belém, PA. 84 p.

Silva, G.G., Lima, M.I.C., Andrade, A.R.F., Issler, R.S. & Guimarães, G. 1974. Geologia: *Folha SB.22 Araguaia e parte da Folha SC.22 Tocantins*. Projeto RADAM (Levantamento de Recursos Naturais), v4, DNPM, Rio de Janeiro.

Tassinari, C.C.G. 1996. O mapa geocronológico do Cráton Amazônico no Brasil: Revisão dos dados isotópicos. TS de Livre docência, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 139p.

Tassinari, C.C.G.; Bettencourt, J.S.; Geraldés, M.C.; Macambira, M.J.B.; Lafon, J.M. 2000. The Amazonian Craton. *In: 31st International Geological Congress: Tectonic Evolution Of South America*. Cordani, U.G.; Milani, E.J.; Thomas Filho, A.; Campos, D.A. Rio de Janeiro. 41-96.

Tassinari, C.C.G. & Macambira, M.J.B. 1999. Geochronological provinces of the Amazonian Craton. *Episodes*, 22:174-182.

Tassinari, C.C.G. & Macambira, M.J.B. 2004. A evolução tectônica do Cráton Amazônico. *In: Mantesso-Neto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, C.D.R.; Brito Neves, B.B. (Eds.) Geologia do continente Sul-americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. Beca, São Paulo. p471-485.

Teixeira, W.; Tassinari, C. C. G.; Cordani, U. G.; Kawashita, K. 1989. A review of the geochronology of the Amazonian Cráton: tectonic implications. *Precambrian Research*, **42**: 213-227.

Vasquez, M. L. 2006. *Geocronologia em zircão, monazita e granada e isótopos de Nd das associações litológicas da porção oeste do Domínio Bacajá: evolução crustal da porção meridional da Província Maroni-Itacaiúnas – sudeste do Cráton Amazônico*. TS Doutorado, Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 234p.

Vasquez M.L., Macambira M.J.B., Armstrong R.A. 2008a. Zircon geochronology of granitoids from the western Bacajá domain, southeastern Amazonian craton, Brazil: Neoproterozoic to Orosirian evolution. *Precambrian Research*, 161: 279-302.

Vasquez M.L., Rosa-Costa L.T., Silva C.M.G., Klein E.L. 2008b. Compartimentação tectônica. In: Vasquez M.L. & Rosa-Costa L.T. (Org.). *Geologia e recursos minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas – SIG: texto explicativo dos mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará*. Escala 1:1. 000.000. Belém, CPRM. p. 39-112.

Wasserburg G.J., Jacobsen S.B., DePaolo D.J., McCulloch M.T., Wen T. 1980. Precise determination of Sm/Nd ratios, Sm and Nd isotopic abundances in standard solutions. *Geochim. Cosmochim. Acta* 45: 2311-2324.