

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Geologia

**GEOCRONOLOGIA E PROVENIÊNCIA SEDIMENTAR DA FORMAÇÃO  
APRAZÍVEL (BACIA DO JAIBARAS) ATRAVÉS DA ANÁLISE DE ZIRCÕES  
DETRÍTICOS**

Nadine Chiosini Pivetta



Prof. Dr. Lucas Veríssimo Warren

Rio Claro (SP)

2021

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Câmpus de Rio Claro

NADINE CHIOSINI PIVETTA

GEOCRONOLOGIA E PROVENIÊNCIA DA  
FORMAÇÃO APRAZÍVEL (BACIA DO JAIBARAS)  
ATRAVÉS DA ANÁLISE DE ZIRCÕES  
DETRÍTICOS

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Instituto de Geociências e  
Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro, da  
Universidade Estadual Paulista Júlio de  
Mesquita Filho, para obtenção do grau de  
Geólogo.

Rio Claro - SP

2021

P693g Pivetta, Nadine Chiosini  
Geocronologia e proveniência sedimentar da Formação Apazível (Bacia do Jaibaras)  
através da análise de zircões detríticos / Nadine Chiosini Pivetta. -- Rio Claro, 2021  
50 p. : tabs., fotos, mapas

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Geologia) - Universidade Estadual  
Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientador: Lucas Veríssimo Warren  
Coorientador: Rodrigo Irineu Cerri

1. Geociências. 2. Geologia. 3. Geocronologia. 4. Zircões Detríticos. 5. Bacia  
Sedimentar. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas,  
Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

NADINE CHIOSINI PIVETTA

GEOCRONOLOGIA E PROVENIÊNCIA DA  
FORMAÇÃO APRAZÍVEL (BACIA DO JAIBARAS)  
ATRAVÉS DA ANÁLISE DE ZIRCÕES  
DETRÍTICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
- Câmpus de Rio Claro, da Universidade  
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para  
obtenção do grau de Geólogo.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Lucas Veríssimo Warren (orientador)

Prof. Dr. Filipe Varejão

Prof. Dr. Luciano Alessandretti

Rio Claro, 18 de Agosto de 2021.

*Nadine Chiosini Pivetta*

Assinatura do(a) aluno(a)



assinatura do(a) orientador(a)

Dedico este trabalhos aos meus pais e minha  
irmã. Vocês são minha inspiração.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço meus pais, Wanda e José Roberto, que me permitiram viver os melhores dias da minha vida e que estarão sempre ao meu lado para os que ainda virão. Obrigada por me ensinarem o quanto a educação, dedicação, força de vontade, esforço, amor e amizade nos fazem chegarmos mais longe. Tudo que eu sou hoje é reflexo de vocês.

Agradeço a minha irmã Camila, que mesmo à exatos 9312 km de distância se faz presente todo dia, que sempre me apoiou e torceu por mim, além de puxar minha orelha quando necessário e arrumar minha franja. Todo dia acordo orgulhosa de ser sua irmã.

Agradeço minha família toda, pelo sistema de suporte incrível que existe atrás de mim e, também por se divertirem com todas as histórias e aventuras que conto, além de se interessarem pelas *pedras* que coleciono em casa.

Agradeço ao meu orientador Lucas Warren que sempre me ajudou e muito me ensinou tanto nas aulas quanto me orientando no desenvolvimento desse trabalho, me fazendo gostar cada vez mais da geologia. Também ao meu co-orientador Rodrigo Cerri que dividiu comigo os dados desse projeto e me ajudou a torná-lo realidade.

Agradeço a todos os professores que tive durante a graduação, as aulas, os campos, as conversas, os conselhos, as noites mal dormidas estudando para as provas, me ensinaram muito sobre a geologia e a vida. Um agradecimento especial ao professor Washington Barbosa que, através do PET, me abriu os olhos para quem eu queria ser como aluna e futura geóloga.

Um muito obrigado aos amigos e amigas que fiz em Rio Claro e com certeza levarei para vida. Agradeço pelas aventuras, as conversas, as risadas, as viagens, os trabalhos, as F's e cervejadas, pelo companheirismo e a amizade que fizeram esses “cinco anos” serem memoráveis. Giulia Vincenzo, Caíque Ildebrand, Marcelo Sacchi, Thomas Bremer, Enrico Marchi, João Pedro Prado, Suelen Portughesi, Amanda Molina, Lara Agostini, Nathalia Weigel, Paulo Henrique Camargo, João Pedro Goldnadel, guardo um pedaço de vocês comigo. Um viva ao Enrico e João Pedro Prado que fizeram o quarto ano ser mais incrível e me fizeram rir nos momentos que mais quis acertá-los com meu martelo, que time!

Aos meus amigos americanenses, Amanda Baptistella, Lais Paffaro, Vinicius De Nadai, Naíke Barão, Vinícius Faé, Luis Felipe Furtado que cresceram comigo e são responsáveis por milhares de memórias incríveis e sempre foram e serão um bom motivo para voltar para casa.

*The time will come  
when, with elation  
you will greet yourself arriving  
at your own door, in your own mirror  
and each will smile at the other's welcome,*

*and say, sit here. Eat.  
You will love again the stranger who was yourself.  
Give wine. Give bread. Give back your heart  
to itself, to the stranger who has loved you*

*all your life, whom you ignored  
for another, who knows you by heart.  
Take down the love letters from the bookshelf,*

*the photographs, the desperate notes,  
peel your own image from the mirror.  
Sit. Feast on your life.*

Love After Love, Derek Walcott

## RESUMO

A Bacia do Jaibaras localiza-se na porção norte da Província Borborema, ocupando áreas dos estados de Ceará, Piauí e Maranhão. Inicialmente descrita como uma bacia de rifte gerada pela reativação rúptil de estruturas pré-cambrianas vinculadas ao Sistema de Falhas do Lineamento Transbrasiliano, a Bacia do Jaibaras é constituída, da base para o topo, pelas formações Massapê, Pacujá, Parapuí e Aprazível. Amostras da Formação Pacujá forneceram idades Rb/Sr ao redor de  $535 \pm 27$  Ma, ao passo que rochas vulcânicas da Formação Parapuí apresentaram idades K/Ar entre 510 e 480 Ma, posicionando a deposição destas unidades entre os períodos Ediacarano e Ordoviciano Inferior. No entanto não existem datações confiáveis da parte superior da Bacia do Jaibaras, notadamente representada pelos conglomerados e arenitos da Formação Aprazível. Buscando preencher esta lacuna, realizou-se datação de 210 grãos de zircões detríticos da Formação Aprazível pelo método LA-ICP-MS o que permitiu a identificação de variações de áreas fontes e idades de deposição máxima para esta unidade. A comparação com dados da literatura também possibilitou a identificação de mudanças sutis na área fonte dos sedimentos permitindo distinguir fontes cambrianas, neoproterozoicas e paleoproterozoicas. Os grãos cambrianos perfazem cerca de 13% de todos os dados, correspondem a fontes proximais, como as intrusões graníticas Meruoca e Mucambo e, possivelmente, internas à própria bacia, tais como a Formação Parapuí. Zircões neoproterozoicos, especialmente os de idade ediacarana, perfazem cerca de 60% de todos os dados obtidos, sendo a principal fonte de sedimentos para a Formação Aprazível. Zircões paleoproterozoicos perfazem 22% de todos os dados, apresentando grãos de idade Estateriana, Orosiriana, Riacciana e Sideriana. Apenas 4% dos grãos apresentaram idade arqueana e 1% mesoproterozoica. Idades paleo, meso e neoproterozoicas indicam fontes mais distais pertencentes ao embasamento regional da Província Borborema. Com base nos dados geocronológicos, foram também testados cinco métodos de cálculo de idade máxima de deposição, sendo que as idades com menor erro e maior confiança foram de 489 e 517 Ma ( $503 \pm 14$  Ma) para a Formação Aprazível, indicando idade miaolingiana (Cambriano) para a fase terminal de sedimentação da Bacia do Jaibaras.

**Palavras-chave:** Bacia do Jaibaras, Formação Aprazível, zircões detríticos, proveniência sedimentar, idade máxima de deposição.

## ABSTRACT

The Jaibaras Basin is located in the northern part of the Borborema Province, occupying areas in the states of Ceará, Piauí and Maranhão. Initially described as a rift basin generated by the brittle reactivation of Precambrian structures related to the Transbrasiliano Fault System, the Jaibaras Basin is constituted, from the base to the top, by the Massapê, Pacujá, Parapuí and Aprazível formations. Samples from the Pacujá Formation provided Rb/Sr ages around  $535 \pm 27$  Ma, while volcanic rocks from the Parapuí Formation had K/Ar ages between 510 and 480 Ma, placing the deposition of these units between the Ediacaran and Ordovician periods. However, there are no reliable dates for the upper part of the Jaibaras Basin, notably represented by the conglomerate and sandstone of the Aprazível Formation. Seeking to fill this gap, 210 grains of detrital zircons from the Aprazível Formation were dated by the LA-ICP-MS method, which allowed the identification of variations in source areas and maximum depositional age for this unit. The comparison with literature data also allowed the identification of subtle changes in the source area of the sediments, allowing to distinguish Cambrian, Neoproterozoic and Paleoproterozoic sources. Cambrian grains make up about 13% of all data, correspond to proximal sources, such as the Meruoca and Mucambo granitic intrusions, and possibly sources within the basin itself, such as the Parapuí Formation. Neoproterozoic zircons, especially those of Ediacaran age, make up about 60% of all data obtained, being the main source of sediments for the Aprazível Formation. Paleoproterozoic zircons account for 22% of all data, with grains of Statherian, Orosirian, Rhyacian and Siderian ages. Only 4% of the grains are Archean and 1% Mesoproterozoic. Paleo, Meso and Neoproterozoic ages indicate more distal sources belonging to the regional basement of the Borborema Province. Based on the geochronological data, five methods for calculating the maximum depositional age for the Aprazível Formation were also tested, obtaining ages with lowest error and highest confidence between 489 and 517 Ma ( $503 \pm 14$  Ma), and indicating a Miolingian age (Cambrian) for the terminal phase of sedimentation of the Jaibaras Basin.

**Keywords:** Jaibaras Basin, Aprazível Formation, detrital zircons, sedimentary provenance, maximum depositional age.

## SUMÁRIO

1	Introdução.....	13
2	Objetivos .....	14
3	Justificativa.....	14
4	Materiais e Métodos .....	14
4.1	Leitura e Análise Crítica da Bibliografia.....	14
4.2	Trabalho de Campo.....	14
4.3	Trabalhos de Laboratório.....	17
4.3.1	Preparação de amostras para o método LA-ICP-MS .....	17
4.3.2	Datação de zircões detriticos pelo método LA-ICP-MS .....	19
4.3.3	Análise de proveniência sedimentar.....	21
4.3.4	Métodos para cálculo da Idade Máxima de Deposição.....	22
5	Contexto Geológico.....	23
5.1	Bacia do Jaibaras.....	23
5.2	Litoestratigrafia .....	25
6	Formação Aprazível .....	28
7	Resultados .....	30
7.1	Análises Geocronológicas.....	30
7.2	Idade Máxima de Deposição da Formação Aprazível .....	36
8	Discussão.....	39
8.1	Proveniência Sedimentar da Formação Aprazível .....	39
8.2	Avaliação dos métodos de cálculo da Idade Máxima de Deposição .....	41
9	Conclusões .....	42
10	Referências Bibliográficas.....	44

## Lista de Figuras

- Figura 1** – Mapa de localização da área de estudo, com destaque para os municípios e pontos de coleta. Modificado de Cerri *et al.* (2021). FCI – Falha Café Ipuera; FSPII – Falha Sobral-Pedro II; FM – Falha Massapê; ZCSA- Zona de Cisalhamento Santana do Acaraú; EDCA – Enxame de Diques Coreaú-Aroeira; BP – Bacia do Parnaíba; PB – Província Borborema; AM – Província Tectônica Amazonas; TO – Província Tectônica do Tocantins; MQ – Província Tectônica Mantiqueira; SF – Cráton São Francisco; PR – Bacia do Paraná; DMC – Domínio Médio Coreaú; DCC – Domínio Ceará Central.....16
- Figura 2** – Etapas de preparação das amostras. (A) Britador a mandíbula utilizado na britagem das amostras da Formação Aprazível. (B) Amostras após britagem. (C) Peneira de 180mm/µm utilizada para o peneiramento. (D) Parcela mais grossa (à esquerda) e mais fina (à direita) após peneiramento. (E) Bateia mecânica utilizada para separação das parcelas de minerais leves e pesados. (F) Concentrado de minerais leves (à esquerda) e de minerais pesados (à direita). (G) Separação de minerais pesados através de bromofórmio, observa-se na foto a concentração de minerais leves como material sobrenadante no líquido denso. (H) Imagem em detalhe do funil com bromofórmio apresentando os minerais pesados decantados.....18
- Figura 3** – Detalhes da montagem do *mount*. (A) Conjunto de grãos de zircão montados no molde da pastilha. (B) Pastilha com conjunto de zircões de seis amostras da Formação Aprazível. (C) Molde usado para montar os grãos de zircão da pastilha. (D) Pastilha montada com o molde para adição da resina Epoxi. (E) Pastilha finalizada já polida, representativa do *mount* 1.....19
- Figura 4** – Espectrômetro de massa (Element II LA-SF-ICP-MS) acoplado a um sistema de ablação à laser (*Photon-machine Excimer Laser* 193) no Laboratório de Geoquímica Isotópica da Universidade Federal de Ouro Preto.....20
- Figura 5** – Localização da Bacia do Jaibaras no contexto da Província Borborema e sua localização em relação à Bacia do Parnaíba.....24
- Figura 6** - Modelo geodinâmico para a evolução da Bacia do Jaibaras durante o final do Neoproterozoico e início do Cambriano (pós-Brasiliano). Retirado de Pedrosa Junior *et al.* (2017). MDC – Domínio Médio Coreaú. CCD – Domínio Ceará Central.....25
- Figura 7** – Carta Estratigráfica da Bacia do Jaibaras e base da Bacia do Parnaíba destacando a Formação Aprazível (Cerri *et. al.*, 2021).....26
- Figura 8** – Litofácies das Formação Aprazível observadas em campo. (A) Litofácies Cm, presente no ponto JBR-02. (B) Litofácies Cg, encontrada no ponto JBR-05. (C) Litofácies Am,

referente ao ponto JBR-01. (D) Litofácies Aap retirada de Quadros (1996), não encontrada em campo.....28

**Figura 9** – Diagramas em pizza das idades geradas pela análise dos zircões detríticos da Formação Aprazível. (A) Diagrama apresentando a totalidade dos 83 grãos analisados; (B-E) Diagramas dos dados obtidos separados por período geológico. n representa o número total de grãos de zircão analisados, sendo que o único grão mesoproterozoico não está representado nos gráficos. As idades e cores foram selecionadas de acordo com a Carta Cronoestratigráfica Internacional de 2019/05.....33

**Figura 10** – Gráfico de frequência de idade (Kernel Density Plot/KDE) para os zircões analisados da Formação Aprazível. n representa o número de zircões analisados. Os histogramas e gráfico foram elaborados com *Java density plotter application* (Vermeesch, 2012).....35

**Figura 11** – Histograma da idade máxima de deposição para a formação Aprazível obtido pelo método *Youngest Detritical Zircon* (YDZ).....36

**Figura 12** – Gráfico concórdia da Formação Aprazível gerado pelo método *Youngest Four Zircons* para a obtenção da idade máxima de deposição.....37

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 1</b> – Seleção das 83 idades para análise geocronológica da Formação Aprazível. As idades são consideradas a partir das razões $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ e $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ , sendo que 2s abs corresponde ao erro vinculado às idades (desvio padrão). Discordância (%) representa a discordância de cada grão.....	31
<b>Tabela 2</b> – Tabela com as idades resultantes de cada método de datação de zircão aplicados.....	37

## 1 Introdução

A Bacia do Jaibaras localiza-se no nordeste do Brasil, abarcando partes dos estados do Ceará, Piauí e Maranhão e, apresenta dimensões aflorantes de 20 x 120 km. Do ponto de vista geotectônico, essa unidade ocorre no setor norte da Província Borborema, sendo tectonicamente delimitada à leste e à oeste por zonas de cisalhamento, a saber, os lineamentos Sobral-Pedro II e Café-Ipueras, respectivamente (Parente *et al.*, 2004).

