



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

FACULDADE DE GEOLOGIA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LUCAS BAÍA MAGALHÃES

**GEOCRONOLOGIA U-Pb DA FORMAÇÃO URUPI E GEOQUÍMICA ISOTÓPICA  
Sr-Nd DO GRUPO IRICOUMÉ, DOMÍNIO EREPECURU-TROMBETAS OESTE,  
PROVÍNCIA AMAZÔNIA CENTRAL**

BELÉM - PARÁ

OUTUBRO – 2016

LUCAS BAÍA MAGALHÃES

GEOCRONOLOGIA U-Pb DA FORMAÇÃO URUPI E  
GEOQUÍMICA ISOTÓPICA Sr-Nd DO GRUPO IRICOURÉ,  
DOMÍNIO EREPECURU-TROMBETAS OESTE, PROVÍNCIA  
AMAZÔNIA CENTRAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade  
de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade  
Federal do Pará – UFPA, em cumprimento às exigências  
para obtenção do Grau de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Jean Michel Lafon

BELÉM

2016

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

---

Magalhães, Lucas Baía, 1992-

Geocronologia U-Pb da Formação Urupi e geoquímica isotópica Sr-Nd do Grupo Iricoumé, Domínio Erepecuru-Trombetas oeste, província Amazônia central / Lucas Baía Magalhães. – 2016.

60 f : il. ; 30 cm

Inclui bibliografias

Orientador: Jean Michel Lafon

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Geologia, Belém, 2016.

1. Geocronologia. 2. Geologia – Pará. 3. Arqueano - Paleoproterozoico. I. Título.

---

CDD 22. ed.: 551.712

LUCAS BAÍA MAGALHÃES

GEOCRONOLOGIA U-PB DA FORMAÇÃO URUPI E  
GEOQUÍMICA ISOTÓPICA SR-ND DO GRUPO IRICOURÉ,  
DOMÍNIO EREPECURU-TROMBETAS OESTE, PROVÍNCIA  
AMAZÔNIA CENTRAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade  
de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade  
Federal do Pará – UFPA, em cumprimento às exigências  
para obtenção do Grau de Bacharel em Geologia.

Data de aprovação: 04/11/2016

Conceito: BOM

Banca Examinadora:

---

Jean Michel Lafon - Orientador  
Doutor em Geologia  
Universidade Federal do Pará

---

Marco Antônio Galarza Toro – Membro  
Doutor em Geologia  
Universidade Federal do Pará

---

Lúcia Travassos da Rosa Costa – Membro  
Doutora em Geologia  
Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

À minha mãe, Wilma de Nazaré Baía Coelho,  
ao meu querido velho, Mauro Cezar Coelho e  
ao meu irmão, Breno Baía Magalhães

## **AGRADECIMENTOS**

Registro os meus agradecimentos à minha família, pelo imenso apoio e incentivo que me foi dado durante minha vida, necessários para a concretização desse sonho. À Nayara Ribeiro, a melhor companheira para todo e qualquer momento, sobretudo os mais árduos.

Agradeço à Universidade Federal do Pará (UFPA) e ao Instituto de Geociências (IG) pela infraestrutura despendida, fundamental na execução desse trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelas bolsas concedidas.

Ao Serviço Geológico do Brasil (CPRM) pela disposição de amostras utilizadas neste trabalho.

Ao Prof. Dr. Jean Michel Lafon, pelas orientações, explicações e paciência no decorrer do trabalho

Ao Prof. Dr. Moacir José Buenano Macambira por explicações e conversas sobre o tema do trabalho.

Ao Laboratório Pará-Iso (UFPA) pela infraestrutura concedida, sobretudo aos técnicos Jeferson Barbosa e Elma Oliveira.

Ao Laboratório de Geocronologia da Universidade de Brasília (UNB) pelas análises realizadas.

À Carla Barreto, pela contribuição nos estudos da região

À turma de Geologia (2010), em especial ao pessoal do grupo da Fuzarca.

E a todos que colaboraram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

## RESUMO

O Domínio Erepecuru-Trombetas, porção norte da Província Amazônia Central, apresenta expressivas associações vulcano-plutônicas Orosirianas. A primeira associação representada pela Formação Igarapé Paboca e Suíte Intrusiva Caxipacoré se formou no intervalo de 1,99 a 1,96 Ga. A segunda associação representada pelo Grupo Iricoumé e pelas suítes intrusivas Água Branca e Mapuera se formou no período de 1,90 a 1,86 Ga. Neste Domínio, há localmente coberturas sedimentares paleoproterozoicas representadas pela Formação Urupi que recobrem as rochas do Grupo Iricoumé. Dados geocronológicos para esta Formação são ausentes. Este trabalho tem como principal objetivo investigar a existência de registros arqueanos e contribuir para o entendimento da evolução paleoproterozoica (orosiriana) a partir de amostras pertencentes ao Grupo Iricoumé e a Formação Urupi no Domínio Erepecuru-Trombetas. Os métodos empregados compreendem petrografia, a datação de rocha magmática por evaporação de Pb em zircão, datação de zircões detríticos por LA-ICP-MS em rochas sedimentares e a geoquímica isotópica Nd-Sr. As idades Pb-Pb em zircão de um riolito do Grupo Iricoumé variam de  $1970 \pm 28$  Ma a  $1881 \pm 7$  Ma. A interpretação dessas idades foi que a idade de cristalização é de 1,89 Ga e as idades mais antigas representam componentes herdados/zircões herdados de rochas geradas no episódio magmático mais antigo de 1,99 Ga. As idades modelos Nd- $T_{DM}$  e Sr- $T_{UR}$  obtidas nas rochas vulcânicas do Grupo Iricoumé apontam para um intervalo entre 2,3 e 2,08 Ga (Período Riaciano) e idades variando de 2,26 a 1,91 Ga, respectivamente. Os resultados não apresentaram evidências de fontes arqueanas nas origens dos magmas paleoproterozóicos. A Formação Urupi apresenta quartzo arenito (>95% de quartzo) com grãos subangulosos à subarredondados com presença de alguns fragmentos líticos e *cherts*. Os zircões detríticos de uma amostra de quartzo-arenito foram caracterizados por MEV (microscopia eletrônica de varredura) quanto a sua textura e morfologia como, principalmente, cristais prismáticos, com zoneamentos oscilatórios finamente espaçados e alguns com alta concentração de U. As análises U-Pb *in situ* por espectrometria de massa com *laser ablation* (LA-ICP-MS) realizadas nesses zircões indicam duas populações de idades distintas. A primeira população, riaciana, apresenta idades variando entre 2.167 Ma e 2.050 Ma. A segunda população, neoarqueana, fornece idades entre 2.761 Ma e 2.573 Ma. A provável fonte dos zircões detríticos é da Província Transamazonas, a leste da Província Amazônia Central. Onde ocorreram ocorrências de rochas arqueanas e proterozóicas com idades semelhantes às obtidas nos zircões da Formação Urupi. O grão de zircão mais jovem obtido foi de 1.971 Ma ( $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ), portanto, pode-se afirmar que a Formação Urupi deve

ser mais jovem que o magmatismo de 1,99 Ga relativo a Formação Igarapé Ipaboca/ Suíte intrusiva Caxipacoré.

Palavras-chave: Província Amazônia Central. Domínio Erepecuru-Trombetas. Grupo Iricoumé. Formação Urupi.

## ABSTRACT

The Erepecuru-Trombetas Domain, northern part of the Central Amazonian Province, exhibit expressives volcano-plutonic associations during Orosirian. The first association represented by the Igarapé Paboca formation and granitoids of Caxipacoré Suite has formed at about 1,99 - 1,96 Ga. The second association represented by Iricoumé Group and the Água Branca e Mapuera suites has formed at about 1,90 - 1,86 Ga. In this Domain, locally there is paleoproterozoic sediments covers represented by the Urupi formation that are overlying the rocks of the Iricoumé Group. Geochronological data of this formation are absents. This work has as main objective to investigate the existence of archean records and to contribute to the understanding of the Paleoproterozoic (Orosirian) evolution through the samples of the Iricoumé Group and the Urupi Formation, Erepecuru-Trombetas Domain. The employed methods are petrography, the dating from magmatic rocks through Pb evaporation from zircon, dating of detrital zircons trough LA-ICP-MS of sedimentary rocks and Nd-Sr isotopic geochemistry. The ages of the zircons of a rhyolite from the Iricoumé Group range from  $1970 \pm 28$  Ma to  $1881 \pm 7$  Ma (Pb-Pb method). The interpretation of these ages was that the age of crystallization is 1.89 Ga and older ages represent inherited components/inherited zircons from rocks generated in the oldest magmatic episode of 1,99 Ga. The Nd- $T_{DM}$  and Sr- $T_{UR}$  model ages obtained in volcanic rocks of the Iricoumé Group range between 2,30 and 2,08 Ga (Rhyacian period) and from 2.26 to 1.91 Ga, respectively. The results do not show evidence of archean sources in the origin of the Proterozoic magmas. The Urupi formation contain quartz sandstone (> 95% quartz) with subrounded to subangular grains with the presence of some lytic fragments and cherts. The detrital zircons from this quartz-sandstone were characterized by SEM (scanning electron microscopy) by its texture and morphology as to being prismatic crystals, had finely spaced oscillatory zoning, and some with high concentrations of U. The U-Pb in situ analysis by laser ablation mass spectrometry (LA-ICP-MS) carried out on these zircons indicate two populations of different ages. The first rhyacian population presents ages ranging between 2167 Ma and 2050 Ma. The second neoarchean population provides ages between 2761 Ma and 2573 Ma. The probably source of those detrital zircons is the Transamazonian Province, adjacent to the east of Central Amazon Province. In particular, the sources of the most Archean zircons are the Amapá Block and rhyacian zircons are from both the rhyacian rocks from Amapá Block as the Carecuru and Parú Domain. The youngest zircon grain obtained was  $1.971 \pm 9.2$  Ma (207 Pb / 206 Pb).

Therefore, the Urupi formation must be younger than the magmatism of 1.99 Ga for the fact of having a concordant zircon related to Formação Igarapé Paboca and intrusive suite Caxipacoré.

Keywords: Central Amazonian Province. Erepecuru-Trombetas Domain. Iricoumé Group. Urupi formation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Localização da área de estudo. A área da coleta das amostras compreende, em sua maior parte, o perfil da margem do Rio Trombetas. O restante localiza-se na porção leste do Rio Trombetas, na margem do Rio Caxipacoré.....                                                                                                                                                                                                                    | 15 |
| Figura 2 - Plataforma Sul Americana composta pelas coberturas sedimentares fanerozoicas e pelos escudos: Atlântico, Brasil Central e Guianas. Os últimos dois escudos compõem o Cráton Amazônico.....                                                                                                                                                                                                                                                     | 16 |
| Figura 3 - Modelos de compartimentação do Cráton Amazônico. Em 1, o modelo de compartimentação por Tassinari e Macambira (2004) e em 2, o modelo de compartimentação de Santos et al. (2008) .....                                                                                                                                                                                                                                                        | 18 |
| Figura 4 - Divisão das principais províncias do Cráton Amazônico e os seus respectivos Domínios Pré-Cambrianos.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 19 |
| Figura 5 - Mapa geológico da área de estudo com localização das amostras coletadas.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 23 |
| Figura 6 - Aspectos texturais e mineralógicos microscópicos do Quartzo arenito (amostra LT-14). A) Predominância de grãos de quartzo, subarredondados à subangulosos, dispostos sem orientação preferencial. Notar os grãos policristalinos nos interstícios de grãos maiores (círculos amarelos). B) finas palhetas de sericita (Ser) intersticiais nos grãos de quartzo. C) e D) Cristais de zircão (Zrn) com feições prismáticas bem preservadas. .... | 31 |

Figura 7 - Nesta figura são esquematizadas as principais características identificadas nos zircões do Quartzito arenito. Os zircões aqui são representativos do conjunto de grãos fotografados por MEV. No meio do esquema há a variação dos tipos morfológicos identificados na amostra LT-14. É possível observar um predomínio nos cristais de zircões prismáticos em detrimento aos piramidais. Na porção superior do esquema têm-se três cristais de zircões com zoneamento oscilatório cuja espessura das bandas é discriminada. Ocorre um encurtamento no zoneamento oscilatório do cristal 1 ao cristal 3. Ao lado do zoneamento oscilatório, o zoneamento caótico é mais escasso. Por fim, na porção inferior, os núcleos de xenocristais identificados são inferidos. A sua ocorrência é significativa nos cristais de zircões selecionados. .... 33

Figura 8 - Em A, o Diagrama Concórdia. As elipses sobre a concórdia expressam as idades concordantes dos dois sistemas,  $Pb^{206}/U^{238}$  e  $Pb^{207}/U^{235}$ . Em B, o gráfico Frequências vs Idade  $^{207}Pb/^{206}Pb$ . Neste histograma as duas principais populações de zircões estão bem definidas, sendo o primeiro pico referente a população Riachiana e o segundo pico ao Arqueano. A sigla LAB2576 se refere ao laboratório geocronológico da UNB..... 35

Figura 9 - Diagrama com espectro de idades dos zircões do riolito (LT-08) ..... 39

Figura 10 - Diagrama  $\epsilon_{Nd(t)}$  vs tempo (Ga) das rochas vulcânicas do Grupo Iricoumé e Formação Igarapé Paboca, Domínio Erepecuru Trombetas..... 46

## SUMÁRIO

|            |                                                                                                   |           |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO.....</b>                                                                            | <b>14</b> |
| <b>1.1</b> | <b>Apresentação.....</b>                                                                          | <b>14</b> |
| <b>1.2</b> | <b>Localização da área.....</b>                                                                   | <b>15</b> |
| <b>1.3</b> | <b>Objetivos.....</b>                                                                             | <b>16</b> |
| <b>2</b>   | <b>CONTEXTO GEOLÓGICO.....</b>                                                                    | <b>17</b> |
| <b>2.1</b> | <b>Cráton Amazônico.....</b>                                                                      | <b>17</b> |
| <b>2.2</b> | <b>Província Amazônia Central.....</b>                                                            | <b>18</b> |
| 2.2.1      | Domínio Erepecuru-Trombetas.....                                                                  | 19        |
| <b>3</b>   | <b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>                                                                   | <b>23</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Materiais.....</b>                                                                             | <b>23</b> |
| <b>3.2</b> | <b>Métodos.....</b>                                                                               | <b>23</b> |
| 3.2.1      | Petrografia.....                                                                                  | 23        |
| 3.2.2      | Geocronologia U-Pb em zircão.....                                                                 | 24        |
| 3.2.3      | Geocronologia Sm-Nd e Sr.....                                                                     | 28        |
| <b>4</b>   | <b>RESULTADOS.....</b>                                                                            | <b>32</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Petrografia e geocronologia U-Pb em zircão por LA-ICP-MS da Formação Urupi.....</b>            | <b>32</b> |
| 4.1.1      | Petrografia.....                                                                                  | 32        |
| 4.1.2      | Morfologia e textura dos cristais de zircão do quartzo arenito.....                               | 33        |
| 4.1.3      | Datação dos zircões detríticos por LA-ICP-MS.....                                                 | 34        |
| <b>4.2</b> | <b>Geoquímica isotópica Nd-Sr e geocronologia Pb-Pb em zircão por TIMS do Grupo Iricoumé.....</b> | <b>40</b> |
| 4.2.1      | Datação Pb-Pb em zircão por TIMS.....                                                             | 40        |
| 4.2.2      | Idades Modelo Nd-Sr ( $Nd-T_{DM}$ ) e ( $Sr-T_{UR}$ ) .....                                       | 41        |
| <b>5</b>   | <b>DISCUSSÃO.....</b>                                                                             | <b>42</b> |
| <b>5.1</b> | <b>Evolução Orosiriana do Domínio Erepecuru-Trombetas.....</b>                                    | <b>42</b> |
| <b>5.2</b> | <b>Considerações sobre a idade da crosta continental do Domínio Erepecuru-Trombetas.....</b>      | <b>43</b> |
| <b>6</b>   | <b>CONCLUSÕES.....</b>                                                                            | <b>47</b> |
|            | <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                                                           | <b>48</b> |
|            | <b>APÊNDICE A – Zircões Detríticos LT-14 – (180-125µm) PARTE 01.....</b>                          | <b>53</b> |
|            | <b>APÊNDICE A – Zircões Detríticos LT-14 – (180-125µm) PARTE 02.....</b>                          | <b>54</b> |
|            | <b>APÊNDICE A – Zircões Detríticos LT-14 – (180-125µm) PARTE 03.....</b>                          | <b>55</b> |
|            | <b>APÊNDICE A – Zircões Detríticos LT-14 – (180-125µm) PARTE 04.....</b>                          | <b>56</b> |
|            | <b>APÊNDICE A – Zircões Detríticos LT-14 – (180-125µm) PARTE 05.....</b>                          | <b>57</b> |
|            | <b>APÊNDICE B – Zircões Detríticos LT-14 – (125-75µm) PARTE 01.....</b>                           | <b>58</b> |
|            | <b>APÊNDICE B – Zircões Detríticos LT-14 – (125-75µm) PARTE 02.....</b>                           | <b>59</b> |
|            | <b>APÊNDICE B – Zircões Detríticos LT-14 – (125-75µm) PARTE 03.....</b>                           | <b>60</b> |

## CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO

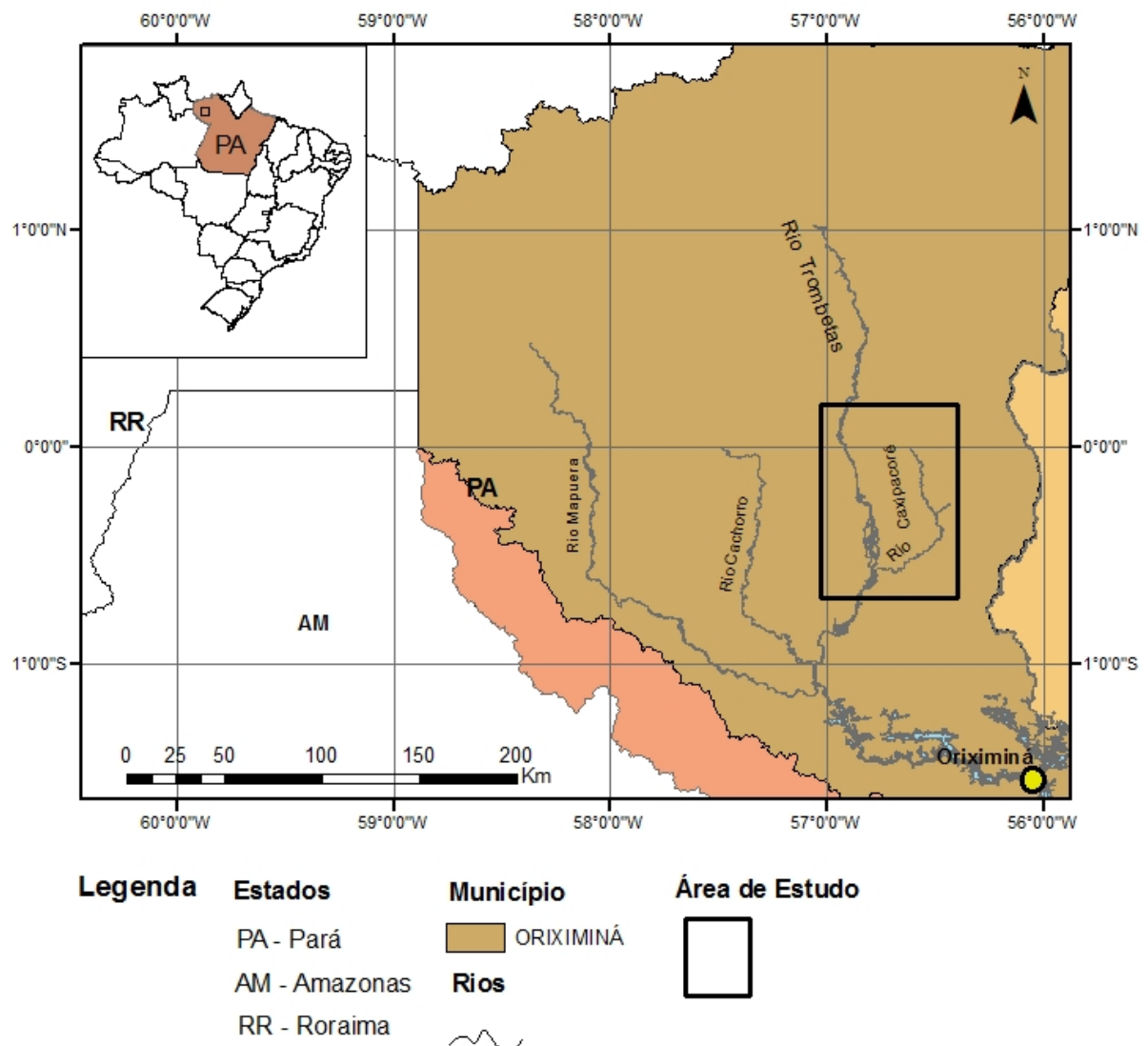
### 1.1 Apresentação

Uma das características mais marcantes do período Orosiriano, no continente Sul-Americano, foi o magmatismo intraplaca que ocorreu em toda a porção central e oriental da região Amazônica por volta de 2,0 a 1,86 Ga (BRITO NEVES, 2011). Inserido neste contexto, a Província Amazônia Central (TASSINARI; MACAMBIRA, 2004 e SANTOS et al, 2000a) apresenta expressivas associações vulcano-plutônicas deste magmatismo. Esta Província é dividida pela Bacia do Amazonas em dois domínios denominados de Domínio Erepecuru-Trombetas e Domínio Iriri-Xingú, a norte e a sul da Bacia, respectivamente. No Domínio Erepecuru-Trombetas estas associações marcam dois episódios magmáticos orosirianos de idades distintas. A primeira associação representada pela Formação Igarapé Paboca e Suíte Intrusiva Caxipacoré se formou no intervalo de 1,99 a 1,96 Ga (CASTRO ET AL, 2014). A segunda associação representada pelo Grupo Iricoumé e pelas suítes intrusivas Água Branca e Mapuera se formou no período de 1,90 a 1,86 Ga (BARRETO et al, 2013; 2014, LEAL, 2015, CASTRO et al, 2014). Todavia, este Domínio apresenta grande dificuldade de acesso e, conseqüentemente, de levantamento de dados. Uma cobertura sedimentar do Domínio Erepecuru Trombetas representada pela Formação Urupi (VEIGA et al, 1979) é um exemplo de uma unidade ausente de dados geocronológicos. O embasamento da Província Amazônia Central foi definido como supostamente arqueano com base nos dados geocronológicos obtidos no Domínio Iriri-Xingú (SATO; TASSINARI, 1997; TASSINARI; MACAMBIRA, 2004; SANTOS et al, 2000a) e estendidos para o Domínio Erepecuru-Trombetas. Embora recentes dados no Domínio Erepecuru-Trombetas indiquem a presença, sobretudo de um embasamento paleoproterozoico (BARRETO et al, 2014, LEAL, 2015). Entretanto, há dados de Sm-Nd, na porção norte que indicam registros arqueanos (CASTRO et al, 2014) . Portanto, algumas unidades litoestratigráficas, inclusive a Formação Urupi, são definidas por correlação com regiões adjacentes, também pela ausência ou carência desse acervo de dados. A justificativa deste trabalho recai na escassez do acervo geocronológico na porção norte da Província Amazônia Central, Domínio Erepecuru-Trombetas. A ênfase na melhor caracterização do evento vulcânico no Grupo Iricoumé e a obtenção de dados geocronológicos inéditos e petrográficos da Formação Urupi tem como intuito a investigação da presença ou ausência de um embasamento arqueano na porção norte da Província e a definição da sua posição estratigráfica.