Foi inicialmente descrita como uma bacia tipo rifte originada pela reativação rúptil de estruturas pré-cambrianas vinculadas ao Sistema de Falhas Transbrasiliano (Oliveira & Mohriak 2003), uma das principais suturas da colagem que resultou na formação da porção ocidental do supercontinente Gondwana (Brito Neves & Cordani, 1991). Devido ao fato de apresentar continuidade em subsuperfície sob a Bacia do Parnaíba, Oliveira & Mohriak (2003) interpretam a Bacia do Jaibaras como o possível rifte precursor dessa sinéclise.

A estratigrafia da Bacia do Jaibaras segue a proposta de Costa *et al.* (1979), da base para o topo, formações Massapê (brecha e conglomerado), Pacujá (arenito fino e pelito), Parapuí (vulcânica bimodal) e Aprazível (conglomerado e brecha).

Na literatura existem idades obtidas por diferentes métodos para as unidades intermediárias da Bacia do Jaibaras notadamente a Formação Pacujá apresenta idade Rb/Sr de  $535 \pm 27$  Ma, interpretadas como idade de sedimentação e anquimetamorfismo por soterramento (Novais *et al.*, 1979; Garcia *et al.*, 2010; Araújo *et al.*, 2012). As rochas vulcânicas da Formação Parapuí são também datadas em  $535.6 \pm 13$  Ma (Garcia *et al.*, 2018; Novais *et al.*, 1979; Garcia *et al.*, 2010), sendo estas idades de cristalização ígnea. As idades das demais unidades da Bacia do Jaibaras ainda não são conhecidas, inviabilizando falsear corretamente a hipótese de bacia rifte precursora da bacia intracratônica do Parnaíba. Desse modo, a datação da Formação Aprazível, permitiria melhor delimitar no tempo a deposição da unidade de topo da bacia, suas áreas fonte e auxiliar na quantificação do tempo contido na discordância com a Bacia do Parnaíba.

Nesse contexto, o presente projeto de pesquisa objetiva a análise dos zircões detríticos da Formação Aprazível pelo método LA-ICP-MS, a fim de determinar suas áreas fonte e idade máxima de deposição. Com este intuito, a presente pesquisa visa preencher importante lacuna no conhecimento geológico das bacias do nordeste brasileiro, auxiliando o entendimento geotectônico e geodinâmico da consolidação final do Ciclo Brasileiro e o surgimento das primeiras bacias intracontinentais do Gondwana.

## **2 Objetivos**

Este trabalho de conclusão de curso teve como objetivo principal a análise geocronológica da Formação Aprazível, unidade superior da Bacia do Jaibaras. Para atingir este objetivo principal, foi necessário estabelecer objetivos secundários, podendo ser destacados:

- 1) Datação dos grãos pelo método U/Pb através do LA-ICP-MS;
- 2) Determinar possíveis áreas fonte de sedimentos e definir a idade máxima de deposição da Formação Aprazível;
- 3) Traçar considerações quanto a evolução geotectônica e geodinâmica do intervalo compreendido entre a consolidação final do Ciclo Brasileiro e o início da sedimentação das primeiras bacias intracontinentais do Gondwana.

## **3 Justificativa**

Apesar de algumas datações terem sido realizadas em unidades da Bacia do Jaibaras, como por exemplo àquelas obtidas por Novais *et.al* (1979) nas formações Pacujá e Parapuí, a idade da unidade de topo da Bacia ainda não é conhecida, o que inviabiliza falsear a hipótese do rifte da Bacia do Jaibaras como precursor da Bacia do Parnaíba (Oliveira & Mohriak, 2003). Deste modo, esta pesquisa buscou obter uma nova fonte de dados geocronológicos e geológicos da Bacia do Jaibaras que permitirão melhor compreensão da implantação e evolução dessa estrutura geológica e, também, seu papel, ativo ou não, no desenvolvimento da Bacia do Parnaíba.

## **4 Materiais e Métodos**

### **4.1 Leitura e Análise Crítica da Bibliografia**

A pesquisa bibliográfica foi realizada em duas etapas, compreendendo o levantamento da literatura referente aos temas de interesse e a leitura crítica da mesma. Foi dada especial atenção aos trabalhos focados nas análises geocronológicas a partir da datação dos zircões detriticos. Também foi dedicado tempo ao estudo da bibliografia disponível sobre a geologia da Bacia do Jaibaras, especialmente àquela que aborda aspectos paleoambientais, paleogeográficos e deposicionais da Formação Aprazível.

### **4.2 Trabalho de Campo**

Devido a impedimentos concernentes à pandemia de COVID-19 a etapa de campo para a cidade de Sobral e arredores (CE) não foi realizada. Deste modo, foi priorizado o tratamento de amostras previamente coletadas em outubro de 2018 que contou unicamente com a presença

do orientador do presente projeto. Esta etapa de trabalho contemplou a coleta de dados e amostras referentes à Formação Aprazível em diversas localidades e posições estratigráficas, as quais foram posteriormente encaminhadas para preparação específica.

Foram coletadas amostras na base, meio e topo da Formação Aprazível, a fim de detectar variações de idades de zircões herdados ao longo da sucessão sedimentar. Na etapa de campo a amostragem consistiu na escolha de amostras representativas da Formação Aprazível. A coleta para obtenção de zircões detríticos compreendeu a aquisição de amostras com no mínimo 5kg, corretamente posicionadas estratigraficamente. A área de estudo corresponde ao norte do Ceará, a coleta de amostras ocorreu nos arredores dos municípios de Sobral, Santana do Acaraú e Coreaú. A localização dos municípios e dos pontos amostrados podem ser observados na Figura 1.

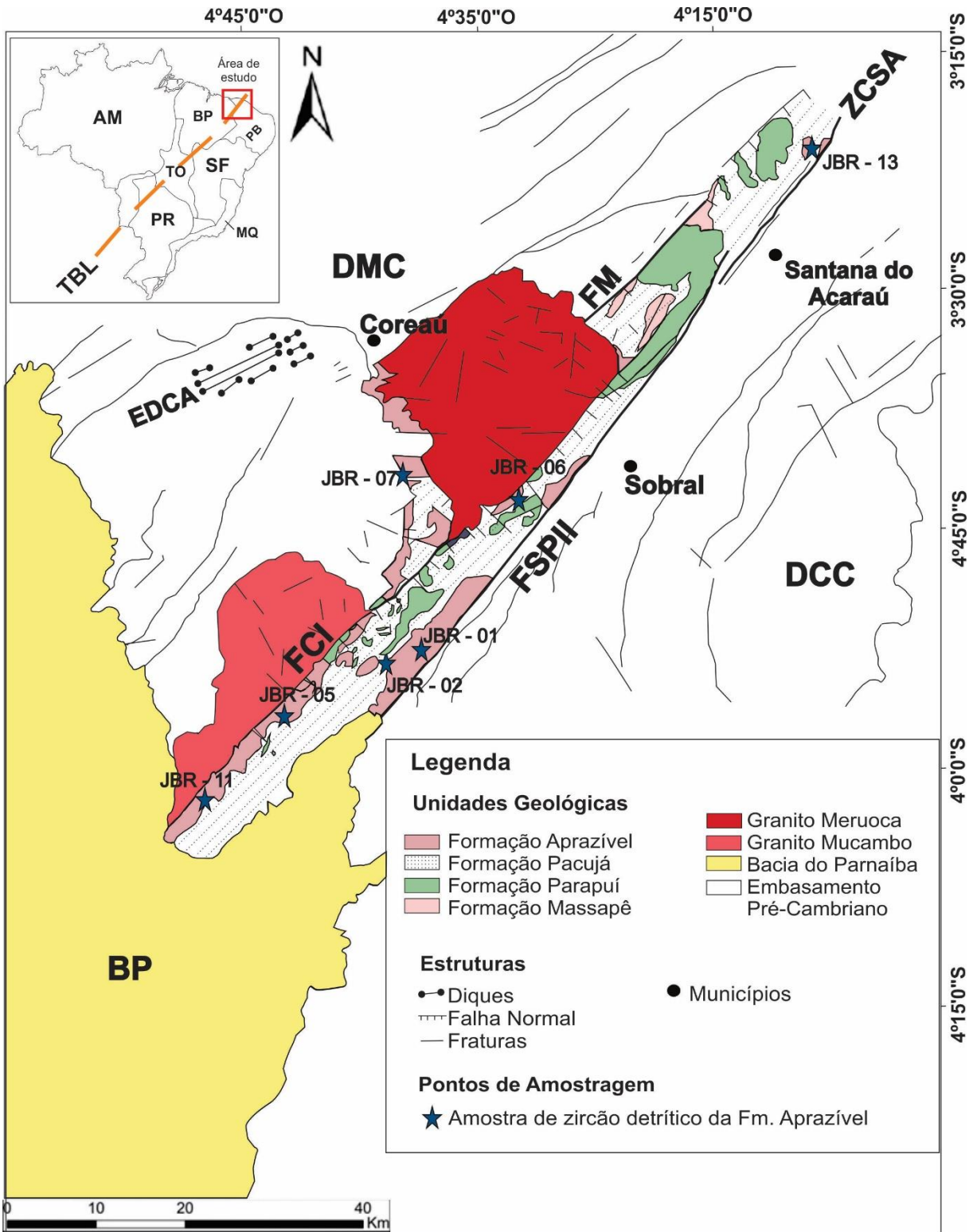


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo, com destaque para os municípios e pontos de coleta. Modificado de Cerri *et al.* (2021). FCI – Falha Café Ipuera; FSPII – Falha Sobral-Pedro II; FM – Falha Massapê; ZCSA- Zona de Cisalhamento Santana do Acaraú; EDCA – Enxame de Diques Coreaú-Aroeira; BP – Bacia do Parnaíba; PB – Província Borborema; AM – Província Tectônica Amazonas; TO – Província Tectônica do Tocantins; MQ – Província Tectônica Mantiqueira; SF – Cráton São Francisco; PR – Bacia do Paraná; DMC – Domínio Médio Coreaú; DCC – Domínio Ceará Central.

### 4.3 Trabalhos de Laboratório

#### 4.3.1 Preparação de amostras para o método LA-ICP-MS

As etapas de preparação das amostras foram inteiramente realizadas nos laboratórios do Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE) da UNESP, campus Rio Claro.

A preparação das amostras para obtenção dos grãos de zircão detrítico seguiu os procedimentos padrão de separação de minerais pesados, envolvendo as seguintes etapas (Fig.2): 1) britagem; 2) moagem em moinho de ágata; 3) peneiramento; 4) separação magnética manual com imã; 5) separação por meio de líquidos densos (bromofórmio), 6) separação magnética do concentrado mineral no separador isodinâmico Frantz.

O primeiro passo na preparação das amostras compreendeu sua lavagem, para retirada de eventuais materiais rochosos alterados e fragmentos vegetais; com as amostras secas e livres de impurezas, estas foram primeiramente fragmentadas em britador de mandíbulas e posteriormente, em moinho de pratos.

A primeira separação dos minerais leves e pesados ocorreu através da utilização de bateia mecânica; a parcela de minerais pesados concentrados gerados foi então submetida à elutriação por bromofórmio ( $\text{CHBr}_3$ , com densidade  $2,89 \text{ g.cm}^{-3}$ ), para a remoção de minerais leves, tais como quartzo e feldspato ( $2,65 \text{ g.cm}^{-3}$  e  $2,76 \text{ g.cm}^{-3}$ ). Durante esta etapa, os minerais pesados, incluindo o zircão, se concentram ao fundo da vidraria.

Este novo concentrado foi então submetido a catação manual em lupa estereoscópica Olympus para a separação dos grãos de zircão de outros minerais pesados, como rutilo, apatita e titanita. Após a catação manual, os zircões foram então separados sem distinção de tamanho, cristalinidade, grau de arredondamento e cor, e foram montados em seções polidas (*mounts*) com resina epóxi (Specifix 40, proporção 5 ml de resina para 2.5 ml de agente secante. Fig. 3).



Figura 2 – Etapas de preparação das amostras. (A) Britador a mandíbula utilizado na britagem das amostras da Formação Apazível. (B) Amostras após britagem. (C) Peneira de 180µm utilizada para o peneiramento. (D) Parcela mais grossa (à esquerda) e mais fina (à direita) após peneiramento. (E) Bateia mecânica utilizada para separação das parcelas de minerais leves e pesados. (F) Concentrado de minerais leves (à esquerda) e de minerais pesados (à direita). (G) Separação de minerais pesados através de bromofórmio, observa-se na foto a concentração de minerais leves como material sobrenadante no líquido denso. (H) Imagem em detalhe do funil com bromofórmio apresentando os minerais pesados decantados.

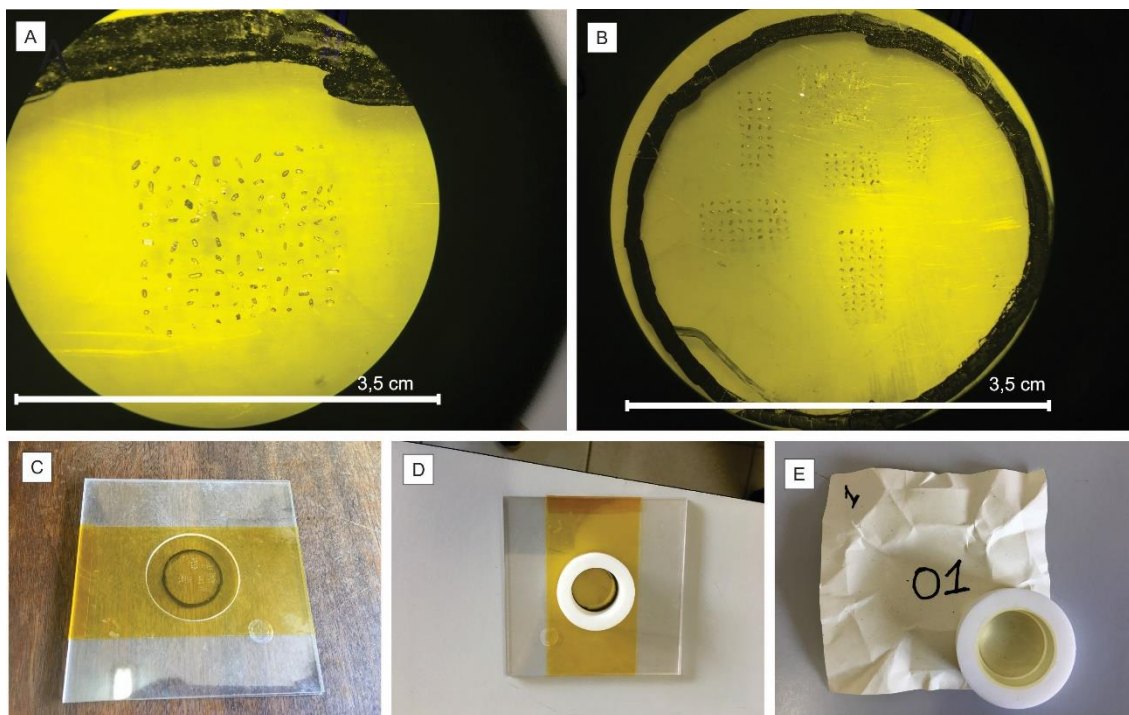


Figura 3 – Detalhes da montagem do *mount*. (A) Conjunto de grãos de zircão montados no molde da pastilha. (B) Pastilha com conjunto de zircões de seis amostras da Formação Aprazível. (C) Molde usado para montar os grãos de zircão da pastilha. (D) Pastilha montada com o molde para adição da resina Epoxi. (E) Pastilha finalizada já polida, representativa do *mount* 1.