## 1.2 Localização da área

A área de estudo está localizada na porção noroeste do Pará, especificamente no sul do município de Oriximiná. O acesso é feito via os rios, sobretudo o Rio Trombetas. Em específico, os perfis de amostragem encontram-se nas margens dos rios, sendo a maior concentração de rochas coletadas nas margens do Rio Trombetas e o restante na margem do Rio Caxipacoré. A área apresenta uma densa cobertura vegetal e diversas dificuldades de acesso que limitam a coleta de amostras nesta região. Todas as amostras foram coletadas pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM-Belem).

Figura 1 - Localização da área de estudo. A área da coleta das amostras compreende, em sua maior parte, o perfil da margem do Rio Trombetas. O restante localiza-se na porção leste do Rio Trombetas, na margem do Rio Caxipacoré.



Elaboração: Do Autor

### 1.3 Objetivos

Este trabalho tem como principal objetivo investigar a existência de registros arqueanos e contribuir para o entendimento da evolução paleoproterozoica (orosiriana) a partir de amostras pertencentes ao Grupo Iricoumé e a Formação Urupi no Domínio Erepecuru-Trombetas. Desta forma, os objetivos em específico são:

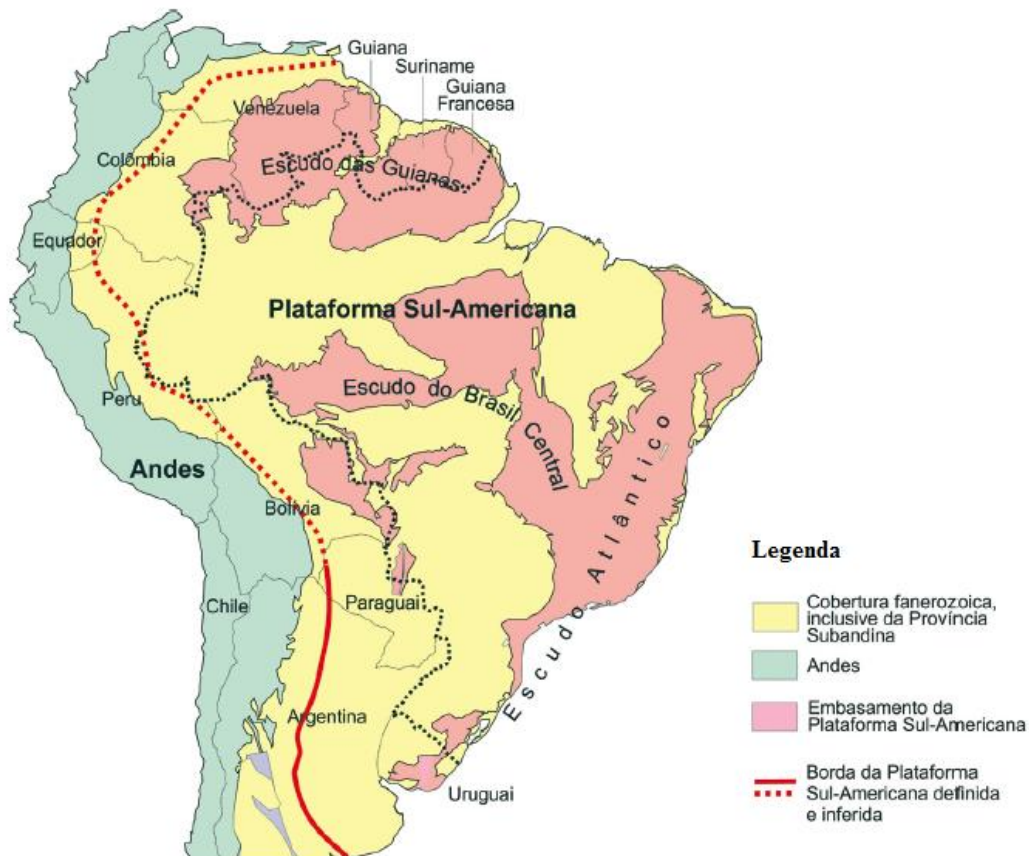
1. Obter idades de formação da crosta continental na Província Amazônia Central por meio de idades modelos Nd– $T_{DM}$  e Sr– $T_{UR}$ .
2. Investigar registros de componentes arqueanos na Província Amazônia Central, seja na forma de componentes herdados ou rochas preservadas, através de métodos, em rocha total de Rb-Sr e Sm-Nd e em zircões pelo método Pb-Pb (TIMS) e pelo método U-Pb (LA-ICP-MS).
3. Definir a idade de deposição máxima da Formação Urupi por meio do método U-Pb (LA-ICP-MS) em zircões detríticos.
4. Discutir as características crustais ou juvenis do magmatismo das rochas vulcânicas do Grupo Iricoumé a partir do  $\epsilon Nd$ .

## CAPÍTULO 2-CONTEXTO GEOLÓGICO

### 2.1 Cráton Amazônico

O Cráton Amazônico (CA) é uma entidade geotectônica de comportamento estável a partir do início do Neoproterozoico (1 Ga) que compõe, juntamente com o Escudo Atlântico e extensas coberturas fanerozoicas, a Plataforma Sul Americana. O Cráton é dividido por bacias sedimentares orientadas aproximadamente leste-oeste, originando dois escudos: o escudo das Guianas (a norte) e o escudo Brasil Central ou Guaporé (a sul) (HASUI, 2012).

Figura 2 - Plataforma Sul Americana composta pelas coberturas sedimentares fanerozoicas e pelos escudos: Atlântico, Brasil Central e Guianas. Os últimos dois escudos compõem o Cráton Amazônico.



Fonte: Modificado de Hasui, 2012.

Nos últimos 30 anos foram apresentadas várias propostas de compartimentações para o Cráton Amazônico a partir do trabalho pioneiro de Cordani (1979) e que depois foi sendo consolidado com a obtenção de novos dados geológicos e geocronológicos. Atualmente, os dois modelos predominantes são apresentados por: Santos et al. (2000, 2008) e Tassinari e Macambira (1999, 2004). No primeiro modelo, os autores compartimentaram o Cráton em sete províncias referidas como províncias estruturais: Carajás, Província Amazônia Central,

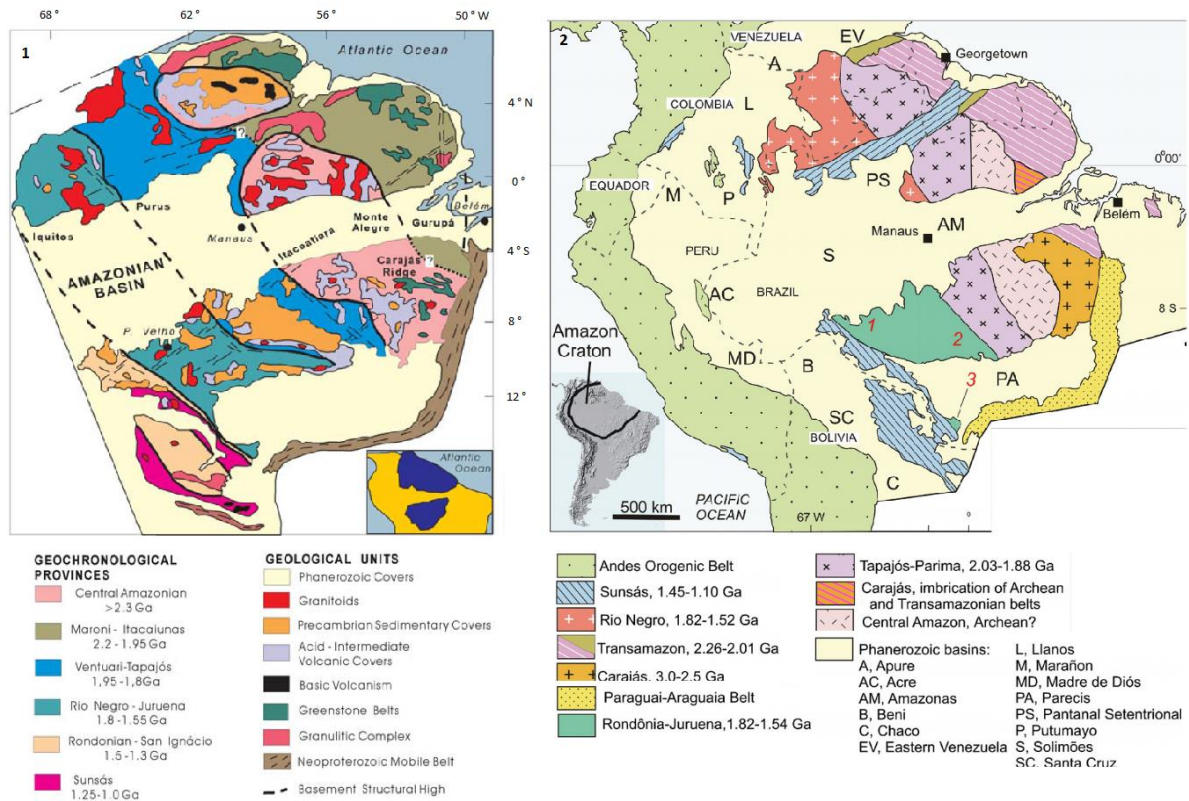
Transamazonas, Província Tapajós-Parima, Província Rio Negro, Província Rôndônia-Juruena e Província Sunsás, enquanto que no segundo modelo, os autores compartimentaram o Cráton em seis províncias referidas como províncias geocronológicas: Província Amazônia Central, Província Maroni-Itacaiúnas, Província Ventuari-Tapajós, Província Rio Negro Juruena, Província Rondoniana San Ignácio e Província Sunsás.

## **2.2 Província Amazônia Central**

A designação da Província Amazônia Central (PAC) tem sido apresentada com significados tectônicos distintos pelos principais autores que compartimentaram o Cráton Amazônico. Na concepção de Tassinari e Macambira (1999, 2004), a PAC é a crosta continental mais antiga do Cráton Amazônico, definida como arqueana, não afetada pela orogenia Transamazônica (2,2 a 1,9 Ga), na qual foram acrescidas faixas móveis paleoproterozoicas. Todavia, Santos et al. (2000, 2006) redefiniram os limites da PAC. A principal redefinição foi o desmembramento da Província Mineral de Carajás a leste da PAC, pois a Província Carajás é um segmento arqueano preservado, enquanto que no restante da província estrutural tais unidades arqueanas são ausentes. Outra redefinição foi a aglutinação da porção oeste da PAC na Província Tapajós-Parima, resultando em uma redução de aproximadamente metade da área original. Portanto, após estas redefinições, definiram-se os limites da Província Amazônia Central a leste pela Província Carajás e a Província Transamazonas e a oeste pela Província Tapajós-Parima.

A Província Amazônia Central é dividida pela Bacia do Amazonas em dois domínios: Domínio Erepecuru-Trombetas e Domínio Iriri-Xingú, a norte e a sul da Bacia, respectivamente. A idade obtida para a Província é dada a partir de idades modelo Nd- $T_{DM}$  e em zircões herdados interpretados como sendo idades de fontes crustais supostamente arqueanas. Neste caso, as amostras foram obtidas na porção sul da Província, no Domínio Iriri-Xingú. Apesar desses dados geocronológicos, as rochas arqueanas não são expostas. A área de estudo está localizada na Província Amazônia Central, especificamente no Domínio Erepecuru-Trombetas, acima da Bacia Amazonas

Figura 3 - Modelos de compartimentação do Cráton Amazônico. Em 1, o modelo de compartimentação por Tassinari e Macambira (2004) e em 2, o modelo de compartimentação de Santos et al. (2008).



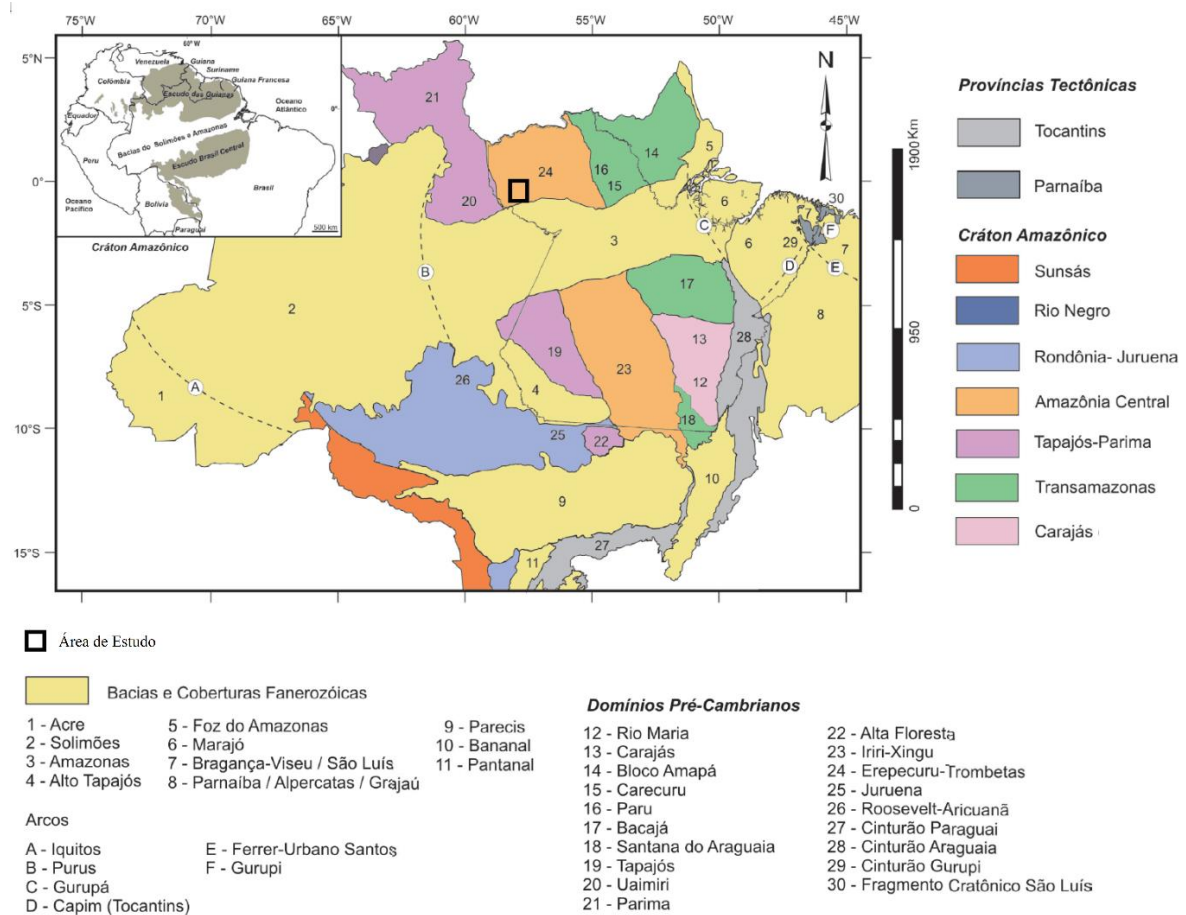
Fonte: Esquema dos modelos de compartimentação. 1:Tassinari e Macambira (2004) e 2:Santos (2008).

### 2.2.1 Domínio Erepecuru-Trombetas

Diversos dados geológicos, geofísicos foram obtidos do Domínio Erepecuru-Trombetas a partir de projetos como do Projeto Radar da Amazônia (OLIVEIRA et al, 1975) e outros projetos (ARAÚJO et al. 1976; CHAVES et al. 1977; JORGE JOÃO et al. 1984 apud VASQUEZ et al., 2008). O Domínio sequências se constitui, principalmente de rochas metavulcanossedimentares e duas associações vulcano-plutônicas de idades entre 1,99 e 1,89 Ga. A primeira associação, mais recente, é formada por rochas das suítes intrusivas Água Branca e Mapuera e pelas rochas vulcânicas do Grupo Iricoumé. A segunda associação, mais antiga é constituída por granitoides da Suíte Intrusiva Caxipacoré e vulcânicas da Formação Igarapé Paboca. Rochas sedimentares, máficas indiferenciadas, diabásios e nefelinassienitos também são descritas neste Domínio (CASTRO et al, 2014). Este Domínio divide-se, com base na maior e menor expressão do embasamento, em Domínio Erepecuru-Trombetas Leste e Domínio Erepecuru-Trombetas Oeste, respectivamente. A área de estudo, inserido no

Domínio Erepecuru-Trombetas Oeste, é constituída pelas associações vulcano-plutônicas representadas pelos granitóides da Suíte Intrusiva Caxipacoré e as rochas vulcânicas do Grupo Iricoumé e Formação Igarapé Paboca; e subordinamente, rochas sedimentares paleoproterozoicas da Formação Urupi, assim como rochas máficas e sieníticas.

Figura 4 - Divisão das principais províncias do Cráton Amazônico e os seus respectivos Domínios Pré-Cambrianos.



Fonte: Vasquez et al, 2008.

### Unidades Litoestratigráficas da área de estudo

A área de estudo é constituída predominantemente por rochas vulcânicas do Grupo Iricoumé, Formação Igarapé Paboca e por rochas graníticas da Suíte Intrusiva Caxipacoré. Ocorrem subordinadamente rochas máficas indiferenciadas e arenitos da Formação Urupi. As unidades estão dispostas na figura 5.

- Formação Igarapé Paboca

A Formação Igarapé Paboca é constituída de rochas vulcânicas e piroclásticas ácidas a intermediárias de afinidade cálcio alcalina, com predomínio de andesitos e dacitos. A idade Pb-Pb em zircão é de  $1992 \pm 3$  Ma e a idade obtida pelo método U-Pb em zircão é de  $1948 \pm 6$  Ma. Portanto, esta formação é referente ao episódio magmático identificado recentemente no Domínio Erepecuru Trombetas de 1,99 a 1,96 Ga. As suas idades modelos apontam para o intervalo de 2,33 a 2,01 Ga (Riaciano) (BARRETO et al., 2014, CASTRO et al, 2014).

- Suíte Intrusiva Caxipacoré

A Suíte Intrusiva Caxipacoré é constituída de monzogranitos a sienogranitos que apresentam idades Pb-Pb em zircão de  $1982 \pm 9$  Ma e  $1977 \pm 4$  Ma e idade U-Pb em zircão de  $1985 \pm 5$  Ma (LEAL, 2015 e CASTRO et al, 2014). Portanto, essa suíte intrusiva é contemporânea ao evento vulcânico de 1,99 Ga, identificado por Barreto et al, (2013). A sua natureza é cálcio-alcalina a shoshonítica e sua idades modelo Nd- $T_{DM}$  é em média 2,00 Ga (LEAL, 2015).

- Grupo Iricoumé

As rochas vulcânicas pertencentes ao Grupo Iricoumé são constituídas principalmente por rochas ácidas a intermediárias com idades variando entre  $1.888 \pm 2,5$  Ma e  $1.889 \pm 2$  Ma. Os resultados Sm-Nd em rocha total forneceram idades  $T_{DM}$  de 2,94 a 1,98 Ga e valores de  $\epsilon Nd$  entre -3,04 e +2,35, indicando fontes de idades arqueanas a paleoproterozóicas. As características geoquímicas deste Grupo sugerem que as rochas se formaram em um ambiente tectônico pós-orogênico (BARRETO et al, 2014).

- Rochas Máficas indiferenciadas

São rochas fundamentalmente cartografadas com base na interpretação de produtos de sensores remotos, incluindo imagens aerogeofísicas (Companhia de recursos minerais - CPRM, 2004). Formam diversos corpos de rochas máficas, intrusivos principalmente no Grupo Iricoumé, Formação Igarapé Paboca, Suíte Intrusiva Mapuera e na Suíte Intrusiva Caxipacoré. São corpos arredondados, sem direção preferencial com textura lisa e baixa densidade de drenagem. Não há dados geocronológicos, porém, foi interpretada como um magmatismo máfico intracontinental relacionado à extensão orosiriana de 1,88 Ga ou estateriana de 1,78 Ga (VASQUEZ et al, 2008).

- Formação Urupi

As rochas sedimentares da Formação Urupi foram descritas, originariamente, na região dos rios Pitinga, Jatapu e Capu-Capu, no estado do Amazonas. Neste contexto, no Domínio Uatumã-Anauá, a Formação Urupi recobre as rochas vulcânicas do Iricoumé e são seccionadas por soleiras do Diabásio Quarenta Ilhas. A idade obtida pelo método U-Pb em badelleyita para o sill Quarenta Ilhas foi de 1.788 Ma (SANTOS et al, 2000b), estabelecendo a idade mínima para a sedimentação, e a idade máxima seria de 1,89 Ga (SANTOS et al, 2002) obtida das rochas vulcânicas do Grupo Iricoumé. No Domínio Erepecuru-Trombetas, no noroeste do Pará, as rochas sedimentares pertencentes a Formação Urupi desenham um conjunto de serras estreitas e alongadas, principalmente segundo a direção NW-SE (JORGE JOÃO et al, 1984) e recobrem, de forma igual no Amazonas, as rochas do Iricoumé, todavia, é ausente o seccionamentos de outras unidades estratigráficas. Atualmente, não há dados geocronológicos da Formação Urupi.

Uma espessura de 810 m para esta Formação foi estimada por Veiga et al, (1979) que divide-se em dois pacotes. O pacote inferior é representado por quartzo arenitos, conglomerados, argilitos e siltitos, e próximo ao topo há intercalações com rochas piroclásticas. No pacote superior, dominam os arenitos arcoseanos com níveis de tufos e rochas vulcanoclásticas.

## CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 Materiais

As amostras utilizadas neste estudo foram coletadas durante as campanhas de campo para a elaboração da folha Rio Trombetas e cedidas pela CPRM-Belém. Os perfis foram realizados ao longo dos rios Trombetas e Caxipacoré e a coleta das amostras estudadas neste trabalho incluiu rochas vulcânicas do Grupo Iricoumé e uma amostra de quartzo arenito da Formação Urupi.

As rochas vulcânicas foram analisadas pelos métodos Sm-Nd e Rb-Sr para se obter idades modelos e uma amostra foi escolhida para a análise Pb-Pb em zircão para se obter a idade de formação do vulcanismo. No caso da rocha sedimentar, a amostra foi analisada pelo método U-Pb para estudo de proveniência. A unidade litoestratigráfica, tipo de depósito, classificação da rocha, composição, sigla da amostra e os respectivos métodos utilizados estão especificados na tabela 1.

Tabela 1 - Classificação das amostras e seus respectivos métodos de análise.

| Unidade                   | Tipo de Depósito     | Rocha           | Composição | Sigla | Método      |
|---------------------------|----------------------|-----------------|------------|-------|-------------|
| <b>Litoestratigráfica</b> |                      |                 |            |       |             |
| *Grupo Iricoumé           | Piroclásticas        | Ignimbrito      | Riolito    | LT-03 | Rb-Sr       |
|                           |                      | Ignimbrito      | Riolito    | LT-18 | Sm-Nd/Rb-Sr |
|                           |                      | Ignimbrito      | Traquito   | LT-29 | Sm-Nd/Rb-Sr |
|                           |                      | Ignimbrito      | Traquito   | LT-32 | Sm-Nd/Rb-Sr |
|                           | Hipabissais          | -               | Traquito   | LT-26 | Sm-Nd/Rb-Sr |
|                           |                      |                 | Riolito    | LT-08 | U-Pb        |
|                           | Efusivas             | -               | Andesito   | LT-24 | Sm-Nd/Rb-Sr |
|                           |                      |                 |            |       |             |
| Formação Urupi            | Cobertura Sedimentar | Quartzo-Arenito | -          | LT-14 | U-Pb        |

Fonte: \*Classificações segundo Barreto et al, 2014.

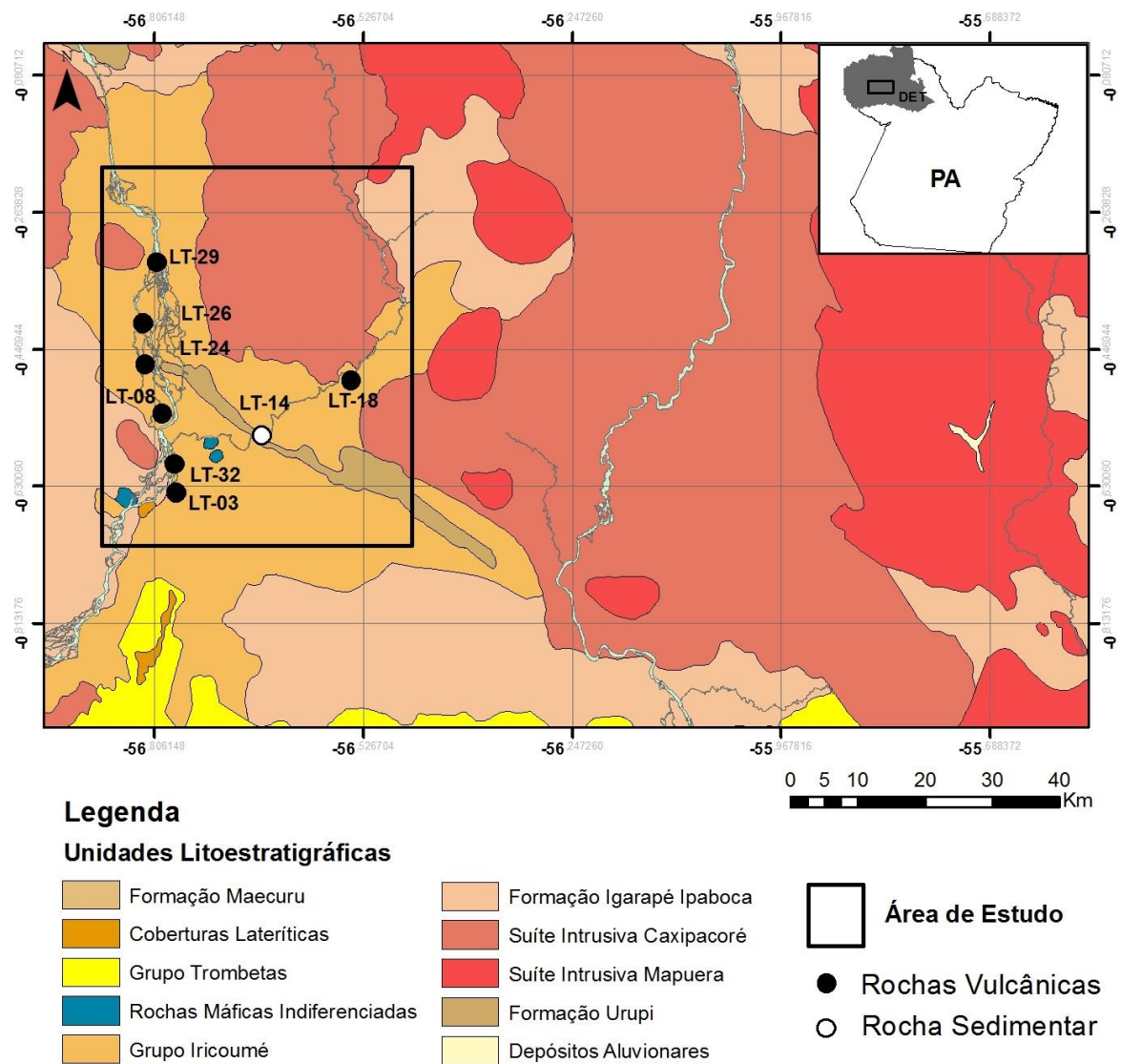
### 3.2 Métodos

#### 3.2.1. Petrografia

O estudo petrográfico foi realizado em uma lâmina delgada da amostra LT-14 do quartzo-arenito da Formação Urupi, cedida pela CPRM Belém. A análise textural e mineralógica foi realizada a partir de microscópio ótico. As demais amostras do Grupo Iricoumé possuem descrições petrográficas anteriores realizadas por Barreto et al, (2013; 2014), além de dados geoquímicos obtidos pelos mesmos autores. De acordo com a

caracterização petrográfica, as rochas do Grupo Iricoumé podem ser classificadas em dois tipos de vulcanismo. O primeiro é o vulcanismo piroclástico, representados pelos ignimbritos (LT 03, 18, 29 e 32) e o segundo é o vulcanismo efusivo/hipabissal (LT 08, 24 e 26). Segundo a classificação geoquímica, as composições das amostras LT 29, LT 32, LT 26 são traquitos, as composições das amostras LT 08, LT 03 e LT 18 são riolitos e da amostra LT 24 é um andesito.

Figura 5 - Mapa geológico da área de estudo com localização das amostras coletadas.



Fonte: Castro et al, 2014.

### 3.2.2. Geocronologia U-Pb em zircão

A metodologia empregada foi a partir de cristais de zircões para duas amostras distintas: uma rocha sedimentar (LT 14) e uma rocha magmática (LT 08). A amostra LT 14 é um quartzo arenito da Formação Urupi e seus cristais de zircão foram analisados com base no princípio do método U-Pb por LA-ICP-MS no Laboratório de Geocronologia da UNB (Universidade de Brasília). Enquanto que a amostra LT 08 é um riolito e seus zircões foram analisados pelo com base no princípio do método Pb-Pb por eevaporação em zircão no TIMS, Laboratório Pará-Iso na UFPA.

#### Princípio do método radiométrico U-Pb

O sistema U-Pb se baseia no decaimento dos isótopos de urânio para o chumbo. Apesar da ocorrência natural de três isótopos de urânio, apenas o  $^{238}\text{U}$  e o  $^{235}\text{U}$  decaem espontaneamente para  $^{206}\text{Pb}$  e  $^{207}\text{Pb}$ , respectivamente. O isótopo  $^{238}\text{U}$  detém a meia vida de  $4,468 \times 10^9$  (anos) e a constante de decaimento de  $1,551 \times 10^{-10}$  ( $\text{ano}^{-1}$ ), enquanto que o isótopo  $\text{U}^{235}$  possui a meia vida de  $0,7038 \times 10^9$  (anos) e a constante de decaimento de  $9,8485 \times 10^{-10}$  ( $\text{ano}^{-1}$ ) (FAURE, 1986). Um aspecto importante desse sistema é que pode ser realizado o cálculo de datas apenas pela razão  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ , pois a razão  $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$  tem um valor constante de 137,82 (HIESS et al, 2012). A seguir serão explanadas as especificidades da metodologia por datação de rocha magmática por evaporação de Pb em zircão e datação de zircões detríticos por LA-ICP-MS em rochas sedimentares.

- Princípio do método Pb-Pb por TIMS

O método utilizado no espectrômetro de massa por ionização térmica (TIMS) se baseia na ionização da superfície de um átomo ou molécula em contato com uma superfície aquecida e foi desenvolvida por Kober 1986, 1987. É uma forma adaptada do tubo de cátodo (THOMSON, 1897) que é a emissão de elétrons a partir de um metal aquecido. Na verdade, o fundamento de separação de massa, tanto no ICP MS quanto no TIMS é basicamente o mesmo. Ambos se baseiam que o íon percorre perpendicularmente a um campo magnético e sofre uma força que causa um trajeto curvo de raio proporcional a razão massa/carga do íon (NIER, 1947). Não sendo necessária uma análise pontual ou de descrição específica do cristal, este método cumpre as exigências para uma análise de zircões magmáticos.

- Princípio do método LA-ICP-MS

O LA-ICP-MS consiste em método analítico *in situ* para medições de composições de isótopos radiogênicos e isótopos estáveis não tradicionais e elementos maiores, menores e traço em amostras sólidas. Este método permite medições de multi-elementos e/ou isotópicos

de espécies de amostras na escala de  $\mu\text{m}$ , incluindo inclusões fluídas, grãos de minerais e matriz intertiscial. (AREVALO JR, 2014). O método de ablasão a laser em um espectrômetro de massa com plasma indutivamente acoplado têm sido o mais usual para analisar zircões detriticos, cujas datas obtidas possuem alta precisão e exatidão. Consiste basicamente da ablasão de uma superfície de amostra e a condução das partículas resultantes para análise no espectrômetro (FRYER et al, 1995 e KOSLER, 2008)

O LA-ICP-MS consiste de duas partes: a primeira é o sistema de ablasão a laser e a segunda é o ICP MS. O sistema de laser (LA) consiste de uma fonte sólida ou gasosa de curto comprimento de onda. Geralmente, os lasers de pequeno comprimento de onda com taxas de pulso controlado são mais eficientes na ablasão de amostras, pois minimizam o calor e o fracionamento isotópico. Neste sistema, a amostra sólida sofre ablasão em um domínio pontual e suas partículas são transportadas, usualmente, pelo gás Hélio até o espectrômetro (THOMPSON; HOUK, 1987). Em seguida, as partículas são ionizadas, usualmente, em um plasma de Argônio para os íons serem analisados no ICP MS.

O LA-ICP-MS prove um meio rápido e rentável para se obter muitos dados U-Pb, inclusive pontuais, ideais para a caracterização complexa de populações de zircões detriticos (FEDO et al, 2003). Segundo Gehrels (2011), existem três motivos principais para o estudo de zircões detriticos: 1) Caracterizar a proveniência do sedimento comparando com fontes conhecidas, 2) Correlacionar unidades sedimentares, assumindo a mesma proveniência e 3) Quantificar a idade de deposição máxima de um estrato. O estudo de proveniência é uma das aplicações mais comuns na geocronologia de zircões detriticos pelo método U-Pb. O estudo compreende uma série de estratégias para poder realizar tal análise, portanto as fotografias por catodoluminescência e as descrições morfológicas são fundamentais para este estudo. Os critérios seguidos, segundo Gehrels, 2014: a) As amostras devem ser coletadas sem discriminação de zircões quanto tamanho ou morfologia; b) Os grãos devem ser selecionados para análise de forma randômica; c) O método analítico deve permitir uma análise de grãos de variáveis tamanhos; d) As imagens de MEV devem identificar porções favoráveis de análise, sem evitar grãos inteiros; e) Deve ser focadas as datas mais confiáveis, com melhor precisão, e menor discordância

Em certos casos é possível utilizar idades de zircões detriticos para caracterizar uma unidade sedimentar (GEHRELS, 2014). Isto tem sido considerado como para estabelecer uma cronofácies ou uma referência. Deve ser analisado de acordo com as unidades sedimentares de cada região.

O estabelecimento da idade de deposição máxima é uma das aplicações mais importantes da geocronologia de zircões detríticos. É determinada pela chamada lei dos zircões detríticos: “Uma unidade sedimentar não pode ser mais antiga que o grão mais jovem de zircão”. Esta é uma informação fundamental para estratos que não possuem fósseis ou outras formas de controle bioestratigráfico (GEHRELS, 2014). Entretanto, existem diversas complicações que alteram no resultado de datas calculadas que são mais jovens que a verdadeira idade de deposição. Um exemplo de causa para este erro é a perda de chumbo.

O LA-ICP-MS permite obter diversas razões do sistema U-Pb, como por exemplo,  $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$  e  $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$ . E uma forma de representar o sistema geocronológico U-Pb é pelo diagrama da Concórdia. Este diagrama se configura em um diagrama de eixos  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  (abscissa) e  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  (ordenada), uma vez que o decaimento dos dois isótopos de urânio para o chumbo resultam em dois geocronômetros. Os resultados das razões  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  e  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  que são plotadas em um mesmo ponto na curva da concórdia apresentam mesma idade, enquanto que os pontos localizados fora desta curva são chamados de discordantes. Com as idades concordantes a subconcordantes pode se elaborar um histograma de frequência que apresenta a quantidade de idade obtidas  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ . A partir deste histograma pode se indicar possíveis populações de idades distintas dos zircões.

#### Procedimento da separação e triagem dos zircões para análise U-Pb

O procedimento experimental consistiu nas etapas de britagem de amostra de mão, peneiramento nas frações granulométricas 180–125  $\mu\text{m}$ , 125–75  $\mu\text{m}$  e elutriação (como etapa de separação de cristais leves e pesados). Em seguida, os minerais magnéticos e não-magnéticos das amostras foram segregados com o separador magnético *Isodynamic Frantz* (vertical e horizontal, para uma separação magnética efetiva). Posteriormente, foi feita a concentração de minerais com densidade acima de 2,85  $\text{g}/\text{cm}^3$  (ou minerais pesados, como o zircão) a partir de líquido pesado (bromofórmio). A partir desse concentrado de minerais não-magnéticos e pesados, foi realizada uma triagem e separação manual dos cristais de zircão com auxílio de uma lupa binocular. Após esta etapa, o procedimento analítico a ser tomado se diverge para o método LA-ICP-MS e o por TIMS.

- Procedimento analítico Pb-Pb em zircão por TIMS

O estudo geocronológico de Pb-Pb por evaporação no TIMS foi realizado com a amostra LT-08 (Riolito). Esta amostra representa um vulcanismo efusivo do Grupo Iricoumé e é analisada para melhor caracterização do magmatismo deste Grupo vulcânico.

Os cristais selecionados foram depositados em um filamento de rênio em formato de canoa e colocados no TIMS (Laboratório Pará-Iso, Universidade Federal do Pará). A técnica de depósito é: posiciona-se frente a frente dois filamentos, sendo um filamento de evaporação, onde o zircão é depositado, e um filamento de ionização, a partir do qual o Pb é analisado. Geralmente, são realizadas até três etapas progressivas de evaporação ou aquecimento a temperaturas de 1450°C, 1500°C e 1550°C, com duração de 3 a 5 minutos de evaporação em cada etapa, dependendo da quantidade de Pb contida no zircão. Após a evaporação, seu filamento é desligado e o de ionização é aquecido a uma temperatura em torno de 1200 °C quando o Pb ali depositado é então ionizado.

- Procedimento analítico U-Pb em zircões detríticos por LA-ICP-MS

A mostra LT-14 (Quartzo-Arenito) representa a Formação Urupi no Domínio deste estudo. O método mais adequado para a análise de seus zircões foi o LA-ICP-MS para uma análise pontual de seus zircões afim de: caracterizar sua proveniência, correlacionar com outras unidades e obter sua idade de deposição máxima.

Os cristais de zircão separados são inseridos em pastilhas que contém resina epoxy para poder realizar o polimento com lixa das mesmas. Após a superfície exposta do zircão está límpida é realizada a obtenção de imagens por microscópio eletrônico de varredura (MEV), realizadas no laboratório de microanálises do IG na UFPA. Por fim, os zircões sofreram ablação no LA-ICP-MS. Esta última análise foi realizada no laboratório da UNB e seus respectivos dados finais cedidos para este estudo. As discriminações instrumentais de massa foram corrigidas pelas análises sucessivas dos padrões de zircão 91500 (WIEDENBECK et al, 1995), cuja idade é  $1065,4 \pm 0,3$  Ma.

### 3.2.3. Geocronologia Sm-Nd e Sr

As análises isotópicas Sm-Nd e Sr foram realizadas com as amostras LT-03, LT-18, LT-24, LT-26, LT-29 e LT-32, pertencentes ao Grupo Iricoumé. As leituras isotópicas foram realizadas no ICP-MS, Laboratório Pará-Iso, UFPA.

#### Princípios do método Sm-Nd

O sistema Sm-Nd se baseia no decaimento espontâneo do isótopo radioativo do Sm<sup>147</sup> para o Nd<sup>143</sup>. A taxa de decaimento é de  $6,54 \times 10^{-12}$  (ano) e meia vida de 106 bilhões de anos. Dentre os isótopos de Neodímio, o Nd<sup>144</sup> é considerado estável, isto é, não decai espontaneamente, sendo utilizado como isótopo de referência, pois, seu número de átomos permanece inalterado.

As idades modelo Nd são calculadas de acordo com o modelo de evolução isotópica do Nd do manto empobrecido, ou seja, manto superior (ou simplesmente DM, sigla proveniente do inglês “*DepletedMantle*”), o qual considera que o manto superior tenha sofrido sucessivos episódios de diferenciação e fracionamento, tornando-se gradativamente mais empobrecido em Nd. Aliás, o termo “*depleted*”, isto é, “empobrecido” se refere aos íons de raio iônico grande (LIL), os quais são elementos incompatíveis, logo são fracionados preferencialmente na fase líquida e empobrecem o manto (FAURE, 1986). Para se calcular a idade modelo deve-se utilizar da equação:

$$t = 1/\lambda \ln \left[ \left( \frac{{}^{143}\text{Nd}}{{}^{144}\text{Nd}} \right)_R^0 - \left( \frac{{}^{143}\text{Nd}}{{}^{144}\text{Nd}} \right)_{\text{DM}}^0 / \left( \frac{{}^{147}\text{Sm}}{{}^{144}\text{Nd}} \right)_R^0 - \left( \frac{{}^{147}\text{Sm}}{{}^{144}\text{Nd}} \right)_{\text{DM}}^0 + 1 \right]$$

Na qual os valores da equação são todos no presente. A razão  $({}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd})_R^0$  e as concentrações atuais de Sm e Nd para o cálculo da razão  $({}^{147}\text{Sm}/{}^{144}\text{Nd})_R^0$  são medidos e as razões referentes ao DM são constantes.

Portanto, a idade modelo calcula o tempo de residência das rochas na crosta que podem ter sofrido diversos episódios de metamorfismo durante os quais os geocronômetros de Rb-Sr e K-Ar podem ter sido alterados (DEPAOLO, 1988).

Notação  $\epsilon_{\text{Nd}}^t$

Este parâmetro consiste na comparação da razão  ${}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd}$  da amostra, na época de cristalização, com a razão  ${}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd}$  do DM no mesmo tempo de cristalização da amostra. A fórmula é dada pela transcrição matemática dessa lógica:

$$\epsilon_{\text{ND}}^t = \left[ \left( \frac{{}^{143}\text{Nd}}{{}^{144}\text{Nd}} \right)_R^t / \left( \frac{{}^{143}\text{Nd}}{{}^{144}\text{Nd}} \right)_{\text{DM}}^t - 1 \right] \times 10^4$$

É possível interpretar a formação de crosta continental a partir das informações obtidas deste parâmetro. A adição de rochas plutônicas e vulcânica derivadas do manto apresentam épsilon positivos e, em contrapartida, quando ocorre retrabalhamento de rochas crustais durante orogenias por metamorfismo regional e/ou por processos de fusão parcial são obtidos valores de épsilon negativo.

Princípios do método Rb-Sr

À semelhança do método Sm-Nd, serão calculadas idades modelos, no caso, o  $T_{UR}$  a partir da evolução do Sr em um reservatório indiferenciado a fim de se investigar a fonte das rochas, cujos parâmetros são os seguintes:  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})^0_{UR} = 0,7045$  e  $(^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})^0_{UR} = 0,0827$  (razões do presente) (DEPAOLO; WASSERBURG, 1977). Este reservatório é baseado numa interpretação feita a partir de uma correlação de que muitas razões  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  e  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  eram muito próximas em basaltos oceânicos recentes, e assim é possível estimar a razão Rb/Sr da Terra. Todavia, por ser obtida nessa correlação, sua relevância é menor que as com a sistemática Sm-Nd. E por não ser claramente um reservatório condritico, tem-se referido a ele simplesmente como reservatório indiferenciado. Para se calcular esta idade modelo deve-se utilizar a equação:

$$t = 1/\lambda \ln [(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})^0_R - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})^0_{UR} / (^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})^0_R - (^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})^0_{UR} + 1]$$

Na qual os valores da equação são todos no presente. A razão  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})^0_R$  e as concentrações atuais de Rb e Sr para o cálculo da razão  $(^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})^0_R$  são medidos e as razões referentes ao UR são constantes.