As pastilhas foram então polidas para possibilitar a observação das características internas dos grãos e esta etapa foi realizada com o auxílio de três discos com diâmetros de partículas abrasivas conhecidos, para que os riscos do primeiro disco fossem eliminados pelo segundo e assim por diante. Após a abrasão com os três discos e a exposição do núcleo dos zircões, foi efetuado o polimento por meio de soluções com partículas de diamante com 3  $\mu\text{m}$ , 1  $\mu\text{m}$  e 0,25  $\mu\text{m}$ , respectivamente.

As pastilhas polidas foram finalmente imageadas por catodoluminescência em microscópio eletrônico de varredura (modelo JEOL 6510, acoplado à um detector de catodoluminescência) na Universidade Federal de Ouro Preto, sob o encargo do Prof. Dr. Cristiano Lana. Este procedimento permitiu avaliar a estrutura interna dos cristais de zircão, possibilitando separar as zonas fraturadas dos grãos que foram afetadas por processos de alteração hidrotermal ou de recristalização metamórfica e que, portanto, constituem regiões com menor confiabilidade para aferição das idades.

#### 4.3.2 Datação de zircões detríticos pelo método LA-ICP-MS

O espectrômetro de massa surgiu no ano de 1985 e rapidamente se tornou uma importante ferramenta analítica para a determinação de elementos-traço de amostras geológicas

(Alessandretti, 2017). Logo se percebeu que as grandes variações no Pb radiogênico e nas razões isotópicas U-Pb poderiam ser quantificadas. Para tal, foi desenvolvida a técnica de ablação a laser associada com espectrômetro de massas com plasma indutivamente acoplado (LA-ICP-MS), com potencial de datar rochas de forma similar à microsonda iônica de alta resolução (SHRIMP). O espectrômetro utiliza um feixe de luz laser que funde uma porção do zircão, a qual é analisada pelo espectrômetro de massa. As partículas do zircão são transportadas por gás Ar até a tocha de plasma, local no qual são ionizadas. O sistema de detecção do espectrômetro é equipado com coletores do tipo Faraday, contadores de íons (MIC) e um multiplicador de elétrons (SEM).

Para a obtenção das razões isotópicas U/Pb em zircões detríticos, foi utilizado o Laboratório de Geoquímica Isotópica da Universidade Federal de Ouro Preto sob coordenação do Prof. Dr. Cristiano Lana, equipado com espectrômetro de massa (Element 2 LA-SF-ICP-MS) acoplado a um sistema de ablação à laser (*Photon-machine Excimer Laser 193*), que pode ser observado na figura 4.

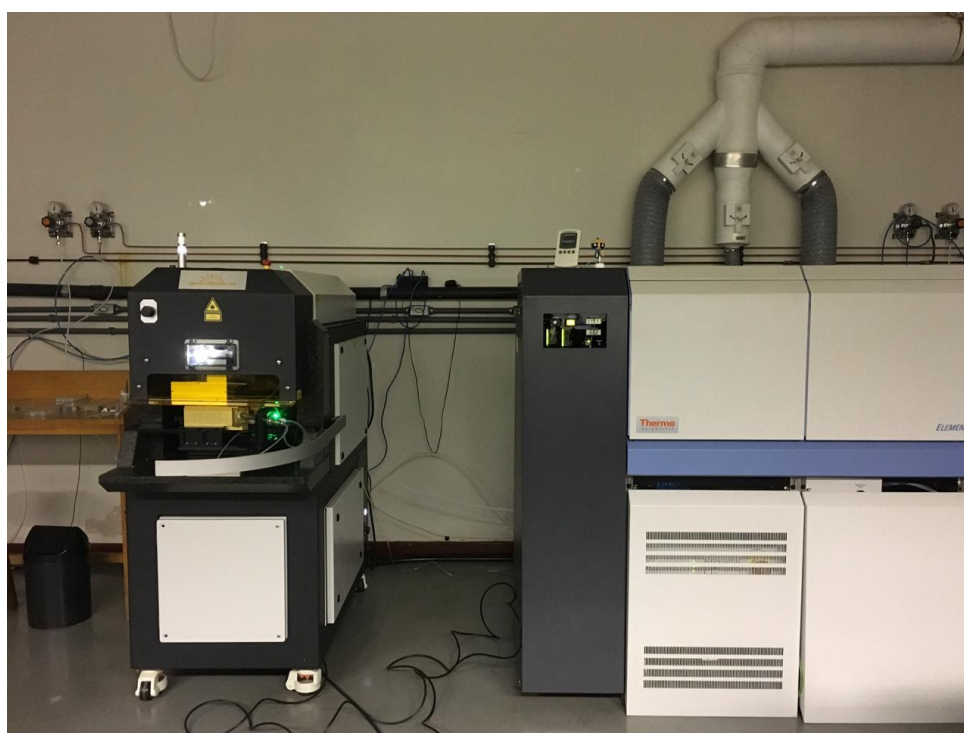


Figura 4 – Espectrômetro de massa (Element II LA-SF-ICP-MS) acoplado a um sistema de ablação à laser (*Photon-machine Excimer Laser 193*) no Laboratório de Geoquímica Isotópica da Universidade Federal de Ouro Preto.

Os procedimentos analíticos seguiram os protocolos de Jackson *et al.* (2004) e Takenaka *et al.* (2014). As análises foram conduzidas com energia de laser de  $2,65 \text{ J/cm}^2$  com uma taxa de repetição de 5 Hz e diâmetro de abertura de  $25 \text{ }\mu\text{m}$ . O material principal de referência

utilizado no laboratório da UFOP é o zircão BB-1 ( $562.58 \pm 0.26$  Ma; Santos *et al.*, 2017), sendo o GJ-1 ( $608 \pm 0.4$  Ma, Jackson *et al.*, 2004) referência secundária, e o zircão Plešovice ( $337.1 \pm 0.4$  Ma, Sláma *et al.*, 2008), referência terciária.

Após a análise dos zircões detríticos das amostras coletadas referentes à Formação Aprazível, foram separadas as razões isotópicas relevantes ( $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ,  $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ,  $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ ,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  e  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ ), as quais foram reduzidas utilizando-se o *software* Glitter, desenvolvido pela ARC *National Key Centre for Geochemical Evolution and Metallogeny of Continents* em conjunto com CSIRO *Exploration and Mining*. Para os cálculos das idades dos zircões detríticos utilizou-se o Isoplot-Ex (Ludwig, 2003). As idades de zircões menores que 1400 Ma foram reportadas através da razão  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ , enquanto que zircões com idades acima de 1400 Ma foram analisados a partir da razão  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  (Nelson, 2001).

A partir das diferentes idades das populações de zircões das Formação Aprazível foram elaborados diagramas de frequência que possibilitaram a comparação das variações de idades U-Pb ao longo da sucessão sedimentar.

### 4.3.3 Análise de proveniência sedimentar

Os dados gerados a partir da análise dos zircões detríticos por LA-ICP-MS foram tratados utilizando-se o *software* Glitter (van Achterbergh *et al.*, 2001). O programa Isoplot-Ex foi aplicado para o cálculo de idade (Ludwig, 2003). Adicionalmente, foram confeccionados gráficos de estimativa de densidade de Kernel (Kernel Density Plot, KDE) utilizando o aplicativo *Java density plotter application* (Vermeesch, 2012) e gráficos de pizza para melhor visualização dos dados. Além disso, utilizou-se o Pacote R de Proveniência de Vermeesch *et al.* (2016) para visualizar o espectro das idades dos zircões através de gráficos KDE e, também, para realizar comparação das amostras em escala multidimensional (MDS).

Para os grãos mais velhos que 1,4 Ga utilizou-se as idades geradas pela razão  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  (levando em conta a discordância correlata de  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  à  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ). Já para os grãos mais jovens que 1,4 Ga foi utilizado a razão  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  (considerando a discordância correlata de  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  à  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ ; de Araújo *et al.* 2012).

No tratamento inicial dos dados geocronológicos foram aplicados três filtros de discordância, sendo eles 3%, 15% e 30%. A utilização dos filtros de 15% e 30% levou ao aumento do número de grãos disponíveis para análise em aproximadamente 10% (8 grãos). Porém esse procedimento incluiu alguns zircões com idades improváveis (de 6-5 Ga), gerando idades finais distorcidas pelos dados não confiáveis. Com isso, o filtro de 3% apresentou os melhores resultados, pois ele não interferiu e nem enviesou os dados e resultados. Nessa análise,

os zircões detríticos mais antigos não foram filtrados nem excluídos.

#### 4.3.4 Métodos para cálculo da Idade Máxima de Deposição

Para as idades de máxima deposição, empregou-se cinco métodos distintos, a saber: (1) Único Grão Mais Jovem (*Youngest Single Grain - YSG*); (2) Zircão Detrítico Mais Jovem (*Youngest Detrital Zircon - YDZ*); (3) Pico Gráfico Mais Jovem (*Youngest Graphical Peak - YPP*); (4) Cluster dos Grãos Mais Jovens em  $2\sigma$  (*Youngest  $2\sigma$  Grain Cluster - YGC  $2\sigma$* ), e (5) Quatro Grãos Mais Jovens (*Youngest Four Zircons - Y4Z*) (a saber: Coutts *et al.*, 2019; Dickinson & Gehrels, 2009; Veermesch, 2021), sendo essas metodologias responsáveis por gerar idades mais concordantes com o contexto regional das bacias e idades já existentes na literatura. As idades obtidas foram comparadas com os dados mais recentes de idade máxima de deposição da Bacia do Jaibaras publicados na literatura (Cerri *et al.*, 2021).

De acordo com Dickinson & Gehrels (2009), para grupos amostrais de 72 a 105 grãos de zircões detríticos, as metodologias com melhores resultados são YSG, YGC  $1\sigma$  e YDZ. Além disso, estudos recentes como Veermesch (2021), também indicam o método Y4G para cálculo de Idade Máxima de Deposição com resultados consistentes.

O método YSG considera a idade e incerteza do grão mais jovem encontrado entre todas as idades U-Pb obtidas; caso a incerteza seja maior que 10 Ma, o segundo grão mais jovem é considerado como representante da idade máxima de deposição buscando uma maior precisão. Se a incerteza continuar maior que 10 Ma considera-se então o próximo grão mais jovem, até encontrar aquele com a incerteza inferior à 10 Ma (Dickinson & Gehrels, 2009).

A idade calculada pelo método YDZ é obtida a partir do uso do *software* Isoplot (Ludwig, 2008), com a aplicação da análise de Monte Carlo com base no subconjunto de idades mais jovens da população de zircões. As idades, e suas respectivas incertezas, produzem uma idade estatisticamente mais jovem, esse procedimento é repetido cerca de 10.000 vezes. Assim, o YDZ é determinado a partir da matriz das idades mais jovens geradas (Dickinson & Gehrels, 2009).

O YPP é obtido através da análise do gráfico de estimativa de densidade de KDE com a definição do pico de idade mais jovem gerado pela população de zircões detríticos; nesse método não há incerteza associada à idade máxima de deposição (Dickinson & Gehrels, 2009).

O cálculo da idade máxima de deposição através YGC  $2\sigma$  é resultado da média ponderada das três ou mais idades mais jovens dos zircões analisados, ponderadas pela incerteza das mesmas, calculado através do *software* Isoplot (Ludwig, 2008; Dickinson & Gehrels, 2009).

Por fim, a metodologia do Y4Z consiste em calcular a média ponderada das quatro idades

mais jovens geradas a partir da análise U – Pb da amostra de zircões detríticos através do *software* Isoplot (Ludwig, 2008). Neste método, a incerteza calculada para a idade máxima de deposição representa a incerteza da média ponderada (Zhang *et al.*, 2016; Ross *et al.*, 2017; Coutts *et al.*, 2019).

## 5 Contexto Geológico

### 5.1 Bacia do Jaibaras

A Província Borborema faz parte do sistema orogênico produzido pela Orogenia Brasileira que levou ao fechamento dos oceanos Goiás-Pharusian e Adamastor (Hartnady *et al.*, 1985). Este evento tectônico levou à amalgamação final do paleocontinente Gondwana Ocidental entre o final do Neoproterozoico até o Ordoviciano, durante a convergência dos crátons Amazônico, África Ocidental, São Luís, São Francisco-Congo, Sahara e os fragmentos cratônicos do Parnaíba, Paranapanema e Luiz Alves (*e.g.* Brito Neves & Cordani, 1991; Almeida *et al.*, 2000; Arthaud *et al.*, 2008; Cordani *et al.*, 2013).

Nesse contexto tectônico, do Neoproterozoico ao início do Cambriano houve a reativação rúptil do Sistema de falhas Transbrasiliano e a instalação de bacias do tipo s ao longo de seu eixo principal, sendo as principais as bacia do Jaibaras, Cococi/Rio Jucá, Sairi/Jaguarapi, Catolé/São Julião e Iara (Brito Neves, 1998; Chamani, 2015).

A Bacia do Jaibaras situa-se no limite entre os domínios Ceará Central e Médio Coreaú, na porção noroeste da Província Borborema (Fig. 5, Pedrosa Junior *et al.*, 2015; Pedrosa Junior *et al.*, 2017). Sua formação se deu na fase pós-colisional da Orogenia Brasileira, marcada pela formação de bacias distensionais tipo rifte e deposição de sequências vulcanoclásticas concomitantemente à intrusão de granitos anorogênicos (Oliveira & Mohriak, 2003; Teixeira *et al.*, 2004).