É importante enfatizar o comportamento geoquímico oposto do Rb-Sr e do Sm-Nd, pois enquanto o isótopo pai em uma sistemática é mais compatível em relação ao isótopo filho (por exemplo, a sistemática Sm-Nd), o contrário ocorre na sistemática Rb-Sr. E esta idade modelo  $T_{UR}$  é mais sensível que o  $T_{DM}$ , e portanto, deve ter cuidado na interpretação dos dados obtidos por ele.

#### Procedimento analítico Sm-Nd e Sr

Os procedimentos analíticos utilizados envolvem etapas de pesagem e introdução de traçador misto, abertura química (dissolução), separação cromatográfica com resina de troca iônica e depósito para a análise no espectrômetro de massa (GIOIA; PIMENTEL 2000; OLIVEIRA et al, 2008). As concentrações de Rb foram obtidas pelo laboratório ACME e cedidas por Barreto, 2012, portanto, necessitando apenas as análises de concentrações de Sr.

##### 1 - Abertura química

O procedimento padrão inicia com a dissolução da amostra com bombas BOLA no forno de microondas. Esta etapa inicia com a pesagem de aproximadamente 100 mg de amostra e, em seguida, adiciona-se 100 mg de traçador (*Spike*) misto  $^{149}\text{Sm}/^{150}\text{Nd}$  no cadinho interno da bomba de dissolução. Posteriormente, são atacadas com os ácidos  $\text{HNO}_3$ , HF e HCl.

##### 2 - Separação cromatográfica com resina de torca iônica

A etapa seguinte consiste na separação de Sr e dos elementos terras raras utilizando a resina catiônica Biorad DOWEX AG 50x8. Posteriormente se extrai os elementos Sm e Nd da solução dos elementos terra raras utilizando técnicas convencionais de troca catiônica em colunas de teflon contendo resina Eichron® Ln-Spec.

### 3 - Depósito em filamentos para análise isotópica.

A última etapa consiste no depósito dos concentrados de Sm e Nd das amostras, os quais após a secagem são dissolvidos em uma solução de 1 ml de HNO<sub>3</sub>\*\* e posteriormente depositados em filamento duplo de Ta- Re. As análises Sm-Nd foram realizadas no espectrômetro de massa TIMS marca FINNIGAN modelo MAT 262, instalado no Pará-Iso. A razão <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd deve ser normalizada para <sup>146</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd= 0.7219 para a correção de massa, e a constante de decaimento usada foi o valor de 6.54 x 10<sup>-12</sup>/ano.

Para a análise isotópica de Sr no espectrômetro de massa (TIMS) são utilizados arranjos de filamentos de Tungstênio (W). O depósito é realizado com 1 µL de solução do ativador Tântalo (Ta) no filamento e aquecido a uma média de 1A. Posteriormente adiciona-se 2µL de HNO<sub>3</sub>\*\* 6N no resíduo da amostra para dissolver. Este resíduo é transferido com o auxílio de uma micropipeta para o filamento que é aquecido a aproximadamente 2A.

As análises isotópicas de Sr são realizadas em modo estático em um espectrômetro de massa de termo-ionização (TIMS) da marca FINNIGAN modelo MAT 262, equipado com um sistema de multicoleção, com sete coletores de Faraday. As razões isotópicas determinadas são <sup>86</sup>Sr/<sup>88</sup>Sr, <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr e <sup>84</sup>Sr/<sup>88</sup>Sr. A razão <sup>86</sup>Sr/<sup>87</sup>Sr deve ser normalizada com a razão isotópica <sup>86</sup>Sr/<sup>88</sup>Sr = 0,1194 para correção de fracionamento do espectrômetro. A constante de decaimento utilizada é de 1,42 x 10<sup>-11</sup> ano<sup>-1</sup>.

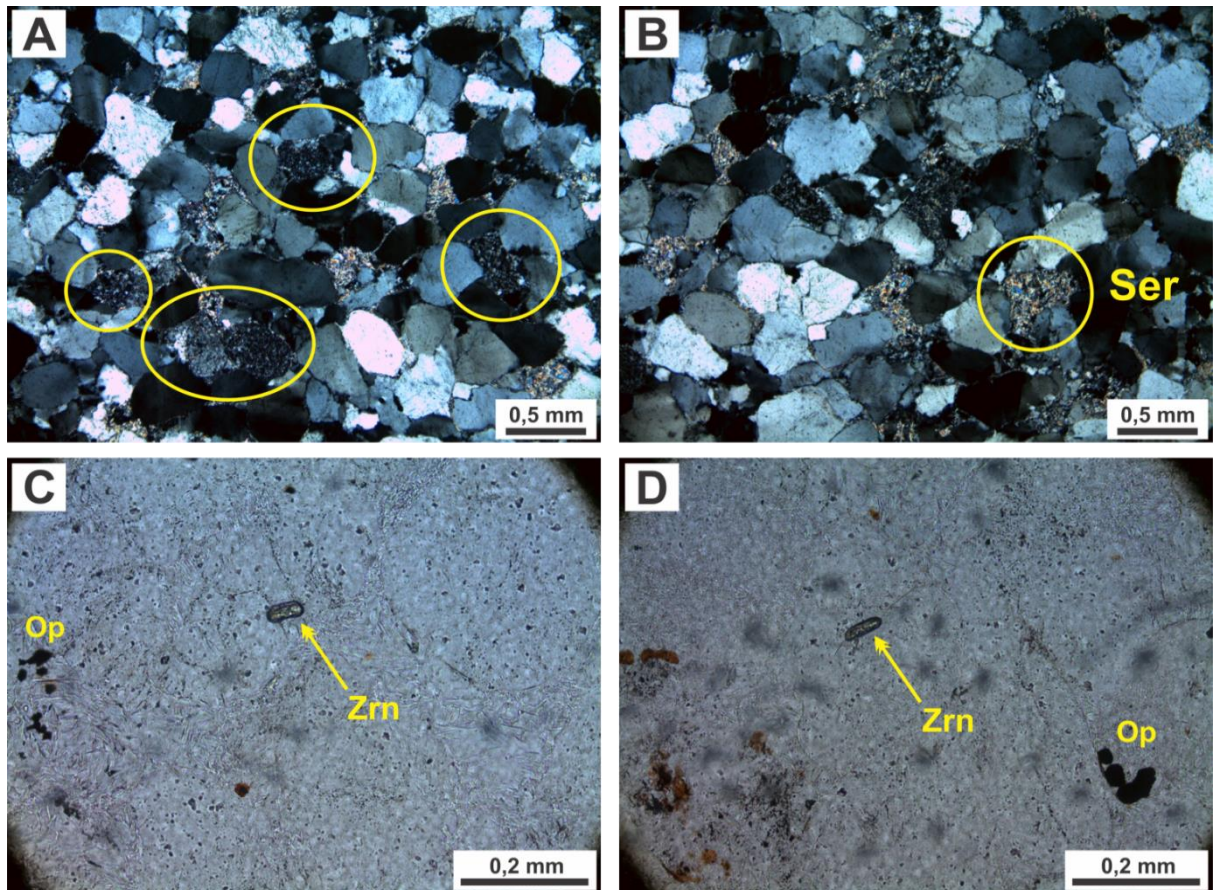
## CAPÍTULO 4 - RESULTADOS

### 4.1 Petrografia e geocronologia U-Pb em zircão por LA-ICP-MS da Formação Urupi

#### 4.1.1. Petrografia

O arenito de granulação fina à média é moderadamente selecionado, com grãos subangulosos à subarredondados. O quartzo é o mineral predominante (> 95%), seus grãos são subangulosos à arredondados e consiste em aproximadamente de 98% de grão monocristalino e 2% de grão policristalino. Há uma pequena porcentagem de zircões, opacos e fragmentos líticos, principalmente de pelitos e *cherts*, sendo observado algumas palhetas de sericita nos interstícios dos grãos. A trama dos grãos não apresenta orientação preferencial e os seus contatos são do tipo côncavo-convexo, suturado, pontual e lateral com empacotamento normal. Os poros são predominantemente intergranulares e alguns são intragranulares. A rocha, com as apresentadas características, é classificada como um quartzo-arenito.

Figura 6 - Aspectos texturais e mineralógicos microscópicos do Quartzo arenito (amostra LT-14). A) Predominância de grãos de quartzo, subarredondados à subangulosos, dispostos sem orientação preferencial. Notar os grãos policristalinos nos interstícios de grãos maiores (círculos amarelos). B) finas palhetas de sericita (Ser) intersticiais nos grãos. C) e D) Cristais de zircão (Zrn) e opacos com feições prismáticas bem preservadas.



Fonte: Do autor.

#### 4.1.2. Morfologia e textura dos cristais de zircão do quartzo arenito

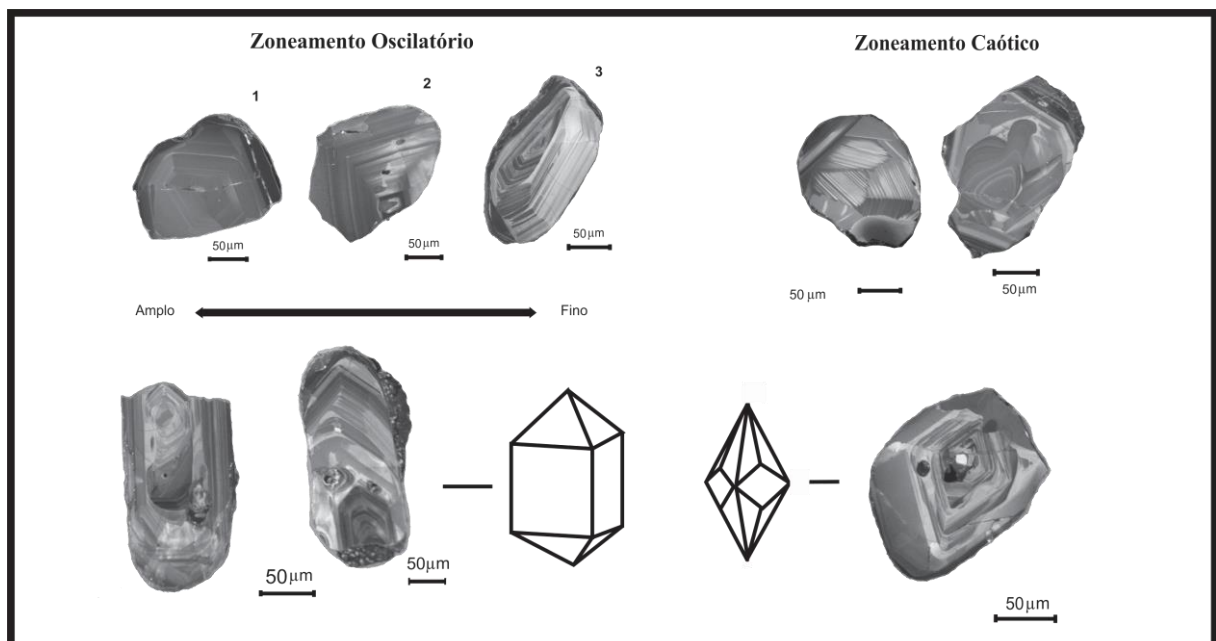
A morfologia e textura dos zircões detríticos do quartzo arenito (LT-14) foi descrita com base em 154 cristais selecionados. A maior parte dos cristais de zircão da amostra LT-14 estão presentes na fração 180-125µm, perfazendo 103 cristais selecionados. Em média, estes cristais são de 200µm ao longo de sua maior dimensão. A menor parte dos cristais de zircão da amostra LT-14 estão presentes na fração 125-75µm, perfazendo 51 cristais selecionados. Em média, estes cristais são de 100µm ao longo de sua maior dimensão. Todos os cristais foram fotografados por MEV (CL) na Universidade Federal do Pará.

A morfologia da maioria dos cristais apresenta-se variado de subarredondado à arredondado, com exceção de alguns cristais cuja feição prismática do zircão é bem exposta. Em geral, são cristais subédricos à anédricos, com raras exceções de euédricos. Nos cristais de zircões selecionados foi possível observar uma tendência para as formas de prismas, em detrimento das de formato piramidal. Quanto à textura interna dos cristais de zircão, é observada uma ampla variedade. É predominante a presença de populações de zircões com zoneamento (figura 7, cristais 1, 2 e 3). O zoneamento reflete a variação composicional de Zr e

Si e mais importante, as variações em Hf, P, Y, ETR, U e Th. Esta composição tende a variar em dois membros extremos, um próximo a composição pura do zircão e outro rico em elementos traço (CORFU et al, 2003). Vários cristais apresentam zoneamento oscilatório conspicuo finamente espaçado, com raras exceções contendo um zoneamento mais espaçado ou amplo. Contudo, é possível observar a ausência total desse zoneamento em certos cristais de zircão. Em um zircão apenas nota-se um zoneamento em setor que está associado com o zoneamento oscilatório. Em outros casos, os zircões apresentam um zoneamento particular que é o de textura irregular e desigual.

Ainda se tratando de morfologia, o crescimento metamórfico, ou cristais de zircão modificados metamorficamente são geralmente caracterizados por formatos subarredondados e altamente reabsorvidos, mas formatos euédricos são também possíveis. Caso observável em diversos cristais de zircão, corroborando com o fato de muitos serem herdados de rochas pretéritas.

Figura 7 - Nesta figura são esquematizadas as principais características identificadas nos zircões do Quartzito arenito. Os zircões aqui são representativos do conjunto de grãos fotografados por MEV. No meio do esquema há a variação dos tipos morfológicos identificados na amostra LT-14. Na porção superior do esquema têm-se três cristais de zircões com zoneamento oscilatório cuja espessura das bandas é discriminada. Ocorre um encurtamento no zoneamento oscilatório do cristal 1 ao cristal 3. Ao lado do zoneamento oscilatório, o zoneamento caótico é mais escasso.



Fonte: Do Autor.

#### 4.1.3. Datação dos zircões detríticos por LA-ICP-MS

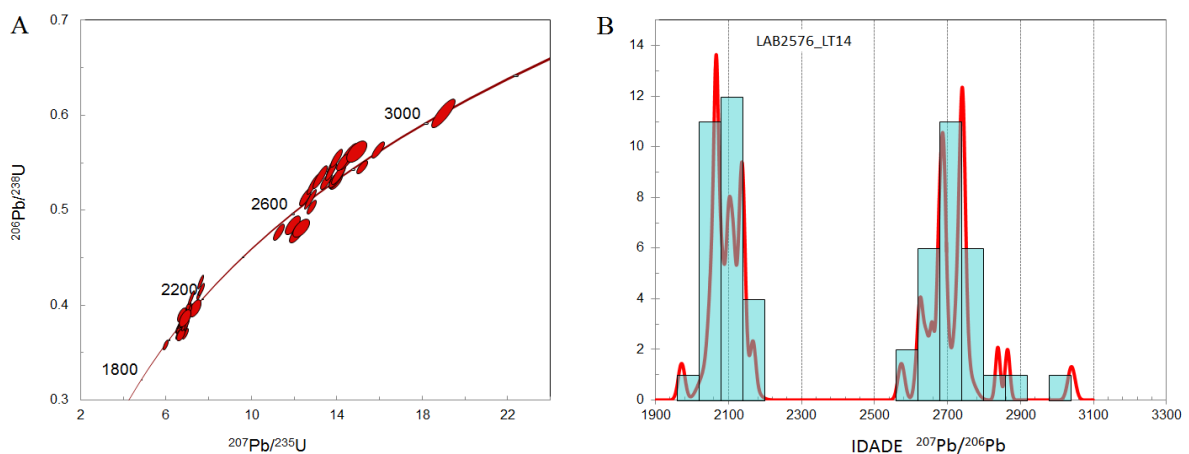
Dentre os zircões do quartzo arenito separados manualmente pelo procedimento de triagem, apenas 44 sofreram ablasão pelo laser acoplado no espectrômetro (LA) – tabela 2. Alguns desses zircões foram pontualmente analisados mais de uma vez nos pontos da borda e núcleo ou da borda, meio e núcleo do grão. Consequentemente, se efetuaram 55 ablasões de zircões no total. Após esta etapa, obtiveram-se as razões isotópicas  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ ,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  e suas respectivas idades do espectrômetro de massa (ICP-MS) de cada ablasão. Dentre estas três razões isotópicas, a razão isotópica  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  apresenta as idades mais significativas, portanto as consideradas neste estudo.

O Diagrama Concórdia (figura 8A) apresenta os resultados de idades  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  e  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  da mesma amostra (zircão) e ilustra uma curva concordante da evolução destes dois sistemas, isto é, a curva da concórdia. Os resultados de idades plotados sobre a curva da concórdia permaneceram em sistema fechado desde a sua formação (concordantes), enquanto que os resultados plotados em ponto diverso da curva sofreram algum evento de abertura de sistema (discordantes). O grau de concordância é obtido pelo cálculo da razão  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  por  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  multiplicado por 100. O maior grau de concordância é 100, ou seja, a elipse é plotada sobre a curva da concórdia, todavia, quaisquer valores acima ou abaixo de 100 representam elipses acima ou abaixo da curva, respectivamente. Nos resultados obtidos, o grau de concordância varia de 93 a 109 e sua média total é 101, portanto, as elipses dos zircões são definidas como concordantes a subconcordantes. A representação destes resultados é dada pelas elipses. No Diagrama, as elipses estão plotadas na curva da concórdia, acima e abaixo desta curva. Portanto, é evidente que apenas alguns zircões permaneceram em um sistema fechado desde a sua formação. As razões da discordância de algumas elipses se apresentarem abaixo ou acima da curva implicam em interpretações distintas. No caso das discordâncias abaixo da curva, normalmente mais usuais, decorrem da perda de Pb e no caso das discordâncias acima da curva, menos comuns, são em virtude da introdução de Pb comum por fluídos enriquecidos neste elemento e/ou pelo cálculo realizado com o Pb padrão. De acordo com as análises realizadas com os zircões pelo MEV, é pertinente inferir uma possível atividade hidrotermal ou de alteração das concentrações originais no zircão pelo fato de muitos cristais apresentarem fraturas e também de alguns apresentarem quantidades

consideráveis de U (WASSERBURG, 1963; SINHA et al, 1992, GEHRELS, 2014). Neste caso, uma introdução de Pb.

O Histograma de frequência (figura 8B) pela idade  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  apresenta a relação da quantidade de elipses concordantes a subconcordantes com as idades mais confiáveis do sistema U-Pb. Assim, todas as elipses plotadas no Diagrama Concórdia foram utilizadas na elaboração do Histograma. Neste Histograma, notam-se dois picos principais que representam duas populações distintas de idades de zircões. Uma primeira população de zircões riacianos é definida por 20 cristais cuja idade varia entre  $2.167,18 \pm 7,49$  Ma e  $2.050,4 \pm 10,8$  Ma. A segunda população neoarqueana é definida por 20 cristais, cuja idade varia entre  $2.761 \pm 16,4$  Ma e  $2.573,5 \pm 9,2$  Ma. Em complemento, dois zircões são os mais jovens, do período Orosiriano e dois são os mais antigos, atingindo idades da Era Mesoarqueana.

Figura 8 - Em A, o Diagrama Concórdia. As elipses sobre a concórdia expressam as idades concordantes dos dois sistemas  $\text{Pb}^{206}/\text{U}^{238}$  e  $\text{Pb}^{207}/\text{U}^{235}$ . Em B, o Histograma de Frequências vs Idade  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ . Neste histograma, as duas principais populações de zircões estão bem definidas pelos picos. O primeiro pico é referente a população Riacciana e o segundo pico ao Arqueano. A sigla LAB2576 se refere ao laboratório geocronológico da UNB.



Fonte: Do Autor.