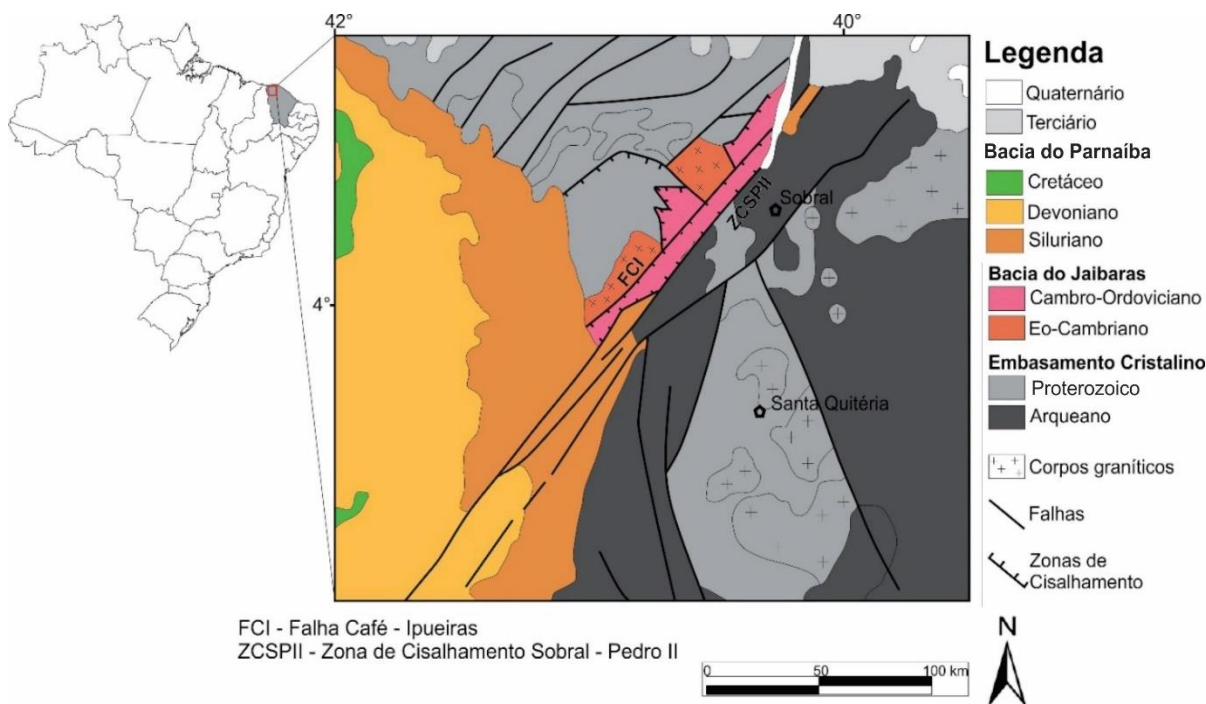


Figura 5 – Localização da Bacia do Jaibaras no contexto da Província Borborema e sua localização em relação à Bacia do Parnaíba.

A Bacia do Jaibaras apresenta uma morfologia alongada segundo na mesma direção do Lineamento Transbrasiliiano, com dimensões aflorantes de 20 x 120 km. É delimitada à leste pelo lineamento Sobral-Pedro II e à oeste pelo lineamento Café-Ipueiras (Parente *et al.*, 2004), que separa a bacia do embasamento pré-cambriano e dos batólitos ediacaranos e cambrianos Meruoca e Mucambo. A sucessão vulcano-sedimentar da Bacia do Jaibaras também ocorre em contato discordante localmente sobre os calcários deformados do Grupo Ubajara ( $524 \pm 9$  a  $499 \pm 28$  Ma; Garcia *et al.*, 2018; García, 2016).

A da Bacia do Jaibaras (Fig. 6) relaciona-se à três grandes eventos magmáticos, sendo eles do mais antigo para o mais novo: (1) Enxame de Diques Coreau, associado ao estágio inicial de abertura do rifte, com idades Rb-Sr de  $605 \pm 31$  Ma (Brito Neves *et al.*, 1978),  $580 \pm 30$  Ma (Novais *et al.*, 1979) e  $562 \pm 10$  Ma (Tavares *et al.*, 1990); (2) vulcanismo cambriano do tipo máfico representado pela Formação Parapuí e concomitante à sedimentação. Esta unidade apresenta idades K-Ar de  $502 \pm 8$  Ma e  $478 \pm 6$  Ma (Novais *et al.*, 1979) e  $469 \pm 13$  Ma (Mizusaki & Saracchini, 1990) e idades U-Pb de  $535.6 \pm 8,5$  Ma (Garcia *et al.*, 2010); (3) intrusões de corpos graníticos dos plútons Mucambo e Meruoca síncronos à sedimentação e vulcanismo terminais da Bacia do Jaibaras.

Devido ao fato que o rifte do Jaibaras apresenta continuidade em subsuperfície sob a Bacia intracratônica do Parnaíba, Oliveira & Mohriak (2003) apontaram-na como rifte precursor da sinéclise.

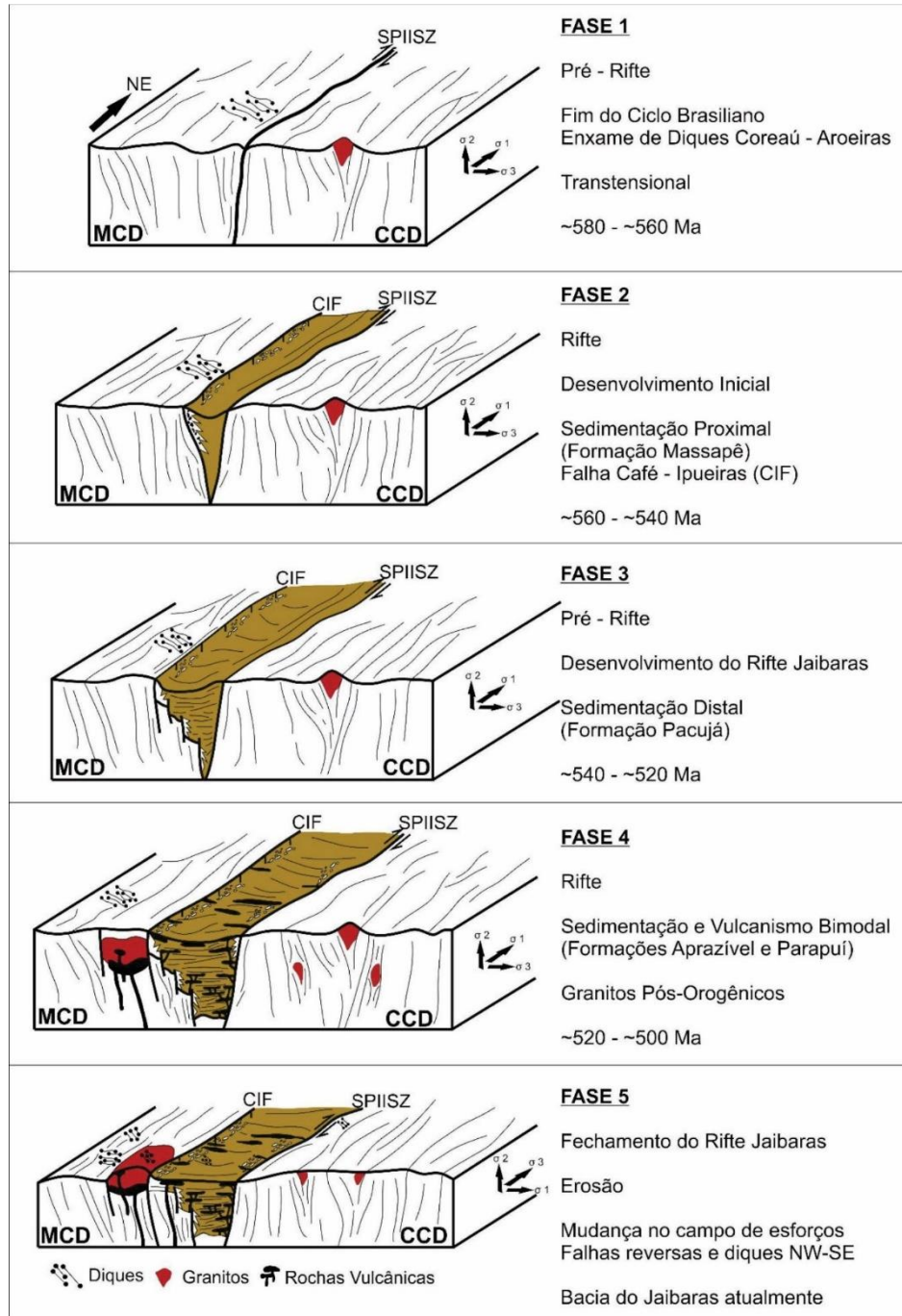


Figura 6 - Modelo geodinâmico para a evolução da Bacia do Jaibaras durante o final do Neoproterozoico e início do Cambriano (pós-Brasiliano). Retirado de Pedrosa Junior *et al.* (2017).  
MDC – Domínio Médio Coreaú. CCD – Domínio Ceará Central.

## 5.2 Litoestratigrafia

A Bacia do Jaibaras (Fig. 7) é composta pelo Grupo Jaibaras, contendo da base para o



mudanças de fácies e presença de espessos pacotes de conglomerados; (3) presença de não conformidades locais e discordâncias intraformacionais, e (4) evidências de diminuição na sedimentação controlada por efeitos tectônicos, relacionados ao rifteamento que supostamente estaria associado à origem e geração da acomodação.

A base do Grupo Jaibaras, corresponde à Formação Massapé, aflorante em toda a borda ocidental da Bacia do Jaibaras. Essa unidade é constituída por sedimentos conglomeráticos polimíticos, normalmente clasto-sustentados, brechas com clastos angulosos de até 10 cm oriundos de fontes proximais à área de deposição, cimentados por matriz de arenito arcoseano (Costa *et al.*, 1973; Pedrosa Junior *et al.*, 2015). Interpreta-se que sua deposição correspondeu à sedimentação continental proximal, posterior ao soerguimento das ombreiras do rifte e à consequente formação de desníveis relacionados às escarpas de falhas (Costa *et al.*, 1973).

Estratigraficamente acima e em contato concordante e gradacional, a Formação Pacujá é composta por uma sucessão de camadas decimétricas estratificadas de arenito fino micáceo, arenitos conglomeráticos e folhelhos pretos, roxo-avermelhado, cinza-esverdeado e creme (Costa *et al.*, 1973; 1979; Parente *et al.*, 2004). Entende-se que essa unidade foi depositada em condições de baixa energia, possivelmente em um ambiente lacustre com vulcanismo associado, provavelmente sujeito a ocasional ação de ondas de tempestade (Quadros *et al.*, 1994). Garcia *et al.*, (2010) obtiveram para a Formação Pacujá uma idade Rb/Sr de  $535.6 \pm 8.5$  Ma, referente tanto a idade de sedimentação quanto ao anquimetamorfismo por soterramento.

A Formação Parapuí corresponde a rochas vulcânicas de composição andesítica, basaltos andesíticos, riolitos e rochas vulcanoclásticas que seccionam toda a sucessão do Grupo Jaibaras (Cerri, 2021). Para essas rochas vulcânicas, Garcia *et al.*, (2010) obtiveram idades K/Ar  $537 \pm 8$  Ma, para os corpos subvulcânicos.

A Formação Aprozível, unidade de topo da Bacia do Jaibaras, ocorre discordantemente sobre as demais unidades, é composta principalmente por arenitos grossos à conglomeráticos e conglomerados polimíticos clasto-sustentados (Quadros *et al.*, 1994). Essa unidade é o foco de estudo deste trabalho e será detalhadamente descrita no item 6.

A da Bacia do Jaibaras foi posteriormente intrudida por plútons graníticos eopaleozoicos, notadamente os granitos Mucambo e Meruoca (Gorayeb *et al.*, 1988; Gorayeb *et al.*, 1993; Nascimento e Gorayeb, 2004). O plúton Mucambo é um corpo intrusivo com 200 km<sup>2</sup> de área em contato discordante com as rochas encaixantes do embasamento e da Bacia do Jaibaras (García, 2016). Do ponto de vista de suas litologias, ocorrem associados K-feldspato granitos, granitos e quartzo sienitos (Oliveira, 2001).

O batólito Meruoca, por sua vez, é um corpo intrusivo com forma próxima a quadrada, ocupando uma área de cerca de 400 km<sup>2</sup> (García, 2016). Localmente, os álcali-feldspato granitos e quartzo-sienitos (Sial *et al.* 1981) do batólito Meruóca apresentam auréolas de metamorfismo com as rochas da Bacia do Jaibaras (Gorayeb, 1988).

## 6 Formação Aprazível

A unidade ocorre ao longo da bacia com espessuras variando de dezenas de metros até 250 m. Recobre em discordância erosiva regional as rochas das formações Massapê, Pacujá, Parapuí e, localmente, o batólito Meruoca. De acordo com Costa *et al.* (1979) os depósitos estão restritos à linhas de falha e escarpas.

Quadros (1996) aponta que em campo a Formação Aprazível aflora na forma de blocos e lajedos, sustentando pequenos morrotes alinhados paralelamente às zonas de cisalhamento Sobral- Pedro II e Café-Ipueiras. Segundo este autor a unidade é principalmente constituída por: (1) conglomerado maciço (Cm); (2) conglomerado com acamamento gradacional (Cg); (3) arenito maciço (Am); (4) intercalação de arenitos e siltitos (Aap). Exemplos desta litofácies podem ser observadas na Figura 8.

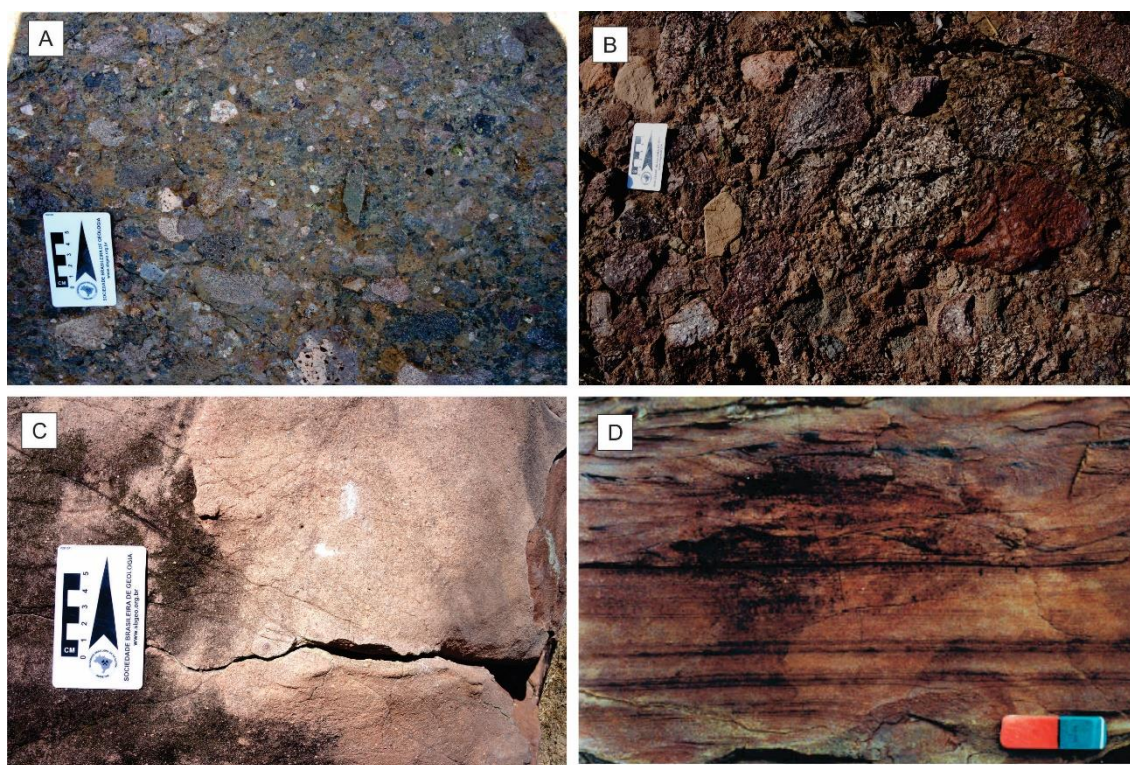


Figura 8 – Litofácies das Formação Aprazível observadas em campo. (A) Litofácia Cm, presente no ponto JBR-02. (B) Litofácies Cg, encontrada no ponto JBR-05. (C) Litofácies Am, referente ao ponto JBR-01. (D) Litofácies Aap retirada de Quadros (1996), não encontrada em campo.