Tabela 2 - Sumário dos resultados obtidos dos zircões detríticos da amostra LT-14 por LA-ICP-MS (continua)

| Zircão <sup>a</sup> | <i>f</i> (206) <sup>b</sup> | Th/U | Razão Isotópica <sup>c</sup>         |      |                                     |      |                                     |      |                  | Idades (Ma)                          |      |                                     |      |                                     |      |                   |
|---------------------|-----------------------------|------|--------------------------------------|------|-------------------------------------|------|-------------------------------------|------|------------------|--------------------------------------|------|-------------------------------------|------|-------------------------------------|------|-------------------|
|                     |                             |      | <sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb | 1s   | <sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U | 1s   | <sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U | 1s   | Rho <sup>d</sup> | <sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb | 1s   | <sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U | 1s   | <sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U | 1s   | Conc <sup>e</sup> |
| Z13-180             | 0,01                        | 0,26 | 0,13                                 | 0,72 | 6,77                                | 0,92 | 0,38                                | 0,57 | 0,55             | 2074,5                               | 12,7 | 2081,3                              | 8,1  | 2088,3                              | 10,2 | 101               |
| Z14-180 (I)         | 0,78                        | 1,55 | 0,18                                 | 0,83 | 11,93                               | 1,19 | 0,48                                | 0,85 | 0,70             | 2638,6                               | 13,8 | 2598,7                              | 11,1 | 2547,8                              | 17,9 | 97                |
| Z15-180 (I)         | 0,01                        | 0,41 | 0,19                                 | 0,54 | 13,96                               | 0,84 | 0,53                                | 0,64 | 0,72             | 2747,2                               | 8,9  | 2747,1                              | 7,9  | 2747,0                              | 14,3 | 100               |
| Z15-180 (II)        | 0,01                        | 0,32 | 0,19                                 | 0,37 | 14,11                               | 0,74 | 0,54                                | 0,64 | 0,83             | 2743,0                               | 6,1  | 2757,0                              | 7,0  | 2776,1                              | 14,4 | 101               |
| Z16-180 (I)         | 0,00                        | 0,26 | 0,18                                 | 0,47 | 13,52                               | 0,83 | 0,53                                | 0,69 | 0,80             | 2691,3                               | 7,7  | 2716,4                              | 7,9  | 2750,3                              | 15,5 | 102               |
| Z16-180 (II)        | 0,01                        | 0,25 | 0,18                                 | 0,40 | 13,76                               | 0,72 | 0,54                                | 0,60 | 0,79             | 2684,2                               | 6,5  | 2733,3                              | 6,8  | 2800,2                              | 13,6 | 104               |
| Z17-180 (II)        | 0,02                        | 0,23 | 0,13                                 | 0,40 | 7,074                               | 0,68 | 0,39                                | 0,55 | 0,76             | 2097,2                               | 6,8  | 2120,8                              | 6,1  | 2145,1                              | 10,1 | 102               |
| Z18-180 (I)         | 0,00                        | 0,68 | 0,20                                 | 0,41 | 15,94                               | 0,77 | 0,56                                | 0,65 | 0,81             | 2864,3                               | 6,7  | 2873,3                              | 7,3  | 2886,2                              | 15,0 | 101               |
| Z18-180 (II)        | 0,00                        | 0,88 | 0,20                                 | 0,39 | 15,18                               | 0,67 | 0,55                                | 0,54 | 0,75             | 2837,8                               | 6,4  | 2826,6                              | 6,4  | 2810,9                              | 12,4 | 99                |
| Z26-180             | 0,18                        | 0,54 | 0,18                                 | 0,54 | 12,14                               | 0,94 | 0,48                                | 0,77 | 0,79             | 2684,5                               | 8,9  | 2615,5                              | 8,8  | 2527,4                              | 16,0 | 94                |
| Z28-180 (I)         | 0,52                        | 0,84 | 0,13                                 | 0,37 | 6,58                                | 0,67 | 0,37                                | 0,56 | 0,79             | 2083,8                               | 6,5  | 2056,2                              | 5,9  | 2028,7                              | 9,7  | 97                |
| Z28-180 (II)        | 0,32                        | 0,53 | 0,13                                 | 0,52 | 6,58                                | 0,80 | 0,38                                | 0,61 | 0,71             | 2055,7                               | 9,2  | 2056,7                              | 7,1  | 2057,6                              | 10,7 | 100               |
| Z29-180 (I)         | 0,48                        | 0,52 | 0,14                                 | 0,43 | 6,91                                | 0,76 | 0,37                                | 0,63 | 0,79             | 2167,2                               | 7,5  | 2099,8                              | 6,7  | 2031,8                              | 10,9 | 94                |
| Z29-180 (II)        | 0,01                        | 0,07 | 0,13                                 | 0,37 | 7,54                                | 0,62 | 0,41                                | 0,49 | 0,72             | 2136,7                               | 6,4  | 2178,2                              | 5,5  | 2222,5                              | 9,3  | 104               |
| Z30-180 (I)         | 0,01                        | 0,24 | 0,13                                 | 0,39 | 6,92                                | 0,66 | 0,38                                | 0,53 | 0,75             | 2142,6                               | 6,8  | 2100,8                              | 5,9  | 2058,4                              | 9,4  | 96                |
| Z30-180 (III)       | 0,01                        | 0,31 | 0,13                                 | 0,40 | 6,95                                | 0,75 | 0,38                                | 0,64 | 0,81             | 2131,1                               | 7,1  | 2105,4                              | 6,7  | 2079,2                              | 11,3 | 98                |
| Z30-180 (II)        | 0,02                        | 0,16 | 0,13                                 | 0,35 | 6,84                                | 0,63 | 0,38                                | 0,52 | 0,77             | 2113,9                               | 6,1  | 2091,4                              | 5,6  | 2068,6                              | 9,3  | 98                |
| Z31-180 (I)         | 0,44                        | 0,46 | 0,18                                 | 0,49 | 12,52                               | 0,87 | 0,51                                | 0,71 | 0,80             | 2619,5                               | 8,1  | 2644,7                              | 8,1  | 2677,7                              | 15,6 | 102               |

Tabela 2 - Sumário dos resultados obtidos dos zircões detríticos da amostra LT-14 por LA-ICP-MS (continua).

| Zircão <sup>a</sup> | <i>f</i> (206) <sup>b</sup> | Th/U | Razões Isotópicas <sup>c</sup>       |      |                                     |      |                                     |      |                  | Idades (Ma)                          |      |                                     |      |                                     |      |                   |
|---------------------|-----------------------------|------|--------------------------------------|------|-------------------------------------|------|-------------------------------------|------|------------------|--------------------------------------|------|-------------------------------------|------|-------------------------------------|------|-------------------|
|                     |                             |      | <sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb | 1s   | <sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U | 1s   | <sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U | 1s   | Rho <sup>d</sup> | <sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb | 1s   | <sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U | 1s   | <sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U | 1s   | Conc <sup>e</sup> |
| Z31-180 (II)        | 0,01                        | 0,24 | 0,1806                               | 0,35 | 12,7657                             | 0,92 | 0,5128                              | 0,85 | 0,91             | 2658,0                               | 5,8  | 2662,5                              | 8,6  | 2668,4                              | 18,5 | 100               |
| Z41-180 (I)         | 0,02                        | 0,44 | 0,1824                               | 0,36 | 13,8057                             | 0,77 | 0,5488                              | 0,68 | 0,86             | 2675,2                               | 6,0  | 2736,5                              | 7,3  | 2820,3                              | 15,5 | 105               |
| Z41-180 (II)        | 0,00                        | 0,28 | 0,1837                               | 0,39 | 13,7304                             | 0,81 | 0,5421                              | 0,71 | 0,86             | 2686,4                               | 6,4  | 2731,3                              | 7,7  | 2792,4                              | 16,1 | 104               |
| Z42-180 (I)         | 0,09                        | 0,68 | 0,1899                               | 0,47 | 14,6879                             | 0,86 | 0,5610                              | 0,71 | 0,81             | 2741,1                               | 7,8  | 2795,2                              | 8,1  | 2870,9                              | 16,5 | 105               |
| Z42-180 (II)        | 0,01                        | 0,32 | 0,1898                               | 0,53 | 13,9745                             | 0,97 | 0,5341                              | 0,80 | 0,81             | 2740,1                               | 8,8  | 2748,0                              | 9,2  | 2758,8                              | 18,1 | 101               |
| Z43-180 (I)         | 0,53                        | 0,74 | 0,1210                               | 0,52 | 5,9917                              | 0,79 | 0,3591                              | 0,60 | 0,71             | 1971,5                               | 9,2  | 1974,6                              | 6,9  | 1977,7                              | 10,2 | 100               |
| Z44-180             | 0,03                        | 0,56 | 0,1326                               | 0,39 | 7,2541                              | 0,80 | 0,3968                              | 0,70 | 0,85             | 2132,7                               | 6,8  | 2143,2                              | 7,1  | 2154,1                              | 12,8 | 101               |
| Z45-180             | 0,01                        | 0,41 | 0,1281                               | 0,57 | 6,6613                              | 0,91 | 0,3771                              | 0,72 | 0,75             | 2072,5                               | 10,0 | 2067,5                              | 8,1  | 2062,5                              | 12,6 | 100               |
| Z56-180 (I)         | 0,03                        | 0,39 | 0,1277                               | 0,29 | 6,7447                              | 0,61 | 0,3832                              | 0,54 | 0,84             | 2066,0                               | 5,1  | 2078,5                              | 5,4  | 2091,1                              | 9,6  | 101               |
| Z56-180 (II)        | 0,01                        | 0,37 | 0,1276                               | 0,45 | 6,7136                              | 0,70 | 0,3815                              | 0,54 | 0,70             | 2065,8                               | 7,9  | 2074,4                              | 6,2  | 2083,1                              | 9,5  | 101               |
| Z57-180             | 0,01                        | 0,22 | 0,1843                               | 0,38 | 12,8158                             | 0,70 | 0,5044                              | 0,59 | 0,79             | 2691,8                               | 6,4  | 2666,2                              | 6,6  | 2632,6                              | 12,7 | 98                |
| Z58-180             | 0,02                        | 0,28 | 0,1891                               | 0,44 | 13,8972                             | 0,77 | 0,5329                              | 0,62 | 0,77             | 2734,6                               | 7,3  | 2742,7                              | 7,3  | 2753,8                              | 14,0 | 101               |
| Z59-180             | 0,02                        | 0,25 | 0,1305                               | 0,47 | 7,0775                              | 0,81 | 0,3934                              | 0,65 | 0,77             | 2104,4                               | 8,3  | 2121,2                              | 7,2  | 2138,6                              | 11,9 | 102               |
| Z60-180             | 0,02                        | 0,61 | 0,1276                               | 0,45 | 6,7487                              | 0,95 | 0,3835                              | 0,83 | 0,87             | 2065,5                               | 7,9  | 2079,0                              | 8,4  | 2092,7                              | 14,9 | 101               |
| Z67-180 (II)        | 0,00                        | 0,21 | 0,1303                               | 0,37 | 7,6291                              | 0,80 | 0,4246                              | 0,70 | 0,86             | 2102,1                               | 6,5  | 2188,3                              | 7,2  | 2281,5                              | 13,5 | 109               |
| Z68-180             | 0,28                        | 0,23 | 0,1771                               | 0,41 | 12,9122                             | 0,95 | 0,5287                              | 0,85 | 0,89             | 2626,1                               | 6,7  | 2673,3                              | 8,9  | 2736,0                              | 19,0 | 104               |
| Z70-180             | 0,03                        | 0,17 | 0,2282                               | 0,63 | 18,9841                             | 1,21 | 0,6033                              | 1,04 | 0,84             | 3039,6                               | 10,1 | 3041,0                              | 11,7 | 3043,1                              | 25,1 | 100               |

Tabela 2 - Sumário dos resultados obtidos dos zircões detríticos da amostra LT-14 por LA-ICP-MS (conclusão)

| Zircão <sup>a</sup> | f(206) <sup>b</sup> | Th/U | Razões Isotópicas <sup>c</sup>       |      |                                     |      |                                     |      |                  | Idades (Ma)                          |      |                                     |      |                                     |      |                   |
|---------------------|---------------------|------|--------------------------------------|------|-------------------------------------|------|-------------------------------------|------|------------------|--------------------------------------|------|-------------------------------------|------|-------------------------------------|------|-------------------|
|                     |                     |      | <sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb | 1s   | <sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U | 1s   | <sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U | 1s   | Rho <sup>d</sup> | <sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb | 1s   | <sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U | 1s   | <sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U | 1s   | Conc <sup>e</sup> |
| Z82-180             | 0,01                | 0,33 | 0,1896                               | 0,47 | 14,0879                             | 0,93 | 0,5389                              | 0,80 | 0,85             | 2738,8                               | 7,7  | 2755,6                              | 8,8  | 2778,7                              | 18,2 | 101               |
| Z83-180             | 0,00                | 0,43 | 0,1333                               | 0,37 | 7,6661                              | 0,72 | 0,4172                              | 0,61 | 0,82             | 2141,4                               | 6,5  | 2192,6                              | 6,5  | 2247,8                              | 11,7 | 105               |
| Z92-180             | 0,00                | 0,33 | 0,1825                               | 0,42 | 13,9850                             | 0,82 | 0,5559                              | 0,70 | 0,83             | 2675,3                               | 7,0  | 2748,7                              | 7,8  | 2849,7                              | 16,2 | 107               |
| Z94-180             | 0,02                | 0,43 | 0,1281                               | 0,45 | 7,0221                              | 0,87 | 0,3976                              | 0,74 | 0,83             | 2071,8                               | 7,8  | 2114,2                              | 7,7  | 2158,1                              | 13,6 | 104               |
| Z2-125              | 0,95                | 0,50 | 0,1343                               | 1,24 | 7,3581                              | 1,54 | 0,3972                              | 0,91 | 0,59             | 2155,5                               | 21,5 | 2155,9                              | 13,7 | 2156,4                              | 16,7 | 100               |
| Z4-125              | 0,95                | 1,03 | 0,1314                               | 1,00 | 6,6974                              | 1,22 | 0,3696                              | 0,70 | 0,55             | 2116,9                               | 17,4 | 2072,3                              | 10,7 | 2027,7                              | 12,2 | 96                |
| Z6-125              | 0,31                | 0,32 | 0,1899                               | 0,60 | 14,6488                             | 0,95 | 0,5596                              | 0,73 | 0,75             | 2740,9                               | 9,8  | 2792,7                              | 9,0  | 2864,9                              | 17,0 | 105               |
| Z8-125 (I)          | 0,03                | 0,28 | 0,1268                               | 0,59 | 6,7548                              | 0,88 | 0,3863                              | 0,65 | 0,69             | 2054,3                               | 10,5 | 2079,8                              | 7,8  | 2105,6                              | 11,7 | 102               |
| Z8-125 (II)         | 0,58                | 0,27 | 0,1265                               | 0,61 | 6,8056                              | 1,04 | 0,3901                              | 0,84 | 0,80             | 2050,4                               | 10,8 | 2086,4                              | 9,2  | 2123,2                              | 15,2 | 104               |
| Z9-125              | 0,21                | 0,57 | 0,1716                               | 0,55 | 11,3031                             | 0,93 | 0,4777                              | 0,75 | 0,78             | 2573,5                               | 9,2  | 2548,5                              | 8,7  | 2517,1                              | 15,6 | 98                |
| Z16-125             | 0,23                | 0,57 | 0,1312                               | 0,93 | 7,1182                              | 1,27 | 0,3935                              | 0,86 | 0,65             | 2114,0                               | 16,3 | 2126,3                              | 11,3 | 2139,1                              | 15,7 | 101               |
| Z17-125             | 1,23                | 1,77 | 0,1848                               | 0,75 | 12,1342                             | 1,14 | 0,4762                              | 0,86 | 0,75             | 2696,6                               | 12,3 | 2614,8                              | 10,7 | 2510,6                              | 18,0 | 93                |
| Z18-125             | 0,02                | 0,37 | 0,1311                               | 0,71 | 6,8625                              | 1,09 | 0,3797                              | 0,82 | 0,73             | 2112,5                               | 12,5 | 2093,8                              | 9,6  | 2074,9                              | 14,6 | 98                |
| Z20-125             | 0,35                | 0,51 | 0,1890                               | 0,67 | 14,5341                             | 1,22 | 0,5578                              | 1,02 | 0,83             | 2733,2                               | 11,0 | 2785,2                              | 11,6 | 2857,7                              | 23,5 | 105               |
| Z21-125 (I)         | 0,00                | 0,22 | 0,1788                               | 0,50 | 13,2230                             | 1,05 | 0,5363                              | 0,92 | 0,87             | 2641,9                               | 8,4  | 2695,7                              | 9,9  | 2768,0                              | 20,8 | 105               |
| Z23-125             | 0,31                | 0,77 | 0,1879                               | 0,50 | 14,2813                             | 0,81 | 0,5513                              | 0,64 | 0,75             | 2723,6                               | 8,3  | 2768,6                              | 7,7  | 2830,7                              | 14,6 | 104               |
| Z27-125             | 0,41                | 0,58 | 0,1855                               | 1,01 | 12,3206                             | 1,31 | 0,4818                              | 0,83 | 0,61             | 2702,4                               | 16,6 | 2629,1                              | 12,2 | 2535,0                              | 17,5 | 94                |
| Z29-125             | 0,02                | 0,29 | 0,1293                               | 1,28 | 6,9007                              | 1,60 | 0,3871                              | 0,96 | 0,58             | 2088,2                               | 22,5 | 2098,7                              | 14,2 | 2109,5                              | 17,2 | 101               |
| Z36-125             | 0,46                | 0,76 | 0,1251                               | 0,90 | 6,7258                              | 1,20 | 0,3900                              | 0,78 | 0,63             | 2029,7                               | 15,9 | 2076,0                              | 10,5 | 2123,0                              | 14,1 | 105               |
| Z37-125             | 0,24                | 0,55 | 0,1922                               | 1,00 | 14,9225                             | 1,29 | 0,5631                              | 0,81 | 0,60             | 2761,0                               | 16,4 | 2810,3                              | 12,3 | 2879,6                              | 18,9 | 104               |

<sup>a</sup>Representa o zircão ou o ponto específico: (I) Núcleo, (II) Borda e (III) Meio e a fração deste, 180= 180-125µm e 125=125-75 µm; <sup>b</sup>Fracionamento do Pb<sup>206</sup> não radiogênico,  $f(206) = \frac{[^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}]_c - [^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}]_a}{(100 * ^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} - ^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U})}$ ; <sup>c</sup>Razão normalizada pelo valor de referência do zircão 91500; <sup>d</sup>É o erro definido como o quociente do erro propagado das razões <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U e <sup>207</sup>Pb/<sup>235</sup>U; <sup>e</sup>Grau de concordância entre as idades (100\*<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U - <sup>207</sup>Pb/<sup>235</sup>U).

Fonte: Do Autor.

## 4.2 Geoquímica isotópica Nd-Sr e geocronologia Pb-Pb em zircão por TIMS do Grupo Iricoumé

### 4.2.1. Datação Pb-Pb em zircão por TIMS

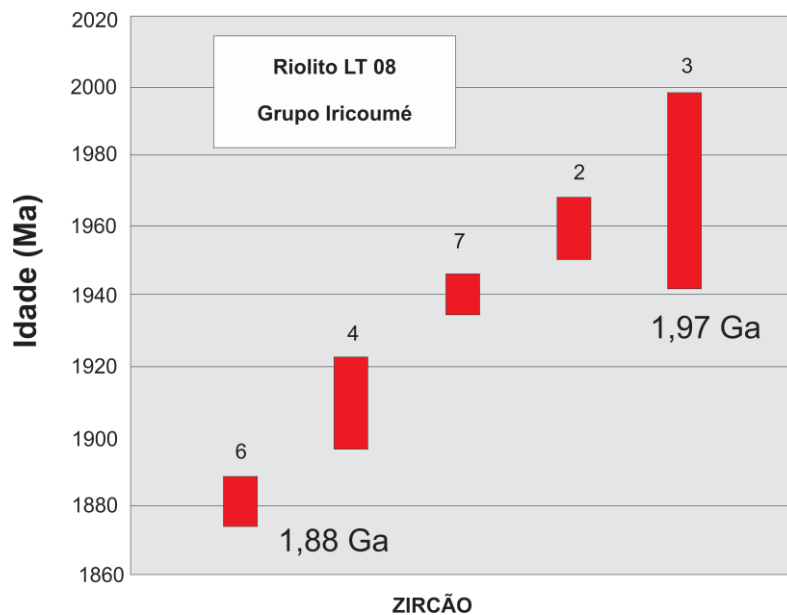
As idades da análise de cinco cristais de zircão de um riolito do Grupo Iricoumé (LT-08) foram obtidas pelo método Pb-Pb no TIMS. Nos resultados da análise, apenas a etapa de alta temperatura (1500°C) foi considerada para o cálculo e discussão das idades, enquanto que todas as etapas de menor temperatura foram desconsideradas (tabela 3). Os resultados de idades de formação obtidos variam de  $1.970 \pm 28$  Ma a  $1881 \pm 7$  Ma (figura 9).

Tabela 3 - Resultados isotópicos de evaporação de Pb em zircão do Riolito LT-08

| Zircão | Temp. | $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | $2\sigma$     | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | $2\sigma$     | Idade/Etapa (Ma) | $2\sigma$ | Idade (Ma)  | $2\sigma$ |
|--------|-------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------|-----------------------------------|---------------|------------------|-----------|-------------|-----------|
| LT08/1 | *1450 | 0,00053                           | 0,12751                           | 0,0023        | 0,1314                            | 0,0009        | 2117             | 12        |             |           |
| LT08/2 | *1450 | 0,00064                           | 0,26542                           | 0,0060        | 0,1154                            | 0,0034        | 1886             | 52        |             |           |
|        | 1500  | 0,00020                           | 0,24177                           | 0,0026        | 0,1172                            | 0,0003        | 1915             | 5         |             |           |
|        | 1550  | <b>0,00005</b>                    | <b>0,22359</b>                    | <b>0,0035</b> | <b>0,1201</b>                     | <b>0,0006</b> | <b>1959</b>      | <b>9</b>  | <b>1959</b> | <b>9</b>  |
| LT08/3 | *1450 | 0,00099                           | 0,21711                           | 0,0095        | 0,1187                            | 0,0026        | 1937             | 39        |             |           |
|        | 1500  | <b>0,00012</b>                    | <b>0,23456</b>                    | <b>0,0016</b> | <b>0,1209</b>                     | <b>0,0019</b> | <b>1970</b>      | <b>28</b> | <b>1970</b> | <b>28</b> |
| LT08/4 | 1450  | 0,00015                           | 0,10769                           | 0,0034        | 0,1215                            | 0,0012        | 1979             | 18        |             |           |
|        | 1500  | <b>0,00000</b>                    | <b>0,25343</b>                    | <b>0,0041</b> | <b>0,1169</b>                     | <b>0,0008</b> | <b>1909</b>      | <b>13</b> | <b>1909</b> | <b>13</b> |
| LT08/6 | *1450 | 0,00214                           | 0,29911                           | 0,0061        | 0,1223                            | 0,0008        | 1990             | 12        |             |           |
|        | 1500  | <b>0,00011</b>                    | <b>0,32403</b>                    | <b>0,0022</b> | <b>0,1150</b>                     | <b>0,0004</b> | <b>1881</b>      | <b>7</b>  | <b>1881</b> | <b>7</b>  |
| LT08/7 | 1500  | <b>0,00005</b>                    | <b>0,24657</b>                    | <b>0,0064</b> | <b>0,1189</b>                     | <b>0,0004</b> | <b>1940</b>      | <b>6</b>  | <b>1940</b> | <b>6</b>  |

\*Valores eliminados por excesso de Pb comum. Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Figura 9 - Diagrama com espectro de idades dos zircões do riolito (LT-08)



Fonte: Do Autor.

#### 4.2.2. Idades Modelo Nd-Sr (Nd-T<sub>DM</sub>) e (Sr-T<sub>UR</sub>)

O cálculo da idade Nd-T<sub>DM</sub> foi realizado a partir da análise de três ignimbritos (LT-18, LT-29, LT-32) e uma rocha hipabissal (LT-26) do Grupo Iricoumé. Para estas amostras, a idade de colocação/formação foi assumida por ser de 1.89 Ga por razões de afinidades geoquímicas obtidas em Barreto et al, (2014). Todas as amostras dispõem de razões  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  variando de 0,082 até 0,104, portanto, dentro do limite de variação 0,09 – 0,13, normalmente considerado como favorável para o cálculo de idades T<sub>DM</sub>. Os resultados promoveram idades Nd-T<sub>DM</sub> variando de 2.3 a 2.08 Ga e com valores de  $\epsilon_{\text{Nd}}$  negativos variando de -0.07 a -3.73 (Tabela 4). Os resultados corroboram que as rochas se formaram a partir de uma fonte crustal riaciana.