A formação Aprazível é composta por conglomerado polimítico com clastos de rochas do embasamento (gnaisses, xistos, filitos, quartzitos, calcários) e das formações Massapê e Pacujá, dos plútons Mucambo e Meruoca e, também, da Suíte Parapuí. O conglomerado é geralmente matriz-sustentados com clastos subangulares à arredondados, e matriz arcoseana de granulação grossa e cor cinza esverdeada, cinza amarelada e avermelhada (García, 2016; Cerri et al., 2020; 2021).

A litofácies Cm ocorre de maneira restrita, próximo à zona de contato entre os sedimentos da Formação Aprazível e o Granito Mucambo. É constituída por conglomerado polimítico brechóide de coloração rósea-acinzentada, maciços, clasto-sustentados. Estes gradam lateralmente para conglomerados matriz-suportados, compostos por fragmentos subangulosos à subarredondados de rochas vulcânicas básicas à ácidas, arenitos, pelitos, conglomerados, granitos, feldspatos e quartzo leitoso, variando de seixos até matacões, dispersos aleatoriamente. A matriz é areno-argilosa fina a muito fina e de composição arcosiana (Quadros, 1996).

A litofácies Cg é a mais abundante, constituída por conglomerados polimíticos de coloração rósea-avermelhada à acinzentada, clasto-sustentados, contendo clastos subarredondados à subangulosos de rochas vulcânicas básicas, intermediárias à ácidas, gnaiss, granito, rochas calciossilicáticas, quartzo leitoso, anfíbolito, riolito, mármore, milonito, saltito e de arenito. Os clastos variam de grânulos até matacões e ocorrem de maneira aleatória e ocasionalmente imbricados. A matriz é arenosa arcosiana, grossa a muito grossa. Esta fácies grada, em direção ao topo, para arenitos conglomeráticos e arenitos médios a finos, com estratificação horizontal e, eventualmente, com estratificação cruzada acanalada de médio porte. Localmente ocorrem lentes de arenitos finos, de coloração cinza-amarelada, levemente micáceos, exibindo laminação plano-paralela ou feições de canalização (Quadros, 1996).

Arenito arcosiano médio a grosso maciço (litofácies Am), de coloração rósea-avermelhada com tons acinzentados, levemente micáceos, contendo grãos subarredondados à subangulosos e mal selecionados, ocorrem em camadas contendo, localmente, estratificação cruzada incipiente (Quadros, 1996).

Arenito e siltito intercalado correspondem a litofácies Aap de Quadros (1996). Os arenitos são de coloração rosa clara, finos a médios, com grãos subarredondados à subangulosos e composição arcosiana, apresenta camadas centimétricas contínuas lateralmente, que podem apresentar laminação horizontal na parte inferior e, em direção ao topo, laminação cruzada.

Além dessas estruturas, também pode apresentar estratificação cruzada acanalada de pequeno porte, laminação convoluta, lineação de partição e, eventualmente, apresentar-se sem estrutura visível. O siltito apresenta coloração roxa-acinzentada, organizado em estratos de espessuras centimétricas à milimétricas, apresentam laminação horizontal, ocasionalmente com gretas de contração com os espaços de gretação preenchidos por arenitos arcóseos médios.

A Formação Aprazível é interpretada como depositada em sistemas de grandes leques aluviais (Oliveira, 2001) gerados durante a consolidação da região noroeste do Ceará (Costa *et al.*, 1973). Deste modo, a deposição da Formação Aprazível se materializou principalmente por processos gravitacionais no qual o fluxo de detritos incorpora lama, cinzas vulcânicas, sedimentos e fragmentos de rocha das unidades mais antigas, podendo localmente caracterizar depósitos do tipo *lahar* (Pedrosa Junior, 2015). Quadros *et al.* (1994) associam a deposição da Formação Aprazível com sistemas de *fan* deltas desenvolvidos em ombreiras com alto gradiente topográfico, progredindo para lagos rasos e planícies aluviais, evidenciados por fácies de águas rasas e presença de gretas de contração.

A ocorrência de intercalação de depósitos grossos e finos podem caracterizar a existência de diferentes pulsos de subsidência, responsáveis pela abertura continuada de novo espaço de acomodação (Oliveira, 2001). Para Oliveira & Mohriak (2003), o final da deposição da Formação Aprazível foi marcado pelo início da sedimentação da Bacia do Parnaíba no Siluriano (440 Ma) no entanto, novos dados geocronológicos indicam claramente uma não continuidade entre a deposição das duas bacias (Assis *et al.*, 2019; Janikian *et al.*, 2019; Cerri *et al.*, 2020; 2021).

## 7 Resultados

### 7.1 Análises Geocronológicas

As análises geocronológicas da Formação Aprazível foram realizadas a partir de 7 amostras de arenitos e arenitos conglomeráticos (nessa litologia somente a matriz foi analisada) da unidade, resultaram na seleção aleatória de 30 grãos de zircões detríticos por amostra, os quais foram montados em resina epoxy, originando o *mount* com 210 grãos representativo da totalidade das amostras analisadas através do método de ablação a laser acoplado ao ICP-MS (LA-ICP-MS).

Os dados brutos foram filtrados para discordância de  $\pm 3\%$ , já que grãos neste patamar apresentaram idades mais fiéis, excluindo os resultados obviamente enviesados, como àqueles com idades superiores à 4,6 Ga. Para idades inferiores à 1400 Ma utilizou-se a razão isotópica

$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ , enquanto que zircões com idades acima de 1400 Ma foram analisados a partir da razão  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  (segundo protocolo de Nelson, 2001). Ao final desse processamento inicial, foram selecionadas 83 idades consideradas confiáveis, como pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 – Seleção das 83 idades para análise geocronológica da Formação Aprazível. As idades são consideradas a partir das razões  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  e  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ , sendo que 2s abs corresponde ao erro vinculado às idades (desvio padrão). Discordância (%) representa a discordância de cada grão.

Amostra	Identificação	Dates C				Discordância (%)
		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2s	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2s	
			abs		abs	
JBR-01	1.sSMPABC017	2113	34			100
JBR-01	1.sSMPABC020	1908.4	46.6			100
JBR-01	1.sSMPABC016			610.6	14.6	99
JBR-01	1.sSMPABC038			618.2	8.5	99
JBR-01	1.sSMPABC034			614.7	9.3	99
JBR-01	1.sSMPABC010			542.3	7.7	99
JBR-01	1.sSMPABC013			612.4	14.7	99
JBR-01	1.sSMPABC028			616.7	9.2	99
JBR-01	1.sSMPABC036	2724.1	35.5			98
JBR-01	1.sSMPABC007			574.4	14.3	97
JBR-01	1.sSMPABC037			609.7	9.5	97
JBR-01	1.sSMPABC039			574	8.1	97
JBR-02	1.sSMPABC051			593.5	12.2	100
JBR-02	1.sSMPABC080			602.4	12.1	100
JBR-02	1.sSMPABC058			598.8	23.6	100
JBR-02	1.sSMPABC054			593.9	21.7	100
JBR-02	1.sSMPABC087	2066.1	34.5			100
JBR-02	1.sSMPABC072	2086.2	43.8			100
JBR-02	1.sSMPABC053	1939.1	37.9			100
JBR-02	1.sSMPABC059			595.9	13.9	100
JBR-02	1.sSMPABC088			600.7	13.2	100
JBR-05	1.sSMPABC120			507.5	10.6	100
JBR-05	1.sSMPABC115			608.3	8.7	100
JBR-05	1.sSMPABC094			503.5	7.5	100
JBR-05	1.sSMPABC116			526.4	7.8	100
JBR-05	1.sSMPABC095			510.8	7.5	99
JBR-05	1.sSMPABC100			530.2	9.1	98
JBR-06	1.sSMPABC157	1757	40.2			100
JBR-06	1.sSMPABC156	2707.9	32.1			100
JBR-06	1.sSMPABC151	2140	33.8			100
JBR-06	1.sSMPABC168	2354.9	34.4			100
JBR-06	1.sSMPABC147			594.2	10.1	98

JBR-06	1.sSMPABC154	1737.1	41.4			98
JBR-06	1.sSMPABC160			586.9	8.3	97
JBR-06	1.sSMPABC298	2427.7	42.6			100
JBR-07	1.sSMPABC194			643.1	9.3	100
JBR-07	1.sSMPABC199			638.9	9.3	100
JBR-07	1.sSMPABC211			621.1	9	100
JBR-07	1.sSMPABC210			619.6	8.8	100
JBR-07	1.sSMPABC189			731.7	10.3	100
JBR-07	1.sSMPABC190			610.6	8.7	100
JBR-07	1.sSMPABC197			595.3	8.7	100
JBR-07	1.sSMPABC178			613.1	8.7	100
JBR-07	1.sSMPABC174	1903.3	37.7			100
JBR-07	1.sSMPABC209			595.4	14.5	100
JBR-07	1.sSMPABC176			660.1	9.3	100
JBR-07	1.sSMPABC213			621	15	100
JBR-07	1.sSMPABC191			612.5	14.9	100
JBR-07	1.sSMPABC173			613.6	8.8	100
JBR-07	1.sSMPABC207			600.3	8.7	99
JBR-07	1.sSMPABC192	3135.7	32.1			97
JBR-11	1.sSMPABC228	2312.1	40.6			100
JBR-11	1.sSMPABC250	2385.1	35.7			100
JBR-11	1.sSMPABC219			523.9	7.8	100
JBR-11	1.sSMPABC216			518.9	11.6	100
JBR-11	1.sSMPABC253			543	7.7	100
JBR-11	1.sSMPABC218			654.8	9.4	100
JBR-11	1.sSMPABC231			616.6	14.6	100
JBR-11	1.sSMPABC251			622.5	9.1	100
JBR-11	1.sSMPABC220			661.9	9.8	100
JBR-11	1.sSMPABC237			491.1	7.5	100
JBR-11	1.sSMPABC238			514.5	8.4	100
JBR-11	1.sSMPABC252	2310.8	37.2			100
JBR-11	1.sSMPABC233			514.9	8.1	98
JBR-11	1.sSMPABC235			513.5	7.8	97
JBR-13	1.sSMPABC268			629.7	12.2	100
JBR-13	1.sSMPABC271	2156.8	42.3			100
JBR-13	1.sSMPABC272			587.9	10.7	100
JBR-13	1.sSMPABC273			680.4	12.3	100
JBR-13	1.sSMPABC274			651.4	9.2	100
JBR-13	1.sSMPABC275			1063.1	15.3	100
JBR-13	1.sSMPABC276			701.1	10.1	100
JBR-13	1.sSMPABC277			647.1	14.9	100
JBR-13	1.sSMPABC278	2102.4	46.8			100
JBR-13	1.sSMPABC279			657.7	9.4	100
JBR-13	1.sSMPABC280			609.4	9.3	100

JBR-13	1.sSMPABC287			640	9.2	100
JBR-13	1.sSMPABC288			635.9	9.6	100
JBR-13	1.sSMPABC289	2427.7	42.6			100
JBR-13	1.sSMPABC290			630.4	14.9	100
JBR-13	1.sSMPABC256			617.7	8.8	100
JBR-13	1.sSMPABC291	1947.6	40.4			98
JBR-13	1.sSMPABC292			696.3	9.8	97

As idades obtidas foram separadas conforme o período e época geológica e classificadas crescentemente, como pode ser observado nos diagramas em pizza da Figura 9.

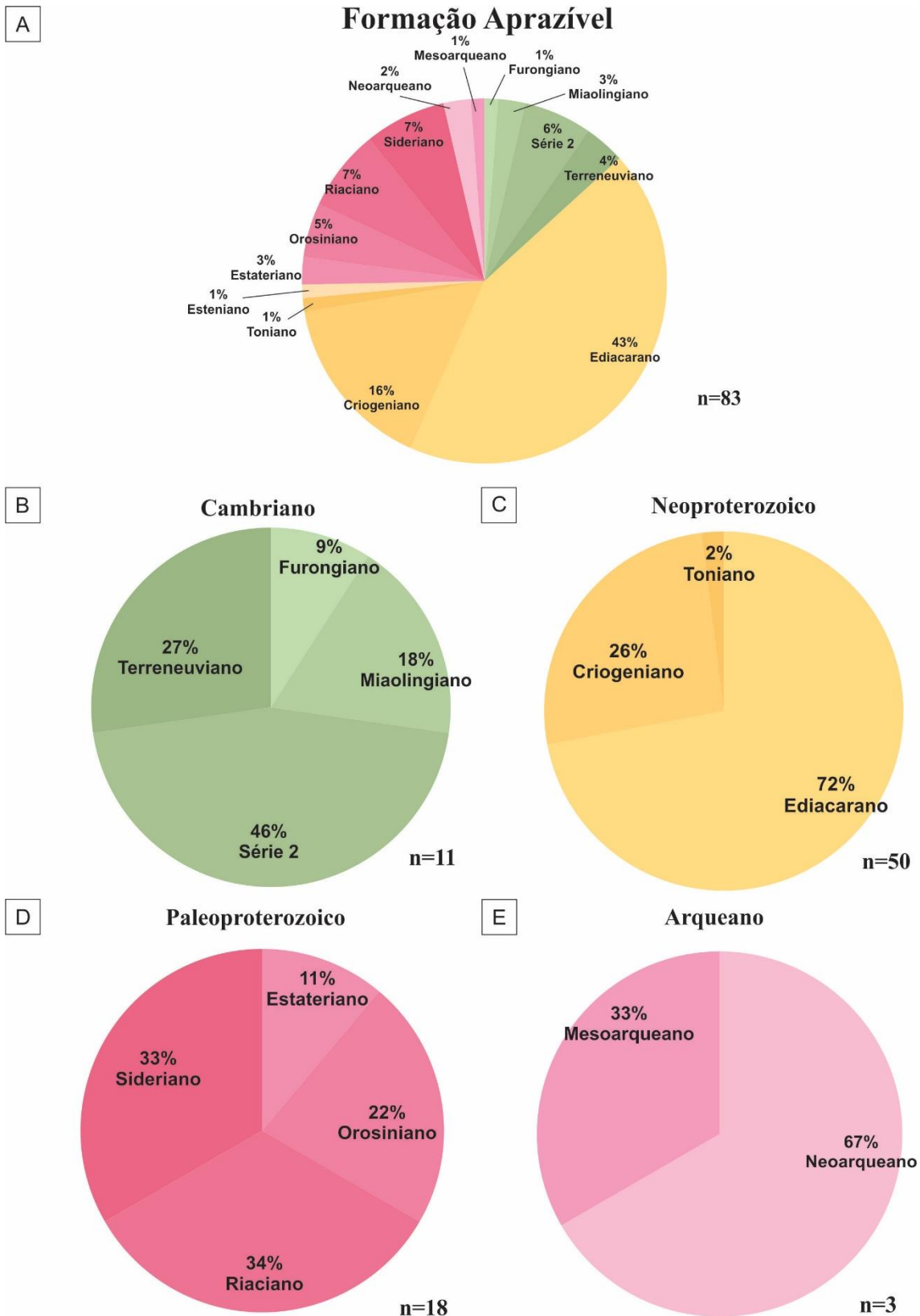


Figura 9 – Diagramas em pizza das idades geradas pela análise dos zircões detríticos da Formação Aprazível. (A) Diagrama apresentando a totalidade dos 83 grãos analisados; (B-E) Diagramas dos dados obtidos separados por período geológico. n representa o número total de grãos de zircão analisados, sendo que o único grão mesoproterozoico não está representado nos gráficos. As idades e cores foram selecionadas de acordo com a Carta Cronoestratigráfica Internacional de 2019/05.

A análise dos diagramas de idades (Fig. 9) permitiu observar que dentro do espaço amostral analisado, 3% dos grãos de zircão detrítico apresentam idade arqueana (2500 – 3600 Ma); 22% são paleoproterozoicos (1600 – 2500 Ma); 1% são mesoproterozoicos (1000 – 1600 Ma); 60% são neoproterozoicos (541 – 1000 Ma) e 14% dos grãos são cambrianos (~485 – 541 Ma). Os grãos arqueanos englobam idades mesoarqueanas (33%, 3200 – 2800 Ma) e neoarqueanas (67%, 2800 – 2500 Ma). Os zircões paleoproterozoico remetem às épocas sideriana (2500 – 2300 Ma), riaciana (2300 – 2050 Ma), orosiriana (2050 – 1800 Ma) e estateriana (1800 – 1600 Ma). As idades mesoproterozoicas manifestadas nos grãos detríticos corresponderam unicamente ao Esteniano (1200 – 1000 Ma). Os grãos neoproterozoicos, por sua vez, apresentam idades referentes ao Toniano (1000 – ~720 Ma), Criogeniano (~720 – ~635 Ma) e Ediacarano (~635 – ~541 Ma). Finalmente, zircões cambrianos mostram idades terreneuvianas (~541 – ~521 Ma), da Série 2 (~521 – ~509 Ma), miaolingianas (~509 – ~497 Ma) e furongianas (~497 – ~485 Ma). A datação U-Pb dos 83 grãos não indicaram idades pertencentes ao Paleoarqueano (3600 – 3200 Ma), nem as demais épocas mesoproterozoicas, sendo elas o Calimmiano (1600 – 1400 Ma) e Ectasiano (1400– 1200 Ma), o que permite excluir fontes com idades próximas à esta.

A análise das idades de todos os grãos claramente revela que a origem destes são unidades neoproterozoicas e cambrianas (74%), provavelmente associadas à unidades de mesma idade próximas à área de deposição original da Formação Aprazível. Idades arqueanas, paleo e mesoproterozoicas (26%) possivelmente se relacionam à fontes mais distais pertencentes ao embasamento regional da Província Borborema (Cerri *et al.*, 2020, 2021). O detalhamento das áreas fontes relacionadas à Formação Aprazível será apresentado no próximo capítulo deste trabalho.

As três idades mais jovens apresentadas pelos grãos de zircão detrítico foram cambrianas, sendo elas furongianas (Jiangshaniano) com  $491 \pm 8$  Ma (concordância de 100%), miaolingianas (Wuliuano) com  $504 \pm 8$  Ma (concordância de 100%) e  $508 \pm 11$  Ma (concordância de 100%).

Ademais, nota-se no gráfico de frequência de idade (KDE, Fig.10) a ocorrência de picos significativos em 516 Ma (Série 2, Cambriano) e 612 Ma (Ediacarano, Neoproterozoico) e picos secundários ao redor de 1746 Ma (Estateriano, Paleoproterozoico), 1921 Ma (Orosiriano, Paleoproterozoico) e 2105 (Riaciano, Paleoproterozoico).

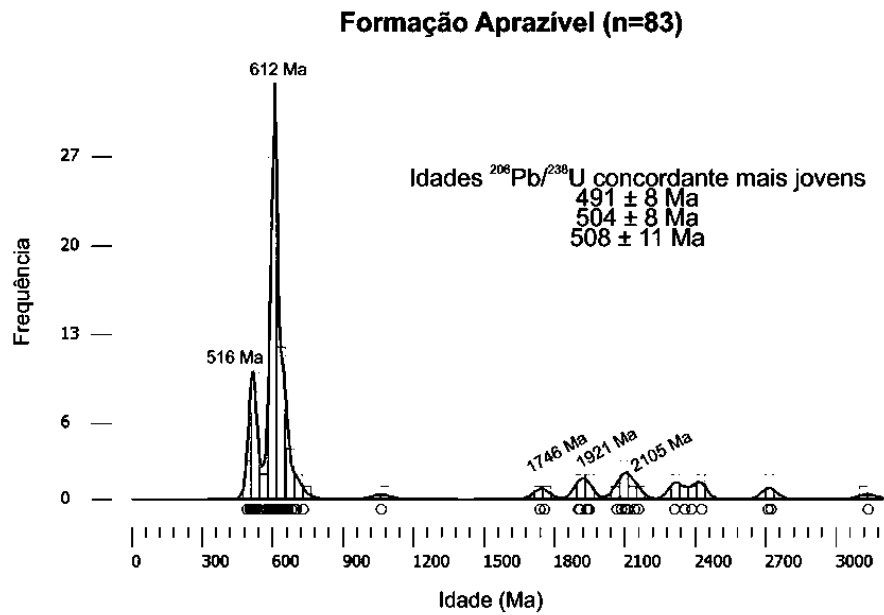


Figura 10 – Gráfico de frequência de idade (Kernel Density Plot/KDE) para os zircões analisados da Formação Aprazível. n representa o número de zircões analisados. Os histogramas e gráfico foram elaborados com *Java density plotter application* (Vermeesch, 2012).

## 7.2 Idade Máxima de Deposição da Formação Aprazível

Como explicitado no capítulo de Materiais e Métodos, as idades U-Pb obtidas para os 83 grãos de zircões detríticos da Formação Aprazível, foram analisadas a partir de cinco métodos distintos utilizados para o cálculo da idade máxima de deposição.

O primeiro método aplicado foi do Único Grão Mais Jovem (YSG), com isso o grão mais jovem foi encontrado na amostra JBR-11, com idade de  $491.1 \pm 7.5$  Ma, representando a idade de máxima deposição da unidade no Furongiano (Cambriano).

A aplicação do método do Zircão Detrítico Mais Jovem (YDZ), consistiu na seleção de todas as idades obtidas das amostras e aplicação da função homônima no *software* Isoplot (Ludwig, 2008). Este procedimento resultou na idade máxima de deposição de  $502.92 \pm 7.3$  Ma (95% de confiança) para a Formação Aprazível (Miaolingiano, Cambriano, Fig. 11).

Idade do Segundo grão mais jovem é 502.92 +6.2 -8.4 Ma com 95% conf.

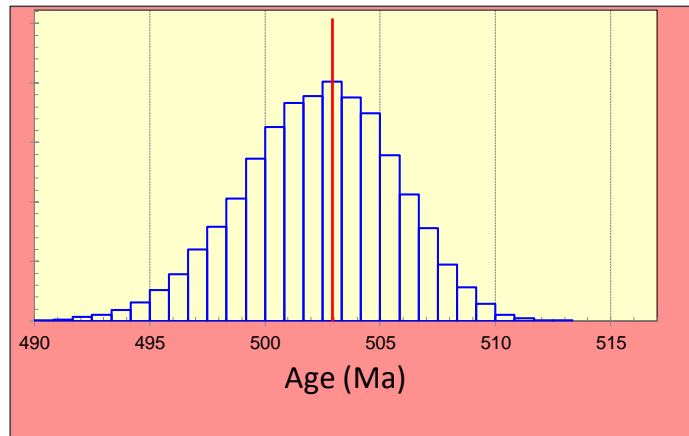


Figura 11 – Histograma da idade máxima de deposição para a formação Aprazível obtido pelo método *Youngest Detritical Zircon* (YDZ).

O método do Pico Gráfico Mais jovem (YPP) utiliza o gráfico de frequência de idade (KDE). Aplicando essa metodologia ao KDE gerado para a Formação Aprazível (Fig. 10), é possível notar um pico com menor idade ao redor de 516 Ma (Série 2, Cambriano), representando, assim, a idade máxima de deposição da unidade.

A aplicação do método dos Quatro Grãos Mais Jovens (Y4Z), correspondeu à seleção dos dados de  $^{207}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ , 2s (%),  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ , 2s (%) e Rho contidos na razão C (*Ratio C*) da tabela de dados U-Pb para os quatro grãos mais jovens e aplicação de função homônima no *software* Isoplot (Ludwig, 2008). Este procedimento gerou um gráfico concórdia referente aos zircões selecionados (Fig.12), no qual se obteve idade máxima de deposição de  $502.8 \pm 7.3$  Ma (Miaolingiano, Cambriano) para a Formação Aprazível.

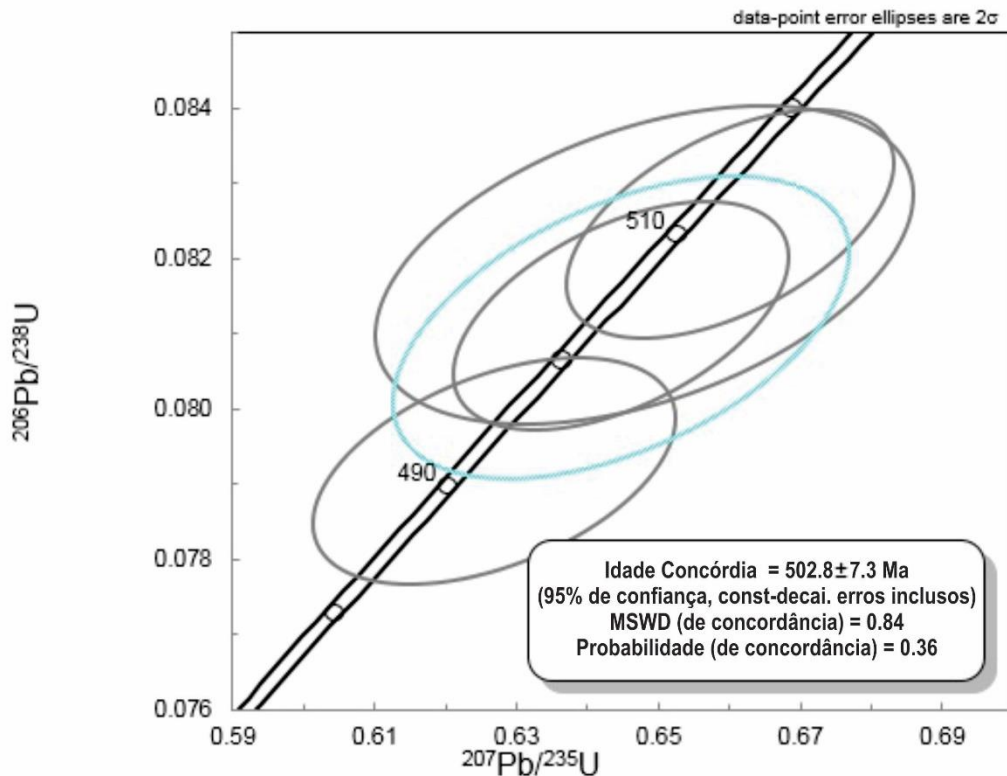


Figura 12 – Gráfico concórdia da Formação Aprazível gerado pelo método *Youngest Four Zircons* para a obtenção da idade máxima de deposição.

O último método testado foi o Cluster dos Grãos Mais Jovens em  $2\sigma$  (*Youngest  $2\sigma$  Grain Cluster* – YGC  $2\sigma$ ), calculou a média ponderada das idades selecionadas através do *software* Isoplot (Ludwig, 2008). Este procedimento foi aplicado aos três grãos mais jovens e obteve uma idade máxima de deposição de  $499 \pm 21$  Ma (Guzhangiano, Miaolingiano, Cambriano). Quando aplicado aos quatro grãos mais jovens, o método YGC  $2\sigma$  forneceu a idade máxima de deposição de  $503 \pm 14$  Ma (Miaolingiano, Cambriano).

Em vista disso, é possível observar as idades referentes à cada método de datação para os zircões detríticos aqui testados e suas respectivas idades resultantes na tabela 2.

Tabela 2 – Tabela com as idades resultantes de cada método de datação de zircão aplicados.

Método	Idade (Ma)	Era	
<b>YSG</b>	$491.1 \pm 7.5$	Cambriano	
<b>YDZ</b>	$502.92 \pm 7.3$ Ma	Cambriano	
<b>YPP</b>	516	Cambriano	
<b>Y4Z</b>	$502.8 \pm 7.3$	Cambriano	
<b>YGC <math>2\sigma</math></b>	3 zircões mais jovens	$499 \pm 21$	Cambriano
	4 zircões mais jovens	$503 \pm 14$	Cambriano

## 8 Discussão

### 8.1 Proveniência Sedimentar da Formação Aprazível

Como apresentado na seção de resultados, as idades U-Pb dos 83 grãos de zircões detríticos coletados a partir das amostras da Formação Aprazível apresentaram idades arqueanas (3%), paleoproterozoicas (24%), mesoproterozoicas (1%), neoproterozoicas (60%) e cambrianas (14%).

Considerando a deposição da Formação Aprazível por leques aluviais, nota-se que a variação faciológica da unidade é intrinsecamente condicionada pela atividade tectônica das principais falhas do Lineamento Transbrasiliano (falhas Sobral-Pedro II, Café-Ipueiras e Massapê). A composição dos clastos presentes nos conglomerados da Formação Aprazível apresentam composição diversificada, incluindo fragmentos de rochas do embasamento pré-cambriano (Domínios Ceará Central e Médio Coreaú), clastos intrabacinais, como basalto e rochas vulcânicas da Formação Parapuí, arenito e siltito da Formação Pacujá e conglomerados da Formação Massapê, além de apresentar arenito e conglomerado da própria Formação Aprazível (Quadros *et al.*, 1994; Oliveira, 2001; Cerri *et al.*, 2020). Esta configuração indica, conjuntamente o tamanho e angulosidade pronunciada dos clastos (Cerri *et al.*, 2020), que os conglomerados da Formação Aprazível apresentam arcabouço proveniente de fontes proximais. Além disso, a recorrência de eventos de mudança do nível de base, autofagia e ressedimentação na bacia (Cerri *et al.*, 2020) sugerem que a mesma apresentava-se tectonicamente ativa durante a deposição, com períodos de soerguimentos intercalados à erosão durante diferentes momentos de sua evolução (Cerri *et al.*, 2020).