O cálculo da idade Sr-T<sub>UR</sub> foi obtido a partir de análise de cinco rochas vulcânicas (LT- 03, LT- 18, LT- 24, LT- 26, LT 32), cujos resultados isotópicos estão na tabela 5. As idades modelos Sr-T<sub>UR</sub> foram calculadas considerando os valores atuais de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  e  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  do reservatório indiferenciado (DEPAOLO; WASSERBURG, 1977). A amostra LT-32 apresenta erro analítico bem mais elevado sobre a razão isotópica do que em relação as demais amostras. Esse resultado deve, portanto, ser considerado com cautela. As idades, considerando as amostras com baixo erro analítico, variam de 2.26 a 1.91 Ga, sugerindo origem de uma crosta paleoproterozoica, sem nenhuma registro de componente arqueano na fonte das rochas estudadas.

Tabela 4 - Dados isotópicos Sm-Nd (rocha total) das rochas vulcânicas do Grupo Iricoumé, Domínio Erepecuru – Trombetas.

| Amostra | * <sup>1</sup> Sm<br>(ppm) | Nd<br>(ppm) | <sup>147</sup> Sm/ <sup>144</sup> Nd | <sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd | 2s       | $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ | $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ | T <sub>DM</sub><br>(Ga) | * <sup>2</sup> Idade Pb-Pb<br>(Ga) |
|---------|----------------------------|-------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|------------------------------------|
| LT-18   | 5,98                       | 37,05       | 0,09318                              | 0,511160                             | 0,000017 | -28,83                    | -3,73                     | 2,30                    | 1,89                               |
| LT-29   | 4,09                       | 25,65       | 0,09599                              | 0,511259                             | 0,000013 | -26,90                    | -2,48                     | 2,23                    | 1,89                               |
| LT-32   | 3,53                       | 23,81       | 0,08925                              | 0,511298                             | 0,000016 | -26,14                    | -0,07                     | 2,08                    | 1,89                               |
| LT-26   | 7,03                       | 38,81       | 0,10451                              | 0,511380                             | 0,000023 | -24,54                    | -2,18                     | 2,24                    | 1,89                               |

\*<sup>1</sup> Valores retirados do trabalho de Barreto (2014). \*<sup>2</sup> Idades assumidas segundo dados de Barreto et al (2014). Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 5 - Dados isotópicos Rb-Sr (rocha total) das rochas vulcânicas do Grupo Iricoumé, Domínio Erepecuru – Trombetas.

| Amostra | * <sup>1</sup> Rb (ppm) | Sr (ppm) | <sup>87</sup> Rb/ <sup>86</sup> Sr | <sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr | 2s       | T <sub>UR</sub> (Ga) |
|---------|-------------------------|----------|------------------------------------|------------------------------------|----------|----------------------|
| LT-03   | 166,6                   | 183,2    | 2,65                               | 0,775192                           | 0,000012 | 1,91                 |
| LT-18   | 108                     | 195,6    | 1,6                                | 0,750616                           | 0,000023 | 2,10                 |
| LT-32   | 100                     | 767,2    | 0,38                               | 0,715668                           | 0,000169 | 2,61                 |
| LT-24   | 75,1                    | 1218,5   | 0,18                               | 0,707651                           | 0,000020 | 2,26                 |
| LT-26   | 110,7                   | 315,4    | 1,02                               | 0,730853                           | 0,000013 | 1,96                 |

\*<sup>1</sup> Valores retirados do trabalho de Barreto et al (2014). \*<sup>2</sup> Idades assumidas segundo dados de Barreto et al (2014). Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

## **CAPÍTULO 5- DISCUSSÃO**

### **5.1 Evolução Orosiriana do Domínio Erepecuru-Trombetas**

No Domínio Erepecuru Trombetas, estudos geocronológicos Pb-Pb e U-Pb em zircões definiram duas associações vulcano-plutônicas de idades de formação distintas (BARRETO et al, 2013, LEAL, 2015 e CASTRO et al, 2014). A primeira associação vulcano-plutônica em torno de 1,99 Ga é composta pela Formação Igarapé Paboca e Suíte Intrusiva Caxipacoré. A segunda associação, em torno de 1,89 Ga, é composta pelo Grupo Iricoumé e pelas suítes Intrusivas Água Branca e Mapuera.

Os zircões do riolito hipabissal do Grupo Iricoumé apresentaram idades variando no intervalo entre 1881 Ma e 1970 Ma, os quais representam aproximadamente as idades dos dois episódios magmáticos orosirianos. O extenso intervalo de idades obtidos nesses zircões pode ser interpretado de duas formas. A primeira interpretação seria considerar a idade de 1,97 Ga como sendo de cristalização do riolito. As idades mais novas representariam uma reabertura parcial até total do sistema U-Pb do zircões relacionada ao evento magmático de 1,89 Ga. A segunda interpretação seria, ao contrário, que a idade de 1,89 Ga corresponde a cristalização do riolito e as idades mais antigas representam componentes herdados/zircões herdados de rochas geradas no episódio magmático mais antigo de 1,99 Ga. De acordo com as características geoquímicas, Barreto et al., (2014) relacionaram as rochas hipoabissais ao magmatismo do Grupo Iricoumé. Sendo assim a segunda proposta preferida para a idade de formação do riolito.

#### 5.1.2 Idade de deposição da Formação Urupi

No Domínio Uatumã-Anauá, a Formação Urupi recobre as rochas vulcânicas do Grupo Iricoumé e são seccionadas por soleiras do Diabásio Quarenta Ilhas (REIS et al, 2006). A Formação Quarenta Ilhas ocorre por todo o Domínio Uatumã-Anauá e sua principal rocha encaixante é a Formação Urupi. Uma idade de 1788 Ma foi determinada pelo método U-Pb para o sill Quarenta Ilhas (SANTOS et al, 2000b), estabelecendo a idade mínima para a sedimentação da Formação Urupi, enquanto que a idade das rochas vulcânicas do Grupo Iricoumé é de 1,89 Ga (SANTOS et al, 2002), estabelecendo a idade máxima de deposição. No Domínio Erepecuru-Trombetas, as rochas sedimentares pertencentes à Formação Urupi recobrem também, as rochas do Grupo Iricoumé. A idade das rochas vulcânicas do Grupo Iricoumé no Domínio Erepecuru-Trombetas é de 1,89 Ga (BARRETO et al, 2013),

estabelecendo a mesma idade máxima para a sedimentação da Formação Urupi. Entretanto não foram encontradas e datadas, no Domínio Erepecuru-Trombetas unidades litoestratigráficas que seccionem a Formação Urupi. Portanto, sem aporte para estabelecer uma idade mínima. Assim, o empilhamento estratigráfico permite estabelecer idades mínimas e máximas da Formação Urupi, embora não seja o único método. Os zircões detríticos podem estabelecer uma idade de deposição máxima, a partir da premissa que uma unidade sedimentar não pode ser mais antiga que o zircão detrítico mais jovem (GEHRELS, 2014). No caso da Formação Urupi, o grão de zircão concordante mais jovem apresentou uma idade de 1971 Ma (idade  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ) que define a idade de deposição máxima. Portanto, pode-se afirmar que a Formação Urupi deve ser mais jovem que o episódio magmático de 1,99 Ga. A população datada não apresenta nenhum zircão com idade do Grupo Iricoumé. Como as relações estratigráficas indicam que a Formação Urupi repousa sobre as vulcânicas do Grupo Iricoumé, a ausência de zircão com idades de 1,87-1,89 Ga é provavelmente devido ao fato de não ter tido tempo suficiente para a erosão das rochas vulcânicas do Grupo Iricoumé para fornecer contribuição de zircões detríticos na Formação Urupi. Alternativamente, é possível que a população de zircão selecionada para datação não seja representativa de todas as fontes.

## **5.2 Considerações sobre a idade da crosta continental do Domínio Erepecuru-Trombetas**

### **5.2.1 Considerações sobre proveniência dos zircões detríticos da Formação Urupi**

Além de dois cristais com idade orosiriana ( $2.029, 7 \pm 15,9$  e  $1.971,5 \pm 9,2$  Ma), os zircões detríticos da Formação Urupi apresentaram duas populações de idades distintas. Uma primeira população de zircões forneceu idades riacianas ( $2.167,18 \pm 7,49$  Ma a  $2.050,4 \pm 10,8$  Ma) e a segunda população tem idades principalmente neoarqueanas ( $2.761 \pm 16,4$  Ma a  $2.573,5 \pm 9,2$  Ma) e algumas mesoarqueanas ( $3.039,6 \pm 10,1$  a  $2.837,8 \pm 6,4$  Ma). A presença de uma população arqueana sugere duas possíveis fontes, a Província de Carajás e o Bloco Amapá (VASQUEZ et al, 2008; ROSA-COSTA et al, 2003, 2006). A população riaciana indica ter como fonte a Província Maroni-Itacaiúnas, cujo padrão de idade característico é riaciano (TASSINARI; MACAMBIRA, 2004).

A Província de Carajás apresenta registros arqueanos. Na porção norte da Província dominam os registros neoarqueanos (Domínio Carajás), enquanto que na porção sul, dominam sobretudo, registros mesoarqueanos. O Domínio Carajás apresenta associações de

granitoides de alto K de idades neoarqueanas, indicativas de uma possível fonte para os zircões detríticos da Formação Urupi. Estas associações de granitoides são representadas por unidades de granitos de idades variando entre 2.763 a 2573 Ma. Na porção sul da Província de Carajás, na região do Rio Maria, granitoides representados pelo Granodiorito Rio Maria e o Granito Xinguara cuja idade é aproximadamente de 2876 Ma e o Granito Mata Surrão de 2872 Ma podem indicar possíveis fontes para os registros mesoarqueanos obtidos nos zircões da Formação Urupi (MACAMIRA; LAFON, 1995). Porém, a ausência de registro riaciano na Província de Carajás implicaria na presença de mais de uma área fonte para os zircões da Formação Urupi. Neste caso, uma origem provável para os zircões detríticos riacianos seria as unidades geológicas do Domínio Bacajá, localizado logo a norte da Província Carajás. O Domínio Bacajá pertence à Província Maroni-Itacaiunas e é caracterizado por unidades principalmente de idades riacianas entre 2.21 e 2.07 Ga e unidades subordinadas de idades arqueanas e siderianas (SOUZA et al, 2003; VASQUEZ et al, 2005). Todavia, nenhum registro de idade sideriana foi encontrada na população de zircões detríticos da Formação Urupi, o que torna improvável uma proveniência dessas áreas fontes.

Um região mais próxima do DET e que apresenta unidades tanto neoarqueanas e mesoarqueanas quanto riacianas é o bloco Amapá localizado a oeste do Domínio Erepecuru Trombetas e constitui, junto com o domínio paleoproterozoico Carecuru, a porção mais a sudeste da Província Maroni-Itacaiúnas no Escudo das Guianas. O Bloco Amapá apresenta um expressivo registro de rochas magmáticas e metamórficas neoarqueanas e mesoarqueanas, intrudidas por granitoides riacianos, cujas idades variam de 2.2 a 2.1 Ga (ROSA COSTA et al, 2006). Em complemento a este registro, o Domínio Carecuru e o Domínio Parú, localizados entre o Bloco Amapá e o Domínio Erepecuru-Trombetas, apresentam idades riacianas em torno de 2.1 Ga (ROSA COSTA et al, 2006). Uma compilação dessas idades é apresentada na tabela 6. Em razão da proximidade da Província Maroni-Itacaiúnas a oeste do DET, a existência de unidades Neo- a mesoarqueanas e riacianas e pela ausência de unidades siderianas, sugere-se como prováveis áreas fontes dos zircões detríticos da Formação Urupi o Bloco Amapá e os domínios Carecuru e Parú.

#### 5.2.2 Assinaturas isotópicas de Nd e idades modelo $T_{DM}$ e $Sr-T_{UR}$ no Domínio Erepecuru-Trombetas

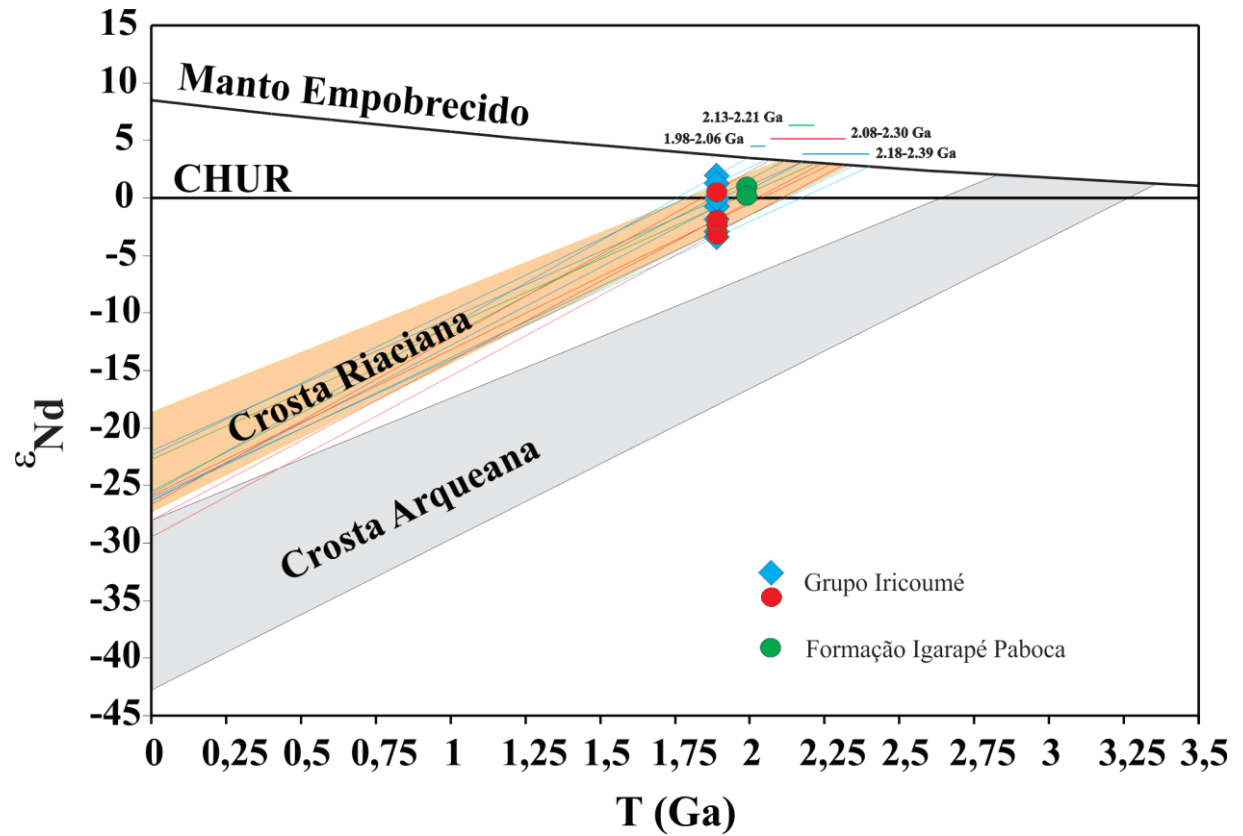
A discussão sobre as fontes da associação vulcano-plutônica e sobre a existência de um embasamento arqueano na porção da Província Amazônia Central do Escudo das Guianas

ainda está em aberto. A obtenção dos valores significativamente negativos de  $\epsilon_{Nd}$  e idades modelo  $T_{DM}$  arqueanas em rochas magmáticas da Província Amazônia Central, na porção sul da Bacia do Amazonas, indica o envolvimento de crosta continental arqueana (SANTOS et al, 2000a; TASSINARI; MACAMBIRA, 2004)

As idades modelo  $T_{DM}$  e  $T_{UR}$  das rochas vulcânicas do Grupo Iricoumé, obtidas neste estudo, variam de 2,30 a 2,08 Ga e de 2,26 a 1,91 Ga, respectivamente. Estes resultados indicam uma fonte de crosta continental paleoproterozoica, sobretudo riaciana. Os valores obtidos para o  $\epsilon_{Nd}$  são negativos e variam de -0,07 a -3,73, indicando fontes crustais retrabalhadas. Consoantes com estes resultados, as idades Nd- $T_{DM}$  variando de 2,18 a 2,39 Ga e os valores de  $\epsilon_{Nd}$  variando de -0,02 a -3,04 obtidos em rochas vulcânicas dos dois episódios orosirianos por Barreto et al, (2014), corroboram uma fonte crustal riaciana retrabalhada (figura 10). A hipótese de um magma paleoproterozoico derivado do manto que foi contaminado por assimilação de crosta arqueana poderia também explicar as idades riacianas e  $\epsilon_{Nd}$  negativos. Porém, a ausência de unidades geológicas arqueanas e a dominância do processo de fusão de crosta nesta região não favoreceram esta hipótese. Mais recentemente, assinaturas isotópicas de Nd semelhantes foram obtidas nos granitoides das suites Caxipacoré, Água Branca e Mapuera por Leal (2015). Os valores de  $\epsilon_{Nd}$  variam entre -1,01 a +2,92 e as idades  $T_{DM}$  variam entre 2,3 a 1,95 Ga, indicando uma fonte crustal paleoproterozoica da mesma forma que as rochas vulcânicas do Iricoumé.

No Domínio Uatumã-Anauá, Província Tapajós-Parima, foram obtidas assinaturas isotópicas de Nd semelhantes às do Domínio Erepecuru-Trombetas em rochas magmáticas orosirianas (FERRON et al., 2010). Na porção sul deste Domínio são apresentadas idades  $T_{DM}$  predominantemente riacianas e os valores de  $\epsilon_{Nd}$  apresentados são negativos e localmente positivos, isto é, indica uma crosta retrabalhada riaciana, sem contribuição significativa de magma juvenil. Subordinadamente foram obtidas idades Nd- $T_{DM}$  siderianas e  $\epsilon_{Nd}$  negativos (ALMEIDA, 2006). Assim, as assinaturas de Nd, em específico das rochas do Domínio Uatumã-Anauá sul, apresentam valores semelhantes aos do Domínio Erepecuru-Trombetas a oeste. Barreto et al., (2014) propuseram que a porção ocidental do DET seja, uma extensão do Domínio Uatumã-Anauá. Os dados isotópicos deste trabalho são compatíveis com essa hipótese.

Figura 10 - Diagrama  $\epsilon_{Nd(0)}$  vs tempo (Ga) das rochas vulcânicas do Grupo Iricoumé e Formação Igarapé Paboca, Domínio Erepecuru Trombetas.



Fonte: Diagrama modificado de Barreto et al, 2014. Os losangos azuis e os círculos verdes são amostras retiradas de Barreto et al, 2014 e os círculos vermelhos são de amostras obtidas neste estudo.

## CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES

Os estudos geocronológicos Pb-Pb e U-Pb em zircão de uma rocha vulcânica hipabissal e de um quartzo arenito da Formação Urupi do Domínio Erepecuru-Trombetas, junto com dados isotópicos Sm-Nd e Rb-Sr de rochas vulcânicas do Grupo Iricoumé permitiu ter-se as seguintes conclusões: A idade obtida do riolito hipabissal é de 1,89 Ga, associado ao Grupo Iricoumé, contendo zircões herdados do episódio orosiriano mais antigo de 1,99 Ga (zircões herdados ou xenocristais).

A idade de deposição máxima da Formação Urupi é definida na idade de 1,97 Ga obtida pelo zircão detrítico mais jovem da Formação Urupi e a idade de deposição mínima é de 1,78 Ga obtido por sils e soleiras que a cortam. Dentre as populações principais de zircões não foram obtidas idades orosirianas, portanto, exclui-se as rochas magmáticas orosirianas, inclusive o Grupo Iricoumé, como provável fonte de contribuição de zircões nesta Formação. No estudo de proveniência dos zircões detríticos da Formação Urupi foram encontradas duas populações de zircões, arqueanas (dominantemente neoarqueanas e mesoarqueanas) e riacianas. Assumiu-se como provável fonte desses zircões a província maroni-itacaiunas a oeste do DET (bloco Amapá e domínios Carecuru e Paru) entretanto, uma proveniência da província Carajás e o domínio transamazônico adjacente não é totalmente descartado.

As idade modelos  $T_{DM}$  e  $T_{UR}$  das rochas do Grupo Iricoumé variam de 2,30 a 2,08 e de 2,26 a 1,91 Ga, respectivamente; os valores de  $\epsilon_{Nd}$  são negativos e variam de -0,07 a -3,73 indicando uma crosta retrabalhada riaciana. As assinaturas de Nd, em específico as das rochas do Domínio Uatumã-Anauá sul, apresentam valores semelhantes aos do Domínio Erepecuru-Trombetas a oeste, portanto, é proposto que a porção ocidental do DET seja uma extensão do Domínio Uatumã-Anauá.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M. E. *Evolução Geológica da porção Centro-Sul do Escudo das Guianas com base no estudo geoquímico, geocronológico e isotópico dos granitoides Paleoproterozóicos do Sudeste de Roraima, Brasil*. 2006. 227 f. Tese (Doutorado) – Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2006.
- ARAÚJO, J.F.V. et al. Geologia. In: BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. Projeto Radambrasil. *Folha SA. 21 Santarém*: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial do uso da terra. Rio de Janeiro, 1976. 19-122 p. (Levantamento de Recursos Naturais v.10).
- AREVALO JR, R. Laser ablation ICP-MS and laser Fluorination GS-MS. In: HOLLAND, H.D.; TUREKIAN, K.K. *Treatise on geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 2014. 454p.
- BARRETO, C.J.S. *Vulcanismo félsicopaleoproterozóico do grupo Iricoumé, Nw do Pará, Domínio Erepecuru Trombetas, Província Amazônia Central*: petrografia, geoquímica e geocronologia Pb-Pb em zircão e Sm-Nd em rocha total. 2012. 112f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2012.
- BARRETO, C.J.S et al. Paleoproterozoic (~1,89 Ga) felsic volcanism of the Iricoumé Group, Guyana Schield, South America: geochemical and Sm-Nd isotopic constraints on sources and tectonic environment. *International Geology Review*, v. 56, p. 1332-1356, 2014.
- \_\_\_\_\_. Vulcanismo félsicopaleoproterozóico do Grupo Iricoumé, Domínio Erepecuru-Trombetas, Província Amazônia Central: dados de campo, caracterização petrográfica e geocronologia Pb-Pb em zircão. *RevistaGeologia USP*, v. 13, p. 47-72, 2013.
- BRITO NEVES, B.B. The Paleoproterozoic in the South-American continent: Diversity in the geologic time. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 32, p. 270-286, 2011.
- CASTRO, J.M.R. et al. *Mapa geológico da folha Rio Trombetas SA 21-X-A*: Escala 1:250.000. Belém: CPRM. Serviço Geológico do Brasil, Programa Geologia do Brasil, 2014.
- CHAVES, O.A. et al. *Projeto Trombetas-Erepecuru*: pesquisa mineral: Relatório final de reconhecimento. Belém: Sudam/Idesp, 1977. 1 v, 216 p.
- COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS - CPRM. *Projeto aerofísico Trombetas*: relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos: Texto técnico. Rio de Janeiro: CPRM. Serviço Geológico do Brasil, Programa Geologia do Brasil, 2004.
- CORDANI, U.G. Evolução Tectônica da Amazônia com base nos dados geocronológicos. In: CONGRESSO GEOLÓGICO CHILENO, 2., 1979, África. *Anais... África*: [s.n.], 1979. p. 137-138 .
- CORFU, F. et al. Atlas of zircon textures. In: HANCHAR, J.M; HOSKIN, W.O. *Zircon*. [S.l. : s.n.], 2003. p. 469-500. (Reviews in MineralogyandGeochemistry, v. 53).

DEPAOLO, D.J. *Neodymium isotope geochemistry: an introduction*. Berlin: Springer-Verlag, 1988.

DEPAOLO, D.J.; WASSERBURG, G.J. The sources of island arcs as indicated by Nd and Sr isotopic studies. *Geophysical Research Letters*, v. 4, p. 465-468, 1977.

FAURE, G. *Principles of isotope geology*. New York: John Wiley & Sons, 1986.

FEDO, C.M. et al. Detrital zircon analysis of the sedimentary record. In: HANCHAR, J.M.; HOSKIN. *Zircon*. [S.l. : s.n.], 2003. p. 277-303. (Reviews in mineralogy and geochemistry, v. 53).

FERRON, J. M. T. M. Petrology, geochemistry, and geochronology of Paleoproterozoic volcanic and granitic rocks (1.89-1.88 Ga) of the Pitinga Province, Amazon Craton, Brazil, *Journal of South American Earth Sciences*, v. 29, p. 483-497, 2010.

FRYER, B.J. et al. The design, operation and role of the laser ablation microprobe coupled with an inductively coupled plasma mass spectrometer (LAM-ICP-MS) in the earth sciences. *The Canadian mineralogist*, v. 33, p. 303-312, 1995.

GEHRELS, G. Detrital zircon U-Pb geochronology: current methods and new opportunities. In: BUSBY, C.; AZOR, A. *Tectonics of sedimentary basins: recent advances*. Hoboken, 2011. p. 45-62 .

\_\_\_\_\_. Detrital zircon U-Pb geochronology applied to tectonics. *Annual Review of the Earth and Planetary Sciences*, v. 42, p. 127-149, 2014.

GOIA, S. M. C. L.; PIMENTEL, M. M. The Sm-Nd isotopic method in the geochronology laboratory of the University of Brasília. *Anais da Academia Brasileira de Geociências*, v. 72, p. 220-245, 2000.

HASUI, Y. Cráton Amazônico: Províncias Rio Branco e Tapajós. In: HASUI, Y; CARNEIRO, C.D.R; ALMEIDA, F.F.M; BARTORELLI, A. *Geologia do Brasil*. São Paulo: Beca, 2012. p. 138-175.

HIESS, J. et al.  $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$  systematics in terrestrial uranium-bearing minerals. *Science*, v. 335, p. 1610-1614, 2012.

JORGE JOÃO, da S et al. *Projeto Trombetas-Mapuera: Relatório final*. Belém: DNPM, CPRM, 1984. v. I e II.

KOSLER, J. Laser ablation sampling strategies for concentration and isotope ratio analyses by ICP-MS. In: SYLVESTER, P. *Laser ablation ICP-MS in the earth sciences> current practices and outstanding issues*. [S.l.]: Mineralogical Association of Canada, 2008. p. 79-92 . (Short course series, v. 40).

LEAL, R.E. *Geoquímica e geocronologia U-Pb, Sm-Nd e Rb-Sr dos granitoides orosirianos do Domínio Erepecuru Trombetas, Província Amazônia Central, noroeste do Pará*. 2015. 94f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.

NIER, A.O. A mass spectrometer for isotopes and gas analysis. *The review of scientific instruments*, v. 18, p. 398-411, 1947.

OLIVEIRA, A.S. et al. Geologia. In: BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. Projeto Radambrasil. *Folha NA. 21 Tumucumaque e parte da folha NB.21: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial do uso da terra*. Rio de Janeiro, 1975. p. 19-97. (Levantamento de Recursos Naturais, v. 9).

OLIVEIRA, E. C. et al. Datação Sm-Nd em rocha total e granada do metamorfismo granulítico da região de Tartarugal Grande, Amapá Central, *Revista Brasileira Geociências*, v. 38, p. 116-129, 2008.

REIS, N.J. et al. *Geologia e Recursos Minerais do Estado do Amazonas*. [S.l.]: CPRM. Serviço Geológico do Brasil, 2006. 125p.

ROSA COSTA, L.T. et al. Geology and geochronology of Archean and Paleoproterozoic domains of the southeastern Amapá and northwestern Pará, Brazil – southeastern Guiana Shield. *Geologie de la France*, p.101-120, 2003.

\_\_\_\_\_. Zircon geochronology and Sm-Nd isotopic study: further constraints for the Archean and Paleoproterozoic geodynamical evolution of the southeastern Guiana Shield, north of Amazonian Craton, Brazil. *Gondwana research*, v. 10, p. 277-300, 2006.

SANTOS, J.O.S. et al. Age and autochthonous evolution of the Sunsás Orogen in West Amazon Craton based on mapping and U-Pb geochronology. *Precambrian Research*, v. 165, p. 120-152, 2008.

\_\_\_\_\_. Age of Roraima Group and Roraima-like sequences in the Northern Amazon Craton. In: INT. CONG. GEOL., 2000b, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: SBG, 2000b. 31 v.

\_\_\_\_\_. A compartimentação do Cráton Amazonas em Províncias: avanços ocorridos no período 2000-2006. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA NA AMAZÔNIA, 2006, Belém. *Anais...* Belém: SBG, 2006. 9 v.

\_\_\_\_\_. New understanding of the Amazon Craton provinces, based on field work and radiogenic isotope data. *Gondwana Research*, v. 3, p. 453-488, 2000a.

\_\_\_\_\_. Significant Presence of the Tapajós-Parima Orogenic Belt in the Roraima Region, Amazon Craton based on SHRIMP U-Pb zircon Geochronology. In: CONG. BRAS. GEOL., 2002, João Pessoa. *Anais...* João Pessoa: SBG, 2002. 41 v, 336 p.

SATO, K.; TASSINARI, C.C.G. Principais eventos de acreção continental no Cráton Amazônico baseados em idade modelo Sm-Nd, calculada em evolução de estágio único e estágio duplo. In: COSTA, M.L.C; ANGÉLICA, L.S (coords). *Contribuições à Geologia da Amazônia*. Belém: SBG-NO, 1997. p. 91-142.

SINHA, A.K. et al. The hydrothermal stability of zircon: preliminary experimental and isotopic studies. *Geochimica et cosmochimica acta*, v. 56, p. 3551-3560, 1992.

SOUZA, V. S. et al. Idade de zircão do granito Felício Turvo, garimpo de ouro do Menelão, região do Bacajá (PA): implicações tectônicas. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 2003, Manaus. *Resumos...* Manaus: SBG, 2003.

TASSINARI, C.C.G; MACAMBIRA, M.J.B. A evolução tectônica do Cráton Amazônico. In: MANTESSO-NETO et al. *Geologia do continente Sul americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo: Beca, 2004. p. 471-485.

\_\_\_\_\_. Geochronological provinces of the Amazonian Craton. *Episodes*, v. 22, p. 174-182, 1999.

THOMPSON, J.J.; HOUK, R.S. A study of internal standardization in inductively coupled plasma mass spectrometry. *Applied spectroscopy*, v. 41, p. 801-806, 1987.

THOMSON, J.J. Cathode rays. *Philosophical magazine*, v. 44, p. 293, 1897.

VASQUEZ, M.L. et al. Compartimentação Tectônica. In: VASQUEZ, M.L; ROSA-COSTA, L.T. *Texto explicativo do mapa geológico e de recursos minerais do Estado do Pará*: Escala 1:1000.000. Belém: CPRM, 2008. p. 39-110.

\_\_\_\_\_. Granitóides transamazônicos na Região Iriri-Xingu, Pará – Novos dados geológicos e geocronológicos. In: HORBE, A.M.C; SOUZA, V.S. (Coord.). *Contribuições à geologia da Amazônia*. Manaus: SBG-Núcleo Norte, 2005. 4 v, p.16-31.

VEIGA Jr, J.P, et al. *Projeto Sulfetos do Uatumã*: Relatório final. Manaus: DNPM, CPRM, 1979.

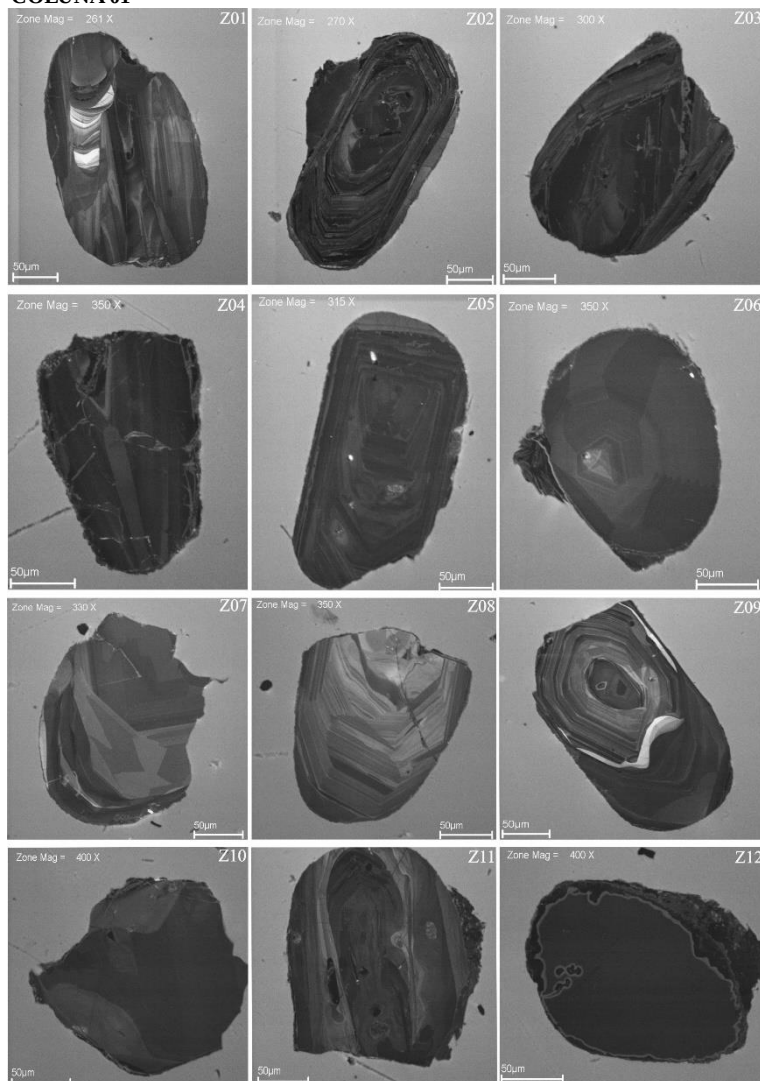
WASSERBURG, G.J. Diffusion process in lead-uranium systems. *Journal of geophysical research*, v. 68, p. 4823-4846, 1963.

WIEDENBENBECK, M. et al. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. *Geostandards Newsletter*, v. 68, p. 4823-4846, 1995.