Considerando o comportamento autofágico da bacia e os dados U-Pb dos zircões detríticos da Formação Aprazível, é possível definir como possíveis áreas fontes as unidades da própria Bacia do Jaibaras e unidades dos domínios Ceará Central e Médio Coreaú.

Os grãos de zircão detrítico de idade cambriana (~485 – 541 Ma) perfazem 14% do espaço amostral analisado e provavelmente são produto da erosão das unidades mais antigas da própria Bacia do Jaibaras, tais como: (1) rochas bimodais da Formação Parapuí (537 ± 8 Ma; Garcia *et al.*, 2018); (2) diques riolíticos intrusivos à Formação Aprazível (527 – 509 Ma; Garcia *et al.*, 2018), e (3) granitos pós-colisionais Mucambo (532 ± 7 Ma; Santos *et al.*, 2008) e Meruoca (542 – 514 Ma; Archanjo *et al.*, 2009; Santos *et al.*, 2013). Além dessas prováveis fontes, Cerri *et al.* (2021) também sugerem o enxame de diques Coreaú-Aroeiras que cortam o Grupo Ubajara (524 ± 9 a 499 ± 28 Ma; Garcia *et al.*, 2018) e granitos anorogênicos do Domínio Ceará Central (500 – 460 Ma; de Araújo *et al.*, 2013) como prováveis fontes cambrianas.

Os grãos Neoproterozoicos (541 – 1000 Ma), que representam 60% das idades obtidas, derivam possivelmente das unidades do embasamento pré-cambriano adjacentes à bacia, sendo elas: (1) Complexo Granítico-Migmatítico Tamboril-Santa Quitéria (640 – 600 Ma; de Araújo *et al.*, 2012b); (2) Unidade Canindé do Complexo Ceará (550 – 520 Ma; Fetter, 1999); (3) Unidade Independência do Complexo Ceará (578 – 540 Ma; de Araújo *et al.*, 2012a), e (4) Grupo Ubajara (580 – 560 Ma; Jardim de Sá, 1994; Fetter *et al.*, 2003).

A presença restrita de grãos de zircão detrítico de idade mesoproterozoica (1%, 1 grão) e arquena (3%, 3 grãos), conjuntamente com a inexistência de rochas Mesoproterozoicas próximas e a ocorrência pontual de terrenos arqueanos na Província Borborema, tornam inviável a definição precisa de áreas fonte com essas idades.

A Província Borborema apresenta grande diversidade de unidades paleoproterozoicas (1600 – 2500 Ma) em ambos seus domínios, e configura 22% das idades dos zircões detríticos da Formação Aprazível. Considerando-se o intervalo de idade entre 1621 – 2405 Ma obtidos pela análise dos zircões detríticos, é provável que estes representem áreas fonte tais como o Complexo Granja (2360 – 2280 Ma; Santos *et al.*, 2009), Formação São Joaquim (775 – 808 Ma; Fetter *et al.*, 2003) e as unidades Canindé (550 – 520 Ma; Fetter, 1999) e Independência (578 – 540 Ma; de Araújo, 2012a; de Araújo *et al.*, 2010; Cerri *et al.*, 2021).

Desse modo, considerando-se as idades obtidas pela datação U-Pb dos grãos de zircão detrítico da Formação Aprazível, nota-se que as áreas fontes são principalmente rochas neoproterozoicas (Complexo Tamboril-Santa Quitéria, unidade Canindé e Independência do Complexo Ceará e Grupo Ubajara), paleoproterozoicas (Complexo Granja, Formação São Joaquim e as unidades Canindé e Independência) e cambrianas (Formação Parapuí, Granitos Meruoca e Mucambo), regionalmente próximas à Bacia do Jaibaras.

Considerando que o contato entre a Formação Aprazível com a unidade basal da Bacia do Parnaíba (Formação Ipu) é marcada por uma discordância erosiva, o intervalo de tempo entre a deposição dessas bacias é incerta (Cerri *et al.*, 2020;2021). A composição do arcabouço dos conglomerados da Formação Aprazível, constituídos por clastos dos granitos Meruoca e Mucambo e, também, rochas vulcânicas bimodais da Formação Parapuí, sugere que a Formação Aprazível é no mínimo mais jovem que o Cambriano inferior (Cerri *et al.*, 2021).

De maneira geral, a Idade Máxima de Deposição obtida varia de  $491.1 \pm 7.5$  Ma à 516 Ma, englobando o Furongiano médio (Jiangshaniano) à Série 2 média (Estágio 3). Essas idades são coerentes com os dados mais recentes na literatura para a idade máxima de deposição da Formação Aprazível, sendo de 504 – 494 Ma ( $499 \pm 5$  Ma, Furongiano – Miaolingiano; Cerri *et al.*, 2021).

Garcia *et al.* (2010) e Araújo *et al.* (2012a) apresentaram as datações U-Pb mais recentes para as rochas da Formação Pacujá sendo elas, respectivamente,  $535.5 \pm 8.5$  Ma e  $530 \pm 8$  Ma, (Ediacarano à Cambrino inferior). Essas idades são coerentes com o intervalo de idade máxima de deposição aqui calculado para a sedimentação da Formação Aprazível. Como já discutido anteriormente, a Bacia do Jaibaras apresentou-se tectonicamente ativa durante a maior parte de sua evolução, logo é esperado que sua deposição tenha sido influenciada pela reativação de falhas transcorrentes sinistrais entre o Cambrino médio e inferior (Oliveira & Mohriak, 2003; Cerri *et al.*, 2021).

Segundo Santos & Carvalho (2009), a correlação dos diamictitos presentes na borda oeste da Bacia do Parnaíba com os tilitos de topo da Formação Nhamundá (Bacia do Amazonas) permite estabelecer que a Formação Ipu, unidade basal do Grupo Serra Grande, se depositou entre o Ordoviciano e início do Siluriano. Hollanda *et al.* (2018) sugere que dados bioestratigráficos apontam para deposição do Grupo Serra Grande já no início no Llandoveryano (Siluriano). Essas idades são mais jovens que às aqui apresentadas para a Formação Aprazível, em consonância com as idades aqui obtidas.

## 8.2 Avaliação dos métodos de cálculo da Idade Máxima de Deposição

Zircões detríticos são comumente utilizados em datações geocronológicas, principalmente por serem minerais pesados física e quimicamente estáveis bastante comuns em rochas sedimentares, o que possibilita que estes grãos suportem ciclos contínuos de soterramento, metamorfismo e erosão (Morton, 1985). Além de sua composição naturalmente radioativa, em amostras de rocha sedimentares, a população de zircões detríticos tende a ser mais representativa da variedade de possíveis áreas fontes do que outros minerais detríticos (Carter & Bristow, 2000). Deste modo, a utilização de análise U-Pb em zircões detríticos é um dos métodos mais indicados para a identificação de áreas fontes e proveniência sedimentar (Drewery *et al.*, 1987; Cliff *et al.*, 1991).

Coutts *et al.*, (2019) conduziu extensa revisão sobre os métodos de cálculos para idade deposicional a partir de zircões detríticos. Neste trabalho, foram avaliadas 11 metodologias distintas, sendo que cinco foram utilizadas na presente pesquisa, a saber, *Youngest Singles Grain* (YSG), *Youngest Graphical Peak* (YPP), *Youngest 2 $\sigma$  Grain Cluster* (YGC2 $\sigma$ ), *Youngest Detrital Zircon* (YDZ) e *Youngest Four Zircons* (Y4Z). Considerando os métodos mais utilizados na literatura nota-se que o YSG está em primeiro lugar, seguido pelo YGC2 $\sigma$  em segundo, YPP em terceiro, YDZ em nono e Y4Z em décimo (Coutts *et al.*, 2019).

Quanto ao número de amostra de zircões detríticos analisados, nota-se que a maior parte

das pesquisas em proveniência sedimentar utiliza grupos de 50 a 150 grãos (Coutts *et al.*, 2019), sendo o tamanho amostral médio de 89 grãos. Nota-se também que quanto maior o tamanho da amostra utilizada, menor o erro médio residual associado aos resultados (Coutts *et al.*, 2019). Nesse sentido, tem-se que uma amostra deva possuir no mínimo 117 grãos para apresentar resultados com 95% de confiança, considerando um grupo de idades representativo de 5% da população total (Veermesch, 2004).

A partir dos 210 grãos de zircão detríticos analisados, foram apenas consideradas 83 idades U-Pb com concordância de  $\pm 3\%$ . É importante ressaltar que para conjuntos de dados com tamanho variando de 72 a 105 grãos, aparentemente os métodos mais apropriados são o YSG, YDZ e YGC1 $\sigma$  (Dickinson & Gehrels, 2009). Segundo Dickinson & Gehrels (2009), os métodos YSG, YDZ, YPP, YGC1 $\sigma$  e YGC2 $\sigma$  possibilitam calcular idades de máxima deposição mais jovens que aquelas determinadas pela bioestratigrafia em, respectivamente, 15%, 15%, 9%, 5% e 0% das amostras, isso ocorre pois com a redução do erro médio residual aumenta a probabilidade de a idade máxima de deposição ser mais jovem que a verdadeira idade de deposição, sendo essa definidas, por exemplo, através de análise bioestratigráfica. Desta forma, tem-se que o método YGC2 $\sigma$  tende a apresentar as menores distorções para o cálculo da idade deposicional. Ainda segundo os mesmos autores, no geral os métodos que apresentam as idades mais conservadoras e estatisticamente robustas são progressivamente YDZ-YSG-YPP-YGC1 $\sigma$ -YGC2 $\sigma$ .

Os resultados aqui obtidos foram coerentes entre si, sendo que as idades obtidas pertencem ao mesmo período geológico (Cambriano), variando entre Furongiano (~497 – 485 Ma) à Série 2 (521 – 509 Ma). Os resultados obtidos pelos três métodos mais indicados (Dickinson & Gehrels, 2009); Coutts *et al.*, 2019), foram de  $491,1 \pm 7,5$  Ma pelo YSG,  $502,92 \pm 7,3$  Ma pelo YDZ e de  $499 \pm 21$  Ma e  $503 \pm 14$  Ma pelo YGC2 $\sigma$ , que representam idades furongianas e miaolingianas. Considerando o acima exposto, considera-se a idade máxima de deposição de  $503 \pm 14$  Ma (Miaolingian), como a detentora de menor erro e maior coerência com dados bioestratigráficos e geocronológicos das unidades verticalmente contíguas.

## 9 Conclusões

A análise geocronológica das idades U-Pb utilizando o método LA-ICP-MS aos zircões detríticos da Formação Aprazível, permitiu concluir que:

- A idade máxima de deposição considerada para a Formação Aprazível foi de  $503 \pm 14$  Ma, o que indica deposição durante o Miaolingiano (Cambriano) para a fase final de implantação da Bacia do Jaibaras;
- Dentre os cinco métodos de cálculo de Idade Máxima de Deposição aqui testados, o método que disponibilizou o resultado com maior confiança e, também, o mais recomendado na literatura foi o *Youngest  $2\sigma$  Grain Cluster (YGC $2\sigma$ )*;
- As áreas fonte para a Formação Aprazível são de idades paleoproterozoicas, neoproterozoicas e cambrianas, sendo elas:
  - Fontes paleoproterozoicas: unidades e rochas que constituem o embasamento da Província Borborema. Considerando o intervalo de idade entre 1621 Ma a 2405 Ma, as áreas fontes podem corresponder ao Complexo Granja, Formação São Joaquim e as unidades Canindé e Independência.
  - Fontes neoproterozoicas: Complexo Tamboril - Santa Quitéria, Unidade Canindé e Independência do Complexo Ceará e Grupo Ubajara;
  - Fontes cambrianas: Formação Parapuí, granitos Mucambo e Meruoca;
- A configuração dos clastos que compõem o arcabouço da Formação Aprazível e, também, sua composição indicam que a Bacia do Jaibaras estava tectonicamente ativa durante a deposição dessa unidade e apresentava um comportamento autofágico, dado pela presença de clastos da própria unidade dentro dos conglomerados.

## 10 Referências Bibliográficas

- Alessandretti, L. 2017. Geocronologia e geoquímica isotópica do Grupo Passa Dois (Permiano) na borda Leste da Bacia do Paraná (estados de Santa Catarina e São Paulo, Brasil). MS Dissertation, Universidade de São Paulo, São Paulo, 292p.
- Almeida, F.F.M, Brito Neves, B.B., Carneiro, C.D.R. 2000. The origin and evolution of the South American Platform. *Earth-Science Reviews*, **50**:77–111.
- Araujo, C.E.G., Cordani, U.G., Basei, M.A., Castro, N.A., Sato, K., Sproesser, W.M. 2012. U–Pb detrital zircon provenance of metasedimentary rocks from the Ceará Central and Médio Coreau Domains, Borborema Province, NE-Brazil: tectonic implications for a long-lived Neoproterozoic active continental margin. *Precambrian Research*, **206**:36–51.
- Araújo, C.E.G., Pinéo, T.R., Caby, R., Costa, F.G., Cavalcante, J.C., Vasconcelos, A.M., Rodrigues, J.B. 2010. Provenance of the Novo Oriente Group, southwestern Ceará Central Domain, Borborema Province (NE-Brazil): a dismembered segment of a magma-poor passive margin or a restricted rift-related basin? *Gondwana Research*, **18**(2–3):497–513.
- Archanjo, C.J., Launeau, P., Hollanda, M.H.B., Macedo, J.W.P., Liu, D. 2009. Scattering of magnetic fabrics in the Cambrian alkaline granite of Meruoca (Ceará state, northeastern Brazil). *Internacional Journal of Earth Sciences*, **98**(8):1793–1807.
- Arthaud, M.H., Caby, R., Fuck, R.A., Dantas, E.L., Parente, C.V. 2008. Geology of the northern Borborema Province, NE Brazil and its correlation with Nigeria, NW africa. *Geological Society, London, Special Publications*, **294**(1): 49–67.
- Assis, A.P., Porto, A.L., Schmitt, R.S., Linol, B., Medeiros, S.R., Martins, F.C., Silva, D.S. 2019. The Ordovician-Silurian tectono-stratigraphic evolution and paleogeography of eastern parnaíba basin, NE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **95**, 102241.
- Barroso, F.R.G. 2012. Fauna de Ediacara na Bacia do Jaibaras, Noroeste do Ceará: A Primeira Ocorrência no Nordeste do Brasil. MS Dissertation, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 87p.
- Brito Neves, B.B. 1998. The Cambro-Ordovician of the Borborem Province. *Boletim IG*, **29**:175-193.
- Brito Neves, B.B., Cordani, U.G. 1991. Tectonic evolution of South-America during the late Proterozoic. *Precambrian Research*, **53**:23-40.
- Brito Neves, B.B., Long, L.L., Kawashita, K., Sial, A.N., Cordani, U.G., Pessoa, R.J.R. 1978. Estudo da geocronologia da faixa costeira pre-cambriana do Nordeste. Unpublished.

CNPq, Recife, p. 14.