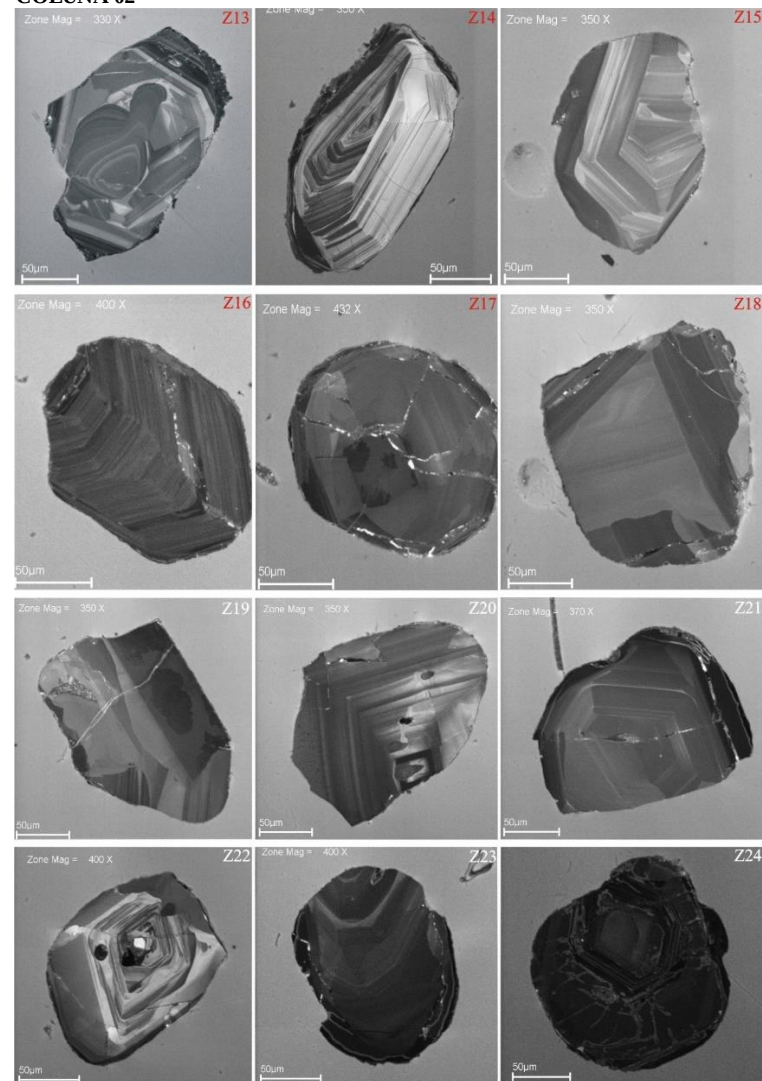
## **APÊNDICES**

## APÊNDICE A – Zircões Detríticos LT-14 – (180-125µm) PARTE 01

**COLUNA 01**

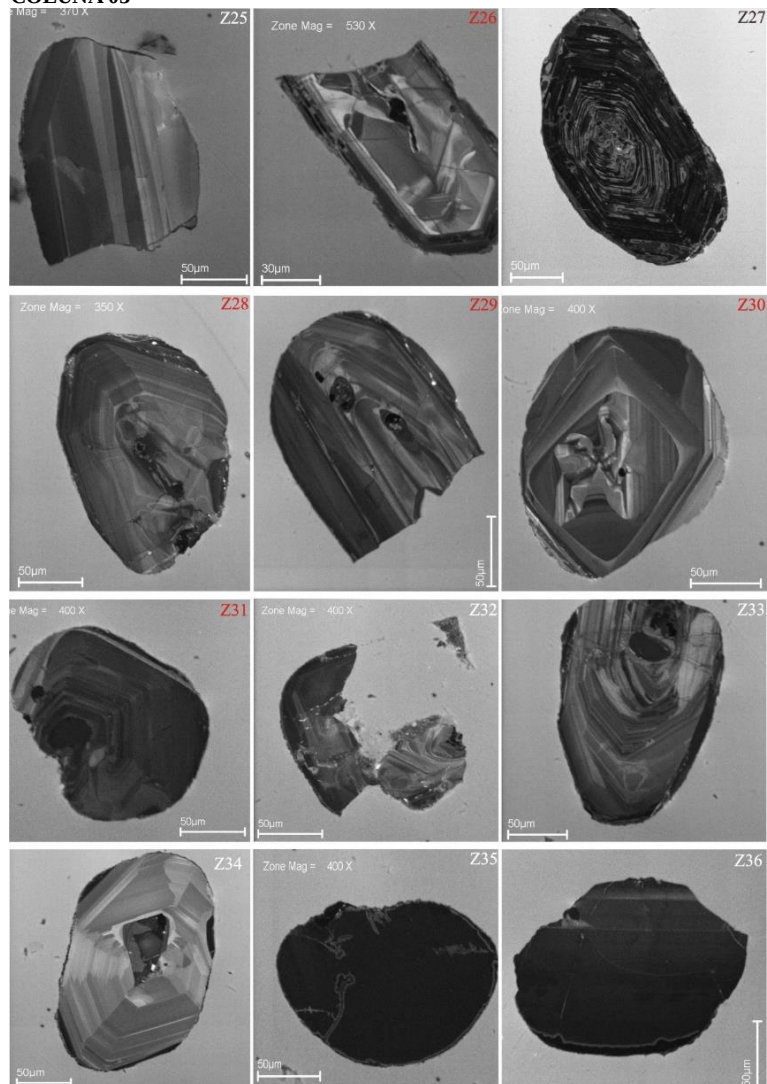


**COLUNA 02**

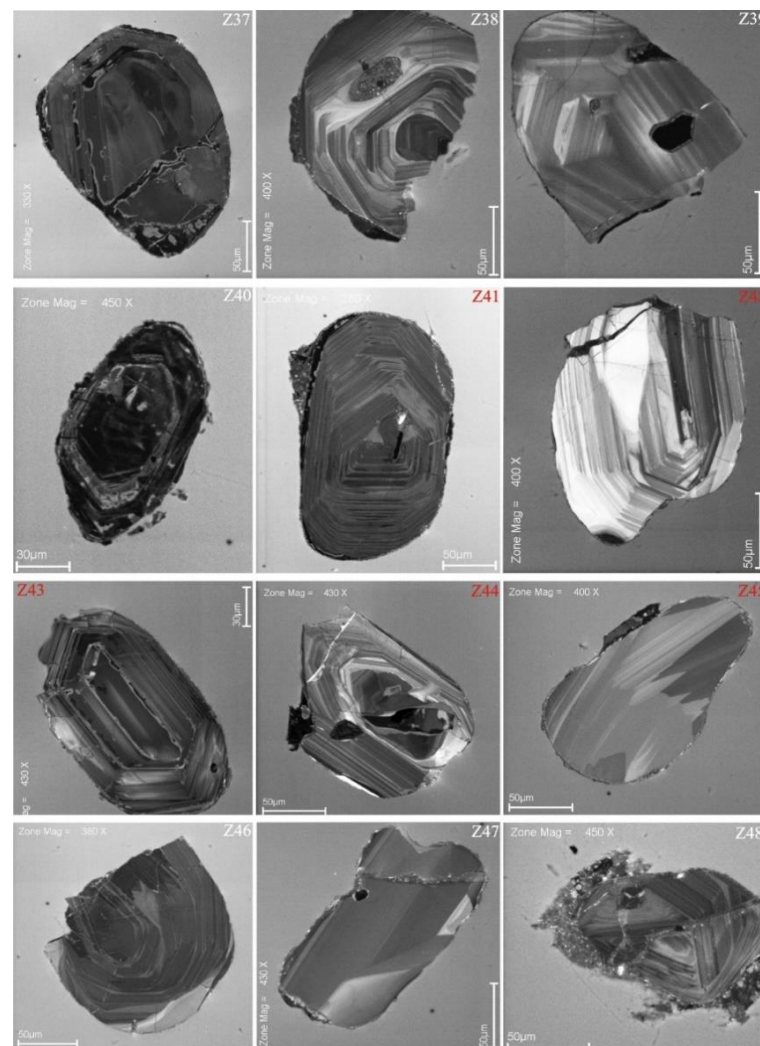


## APÊNDICE A – Zircões Detríticos LT-14 – (180-125µm) PARTE 02

COLUNA 03

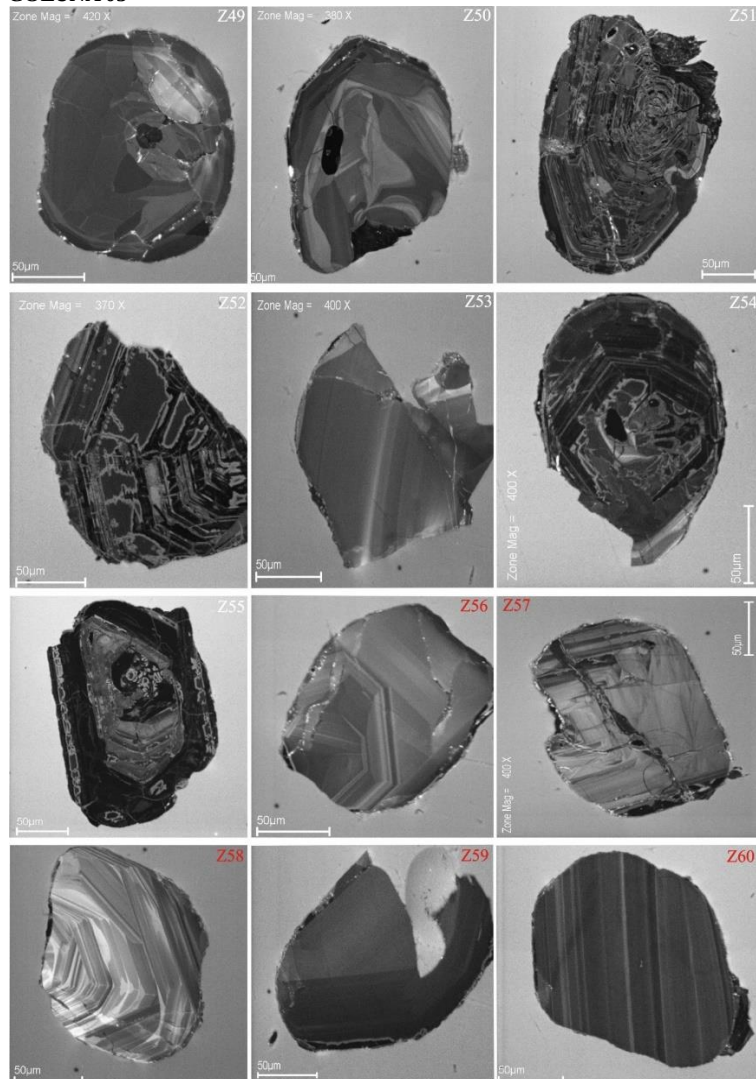


COLUNA 04

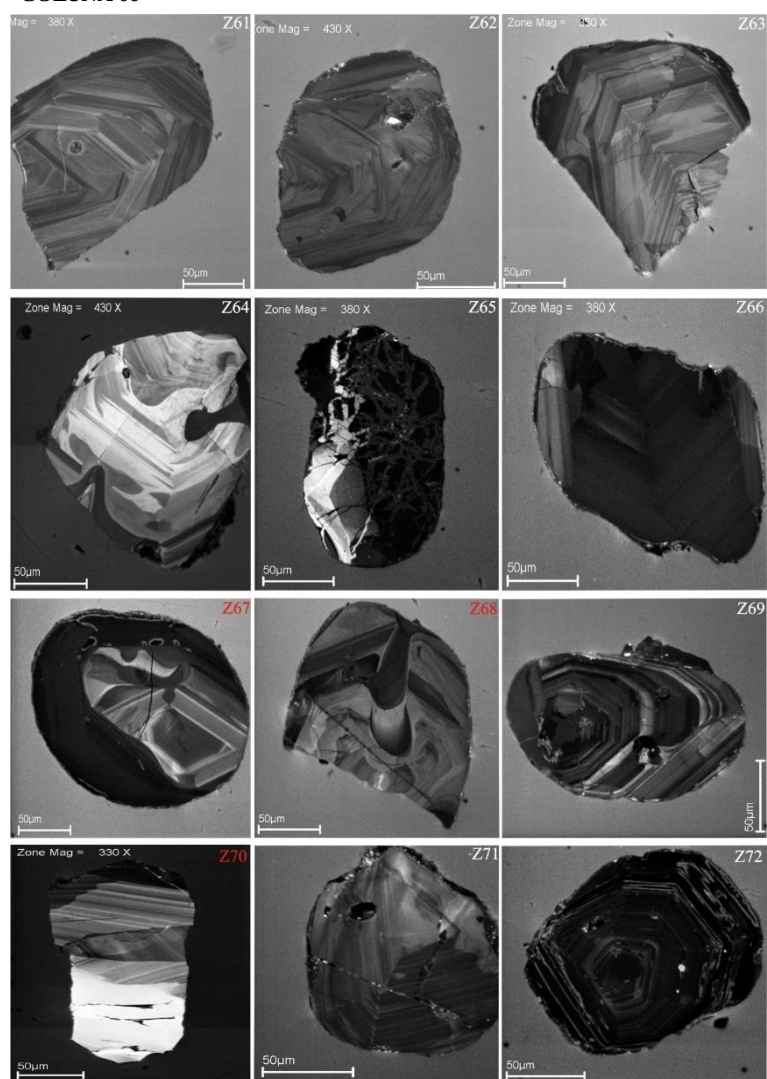


# APÊNDICE A – Zircões Detríticos LT-14 – (180-125µm) PARTE 03

COLUNA 05

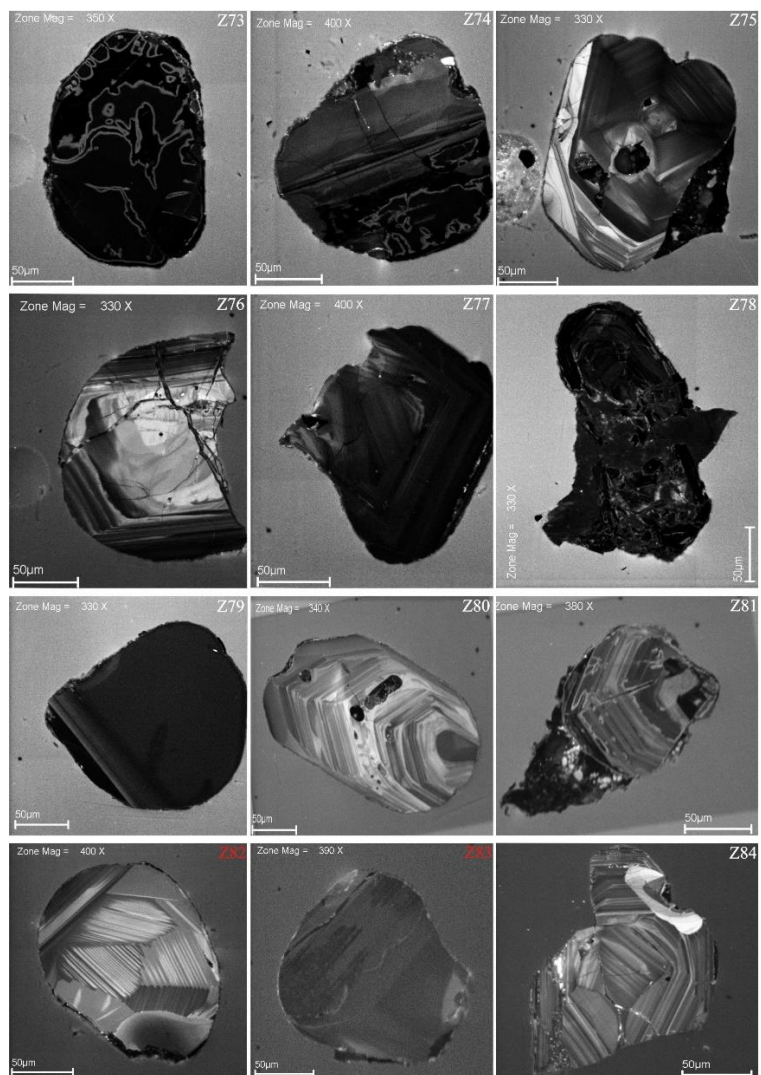


COLUNA 06

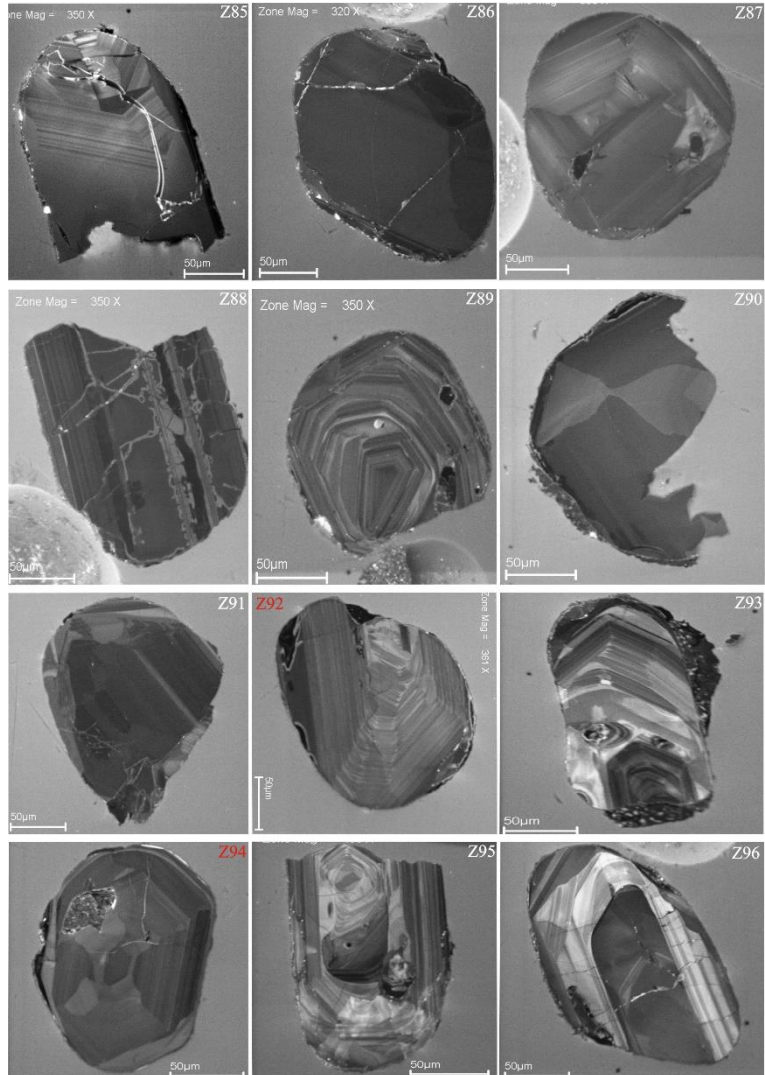


# APÊNDICE A – Zircões Detríticos LT-14 – (180-125µm) PARTE 04

COLUNA 07

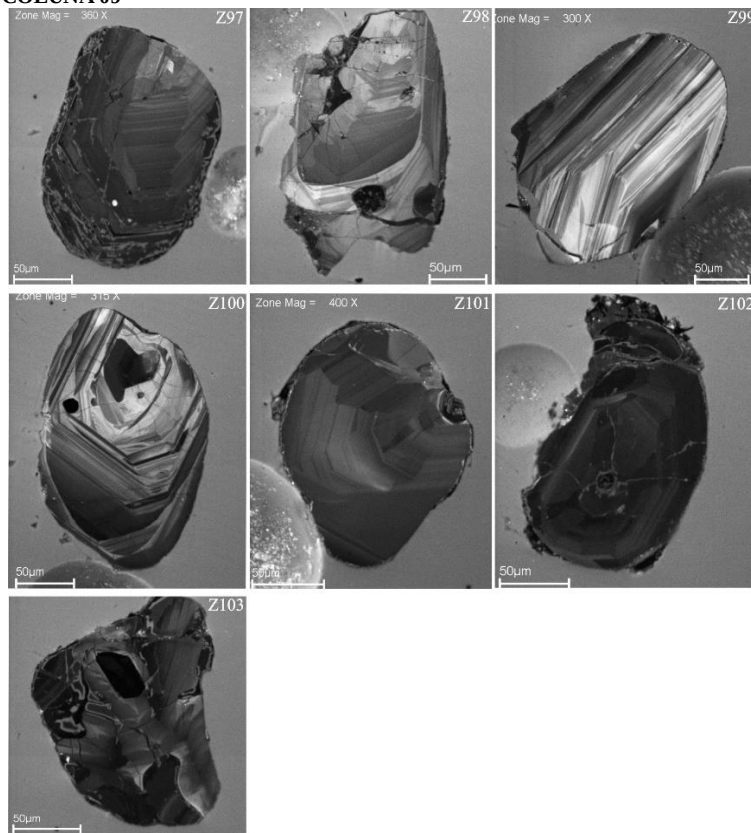


COLUNA 08



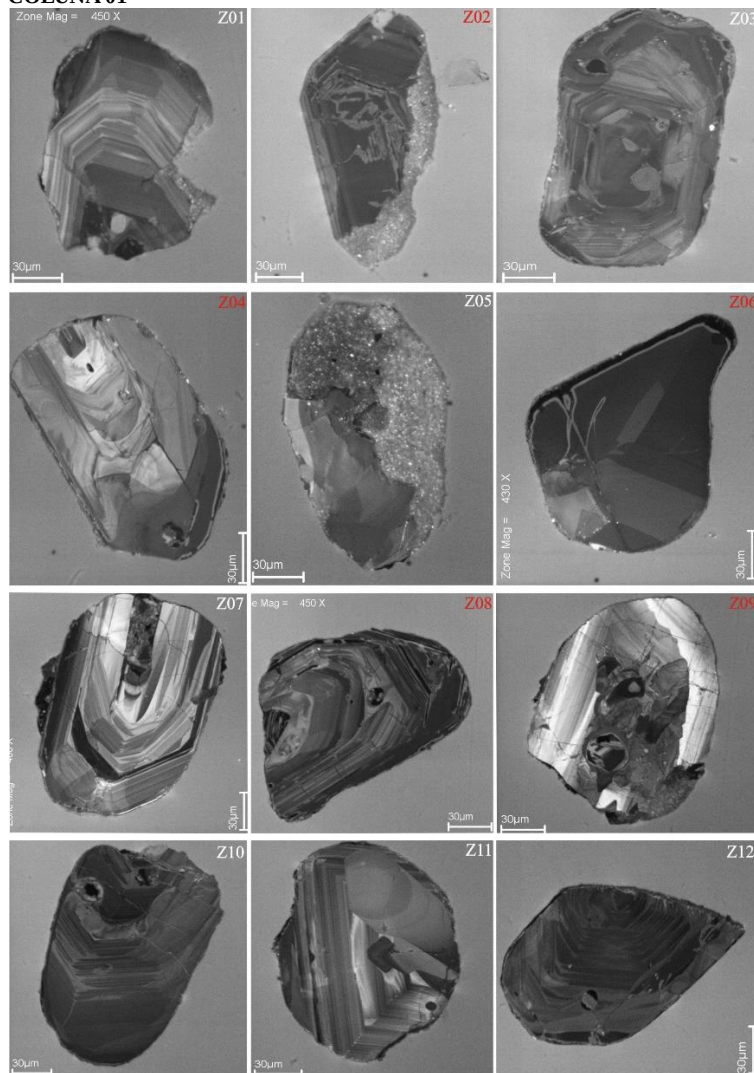
## APÊNDICE A – Zircões Detríticos LT-14 – (180-125µm) PARTE 05

### COLUNA 09

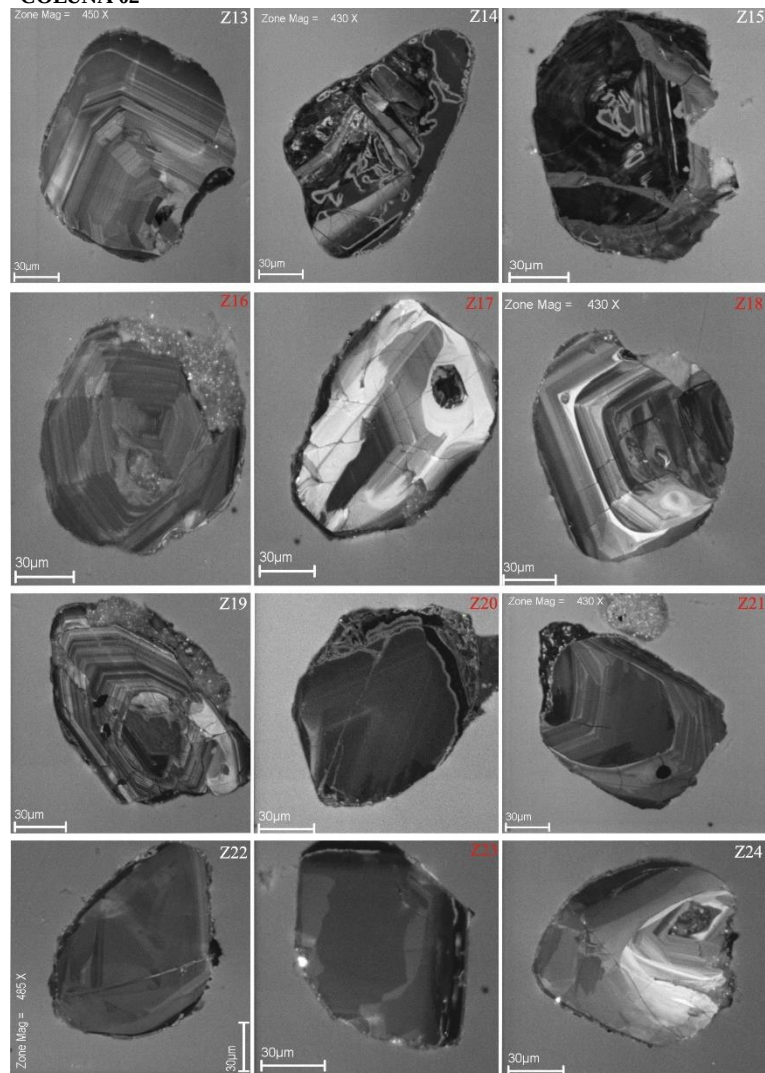


# APÊNDICE B – Zircões Detríticos LT-14 – (125-75µm) PARTE 01

COLUNA 01

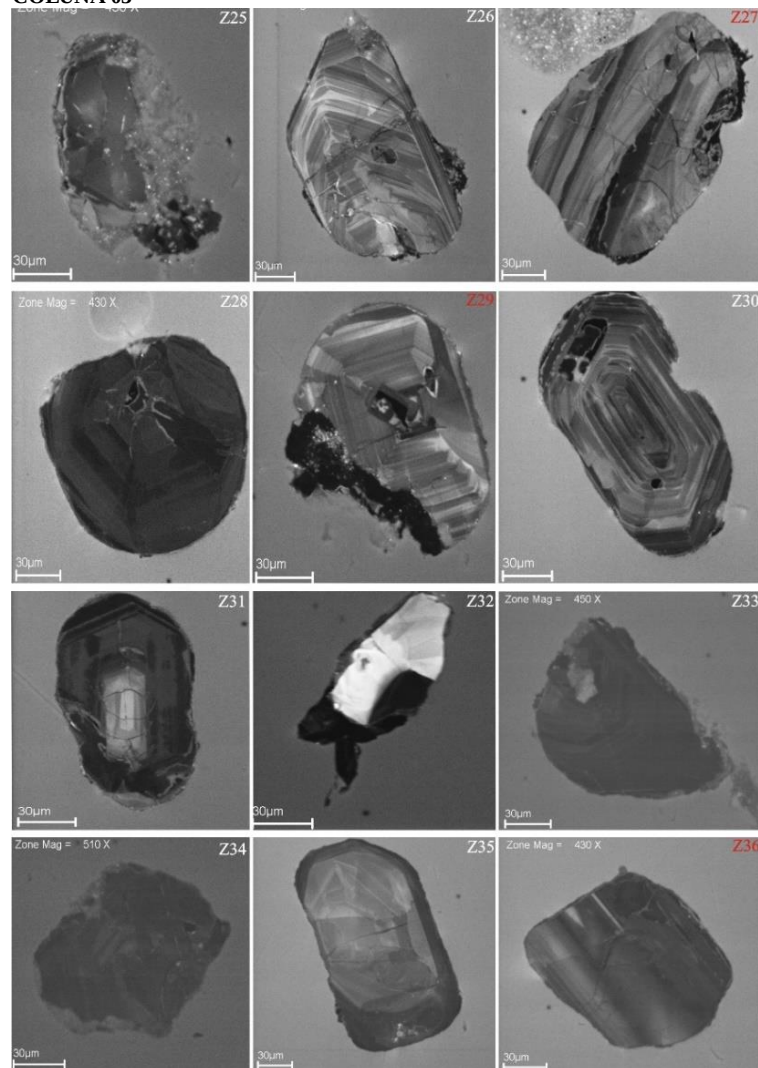


COLUNA 02

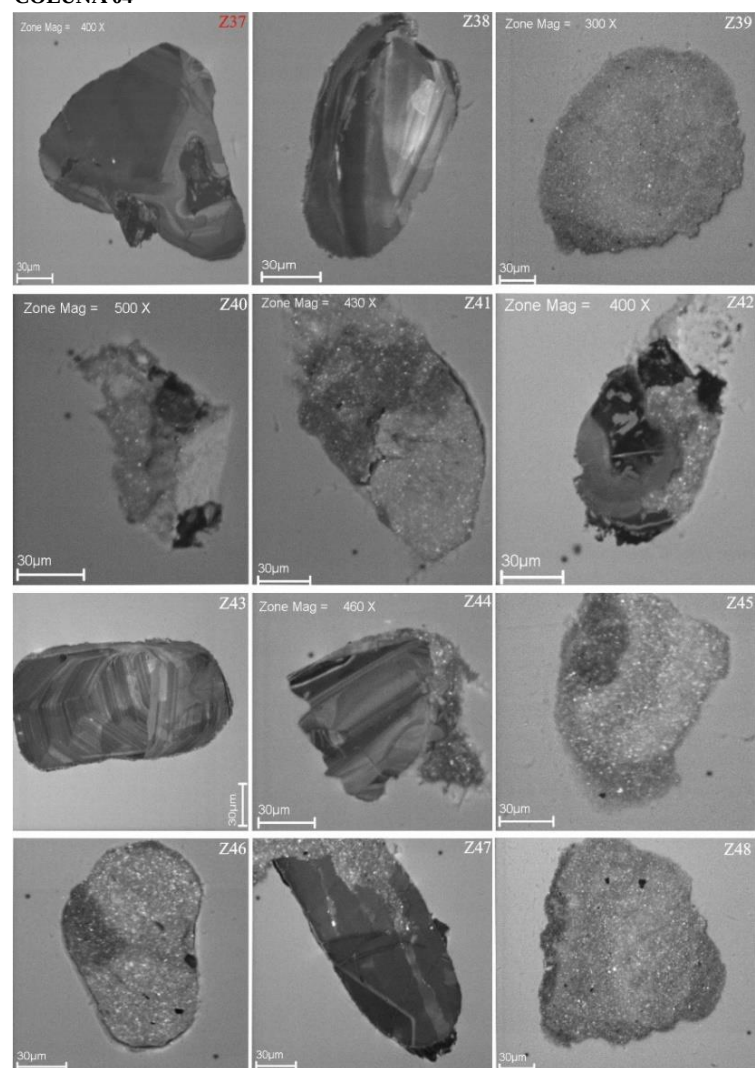


## APÊNDICE B – Zircões Detríticos LT-14 – (125-75µm) PARTE 02

COLUNA 03



COLUNA 04



## APÊNDICE B – Zircões Detríticos LT-14 – (125-75µm) PARTE 03

### COLUNA 05