- Carter, A., Bristow, C.S. 2000. Detrital zircon geochronology: enhancing the quality of sedimentary source information through improved methodology and combined U-Pb fission-track techniques. *Basin Research*, **12**:47-57.
- Cerri R.I., Warren, L.V., Varejão, F.G., Marconato, A., Luvizotto, G.L., Assine, M.L. 2020. Unraveling the origin of the Parnaíba Basin: testing the rift to sag hypothesis using a multi-proxy provenance analysis. *Journal of South American Earth Sciences*, **101**, 102625.
- Cerri, R. I. 2021. Gênese da tectono-ssequência Jaibaras (Ediacarano-Ordoviciano) e sua herança na sedimentação da sequência Serra Grande (Ordoviciano-Siluriano), borda nordeste da Bacia do Parnaíba. PhD Thesis, Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências, Rio Claro, 149p.
- Cerri, R.I., Warren, L.V., Varejão, F.G., Silva, A.J.C.A., Lana, C., Assine, M.L. 2021. So close and yet so far: U-Pb geochronological constraints of the Jaibaras Rift Basin and the intracratonic Parnaíba Basin in SW. *Gondwana Geological Magazine*, 1-21. Doi:10.1017/S0016756821000236
- Chamani, M.A.C. 2015. Tectônica sinsedimentar no Siluro-Devoniano da Bacia do Parnaíba, Brasil: o papel de grandes estruturas do embasamento na origem e evolução de bacias intracratônicas. PhD Thesis, Universidade de São Paulo, São Paulo, 230p.
- Cliff, R.A., Drewery, S.E., Leeder, M.R. 1991. Sourcelands for the Carboniferous Pennine river system: constraints from sedimentary evidence and U-Pb geochronology using zircon and monazite. In: *Developments in Sedimentary Provenance Studies* (Ed. by A.C. Morton, S.P. Todd, P.D.W. Haughton), *Geological Society of London Special Publication*, **57**:137-159.
- Cordani, U.G., Pimentel, M.M., de Araújo, C.E.G., & Fuck, R.A. 2013. The significance of the Transbrasiliano-Kandi tectonic corridor for the amalgamation of west Gondwana. *Brazilian journal of Geology*, **43**(3):583-597.
- Costa, M.J., Franca, J.B., Lins, C.A.C., Bacchiegga, I.F., Habekost, C.R., Cruz, W.B. 1979. Geologia da Bacia do Jaibaras, Ceará, Piauí e Maranhão: Projeto Jaibaras. Série Geologia No. 14, Seção Geologia Básica No (11), Brasília: DNPM/Brazilian Government, 106 pp.
- Costa, M.J., França, J.D., Lins, C.A.C., Bacchiegga, I.F., Habekost, C.R., Cruz, W.D. 1973. Geologia da Bacia do Jaibaras; Ceará, Piauí e Maranhão. Projeto Jaibaras. DNPM/CPRM. Recife. Relatório final (5 vol.).
- Coutts, D.S., Matthews, W.A., Hubbard, S. M. 2019. Assessment of widely used methods to

- derive depositional ages from detrital zircon populations. *Geoscience Frontiers*, **10**(4): 1421-1435.
- de Araújo, C.E.G., Cordani, U.G., Basei, M.A., Castro, N.A., Sato, K., Sproesser, W.M. 2012a. U–Pb detrital zircon provenance of metasedimentary rocks from the Ceará Central and Médio Coreau Domains, Borborema Province, NE-Brazil: tectonic implications for a long-lived Neoproterozoic active continental margin. *Precambrian Research*, **206**:36–51.
- de Araújo, C.E.G., Costa, F.G., Pinéo, T.R., Cavalcante, J.C., Moura, C.A. 2012b. Geochemistry and  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  zircon ages of granitoids from the southern portion of the Tamboril-Santa Quitéria granitic–migmatitic complex, Ceará Central Domain, Borborema Province (NE Brazil). *Journal of South American Earth Sciences*, **33**:21–33.
- de Araújo, C.E.G., Weinberg, R.F., Cordani, U.G. 2013. Extruding the Borborema Province (NE Brazil): a two-stage Neoproterozoic collision process. *Terra Nova*, **26**:157–68.
- Dickinson, W.R., Gehrels, G.E. 2009. Use of U–Pb ages of detrital zircons to infer maximum depositional ages of strata: a test against a Colorado Plateau Mesozoic database. *Earth and Planetary Science Letters*, **288**:115–25.
- Drewery, S.E, Cliff, R.A., Leeder, M.R. 1987. Provenance of Carboniferous sandstones from U-Pb dating of detrital zircons. *Nature*, **325**:50-53.
- Fetter, A.H., 1999. U-pb and Sm-Nd Geochronological Constraints on the Crustal Framework and Geologic History of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: Implications for the Assembly of Gondwana. PhD Thesis, University of Kansas, Lawrence, 164p.
- Fetter, A.H., Dos Santos, T.J.S., Van Schmus, W.R., Hackspacher, P.C., De Brito Neves, B.B., Arthaud, M.H., Wernick, E. 2003. Evidence for neoproterozoic continental arc magmatism in the Santa Quitéria batholith of Ceará state, NW Borborema Province, NE Brazil: implications for the assembly of west Gondwana. *Gondwana Research*, **6**(2):265–273.
- García, L.C.R. 2016. Estilos estruturais relacionados à tectônica formadora e deformadora da Bacia do Jaibaras, Nordeste do Brasil. MS Dissertation, Universidade de São Paulo, São Paulo, 157p.
- Garcia, M.D.G.M., Parente, C.V., da Silva Filho, W.F., de Almeida, A.R. 2018. Age of magmatic events in the eopaleozoic Jaibaras Basin, NE Brazil: constraints from U-Pb zircon geochronology. *Journal of South American Earth Sciences*, **84**:113–126.
- Garcia, M.G.M., Parente, C.V., Silva Filho, W.F., Almeida, A.R., 2010. Idade do vulcanismo ácido da Formação Parapuí: implicações na estratigrafia da Bacia Eopaleozóica Jaibaras-CE. In: XLV Congresso Brasileiro de Geologia, Belém-PA.

- Gorayeb, P. S. S., Abreu, F. A. M., Correa, J. A. M., Moura, C. A. V. 1988. Relações estratigráficas entre o Granito Meruoca e a sequência Ubajara-Jaibaras. In SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, **35**:2678-2688.
- Gorayeb, P. S. S., Abreu, F. A. M., Hasui, Y. 1993. A tectônica distensiva e a geração de granitos eopaleozóicos no oeste do Ceará. Atas XV Simpósio de Geologia do Nordeste, p.255-257.
- Hartnady, C., Joubert, P., Stowe, C. 1985. Proterozoic crustal evolution in Southwestern Africa. *Episodes*, **8**(4):236-244.
- Hollanda, M.H.B.M., Góes, A.M., Negri, F.A., 2018. Provenance of sandstones in the Parnaíba Basin through detrital zircon geochronology. *Geological Society, London, Special Publications*, **472**(1):181–197.
- Jackson S.E., Pearson N.J., Griffin W.L., Belousova E.A. 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U–Pb zircon geochronology. *Chemical Geology*, **211**:47-69.
- Janikian, L, Almeida, R.P., Galeazzi, C.P., Tamura, L.N., Ardito, J.C., Chamani, M A.C. 2019. Variability of fluvial architecture in a poorly vegetated Earth: Silurian sheet- braided and meandering ancestor river deposits recorded in northeastern Brazil. *Terra Nova*, **32**:187–97.
- Jardim de Sá, E.F. 1994. A Faixa Seridó (Província Borborema, NE do Brasil) e o seu Significado Geodinâmico na Cadeia Brasileira / Pan-Africana. PhD Thesis, Universidade de Brasília, Brasília, 804p.
- Ludwig, K.R. 2003. User's Manual for Isoplot/Ex Version 3.00 e A Geochronology Toolkit for Microsoft Excel, vol. 4. *Berkeley Geochronological Center, Special Publication*.
- Ludwig, K.R., 2008. Isoplot 3.6. *Berkeley Geochronology Center Special Publication*, n.4.
- Mello, Z.F. 1978. Evoluções Finais do Ciclo Geotectônico Brasileiro no Nordeste Oriental. In: 30th Congresso Brasileiro de Geologia. Recife, v.6, 2438–2450.
- Mizusaki, A.M.P., Saracchini, F.E. 1990. Catálogo geral de dados geocronológicos da Petrobrás. Petrobrás/Cenpes, Rio de Janeiro, p. 24 Relatório Interno. Unpublished.
- Morton, A.C. 1985. Heavy minerals in provenance studies. In: *Provenance of arenites* (Ed. By G.G. Zuffa), **148**, p. 249-277.
- Nascimento, R. D. S., Gorayeb, P. S. D. S. 2004. Basaltos da Suíte Parapuí, Gráben Jaibaras, noroeste do Ceará: caracterização, petrografia, geoquímica e química mineral. *Revista Brasileira de Geociências*, **34**(4):459-468.

- Nelson, D.R. 2001 An assessment of the determination of depositional ages for precambrian clastic sedimentary rocks by U-Pb dating of detrital zircons. *Sedimentary Geology*, **141-142**:37-60.
- Novais, F.R.G., Brito Neves, B.D., Kawashita, K. 1979. Reconhecimento cronoestratigráfico na região Noroeste do Ceará. In: SBG, Simpósio de Geologia do Nordeste, v. 9, p. 91-110.
- Oliveira, D.C. 2000. Stratigraphic interplays between igneous and sedimentary events in the early palaeozoic Jaibaras trough (Northeast Brazil). *Revista Brasileira de Geociências*, **30**(3):427-431.
- Oliveira, D.C. 2001. Reavaliação da evolução tectono-magmática do Graben de Jaibaras (nordeste do Brasil). *Acta Geológica Hispánica*, **36**:53-95.
- Oliveira, D.C., Martins, G.M., Branco, R.M.G.C., Castro, D.L. 2001. Um modelo alternativo para a formação da Bacia do Jaibaras: implicações para a evolução final da cadeia Brasiliana/Pan-Africana no noroeste da Província Borborema. *Revista de Geologia*, **14**(1):11 - 21.
- Oliveira, D.C., Mohriak, W.U. 2003. Jaibaras trough: An important element in the early tectonic evolution of the Parnaíba interior sag basin, Northern Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, **20**:351-383.
- Parente, C.V., Silva Filho, W.F., Almeida, A.R. 2004. Bacias do estágio de transição do domínio setentrional da Província Borborema. In Mantesso Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C.D.R., Brito Neves, B.B. *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo, Beca, p. 525-536.
- Pedrosa Junior, N.C. 2015. Interpretação e Modelagem de Dados Geofísicos no Estudo da Evolução Geotectônica do Rife de Jaibaras-NE do Brasil. PhD Thesis, Universidade de Brasília, Brasília, 187p.
- Pedrosa Junior, N.C., Vidotti, R.M., Fuck, R.A., Branco, R.C., de Almeida, A.R., Silva, N.C.V., Braga, L. R. 2017. Architecture of the intracontinental Jaibaras Rift, Brazil, based on geophysical data. *Journal of South American Earth Sciences*, **74**:27-40.
- Pedrosa Junior, N.C., Vidotti, R.M., Fuck, R.A., Oliveira, K.M.L., Branco, R.M.G.C. 2015. Structural framework of the Jaibaras Rift, Brazil, based on geophysical data. *Journal of South American Earth Sciences*, **58**:318-334.
- Quadros, M.L.D.E.S. 1996. Estudo tectono-sedimentar da Bacia do Jaibaras, na região entre as cidades de Pacujá e Jaibaras, noroeste do estado do Ceará. MS Dissertation, Universidade Federal do Pará, Belém, 152p.

- Quadros, M.L.E.S., Abreu, F.A.M., Gorayeb, P.S.S. 1994. Considerações sobre os ambientes deposicionais das Formações Pacujá e Aprazível, Bacia do Jaibas-NW do Ceará. In SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, v.38, p. 240-242.
- Ross, J.B., Ludvigson, G.A., Mööller, A., Gonzalez, L.A., Walker, J., 2017. Stable isotope paleohydrology and chemostratigraphy of the Albian Wayan Formation from the wedge-top depozone, North American Western Interior Basin. *Sciences China Earth Sciences*, **60**(1):44–57.
- Santos, M.E., Carvalho, M.S.S. 2009 Paleontologia das bacias do Parnaíba, Grajaú e São Luís. Rio de Janeiro: Serviço Geológico do Brasil, pp. 212.
- Santos, M.M., Lana, C., Scholz, R., Buick, I., Schmitz, MD., Kamo, S. L., Gerdes, A., Corfu, F., Tapster, S., Lancaster, P., Storey, C.D., Basei, M.A.S., Tohver, E., Alkmim, A. 2017. A new appraisal of Sri Lankan BB zircon as a reference material for LA-ICP-MS U-Pb geochronology and Lu-Hf isotope tracing. *Geostandards and Geoanalytical Research*, **41**(3):335-358.
- Santos, R.V., Oliveira, C.G., Parente, C.V., Garcia, M.D.G.M., Dantas, E.L. 2013. Hydrothermal alteration related to a deep mantle source controlled by a Cambrian intracontinental strike-slip fault: evidence for the Meruoca felsic intrusion associated with the Transbraziliano Lineament, northeastern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **43**:33–41.
- Santos, T.J.S., Fetter, A.H., Hackspacher, P.C., Van Schums, W.R., Nogueira Neto, J.A., 2008. Neoproterozoic tectonic and magmatic episodes in the NW sector of Borborema Province, NE Brazil, during assembly of Western Gondwana. *Journal of South American Sciences*, **25**:271–284.
- Santos, T.J.S., Garcia, M.G.M., Amaral, W.S., Wernick, E., Dantas, E.L., Arthaud, M.H., Cabry, R., Santosh, M., 2009. Relics of eclogite facies assemblages in the Ceara Central Domain, NW Borborema Province, NE Brazil: implications for the assembly of West Gondwana. *Gondwana Research*, **15**:454–470.
- Sial A.N., Figueiredo M.C.H., Long L.E. 1981. Rare-earth element geochemistry of the Meruoca and Mucambo Plutons, Ceará, Northeast Brazil. *Chemical Geology*, **31**:271-283.
- Sláma, J., Košler, J., Condon, D. J., Crowley, J. L., Gerdes, A., Hanchar, J. M., Horswood, M. S. A., Morris, G. A., Nasdala, I., Norberg, N., Schaltegger, U., Schoene, B., Tubrett, M. N., Whitehouse, M. J. 2008. Plešovice zircon - a new natural reference material for U–Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chemical Geology*, **249**(1-2):1-35.

- Takenaka L., Lana C., Scholz R. 2014. Optimization of the in-situ U-Pb age dating method via LA-Quadrupole-ICP-MS with applications to the timing of U-Zr-Mo mineralization in the Poços de Caldas Alkaline Complex, SE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **62**:70-79.
- Tavares Jr., S.S., Gorayeb, P.S.S., Lafon, J.M. 1990. Petrografia e geocronologia Rb/Sr do feixe de diques da borda oeste do Granito de Meruoca (CE). In: 36th Congresso Brasileiro de Geologia, *Expanded Abstracts*, p. 337-338.
- Teixeira, A.L., Gaucher, C., Paim, P.S.G., Fonseca, M.D., Parente, C.V., Silva Filho, W.D., Almeida, A.D. 2004. Bacias do estágio da transição da Plataforma Sul-Americana. In Mantesso Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C.D.R., Brito Neves, B.B. *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo, Beca, p. 487-537.
- van Achterbergh, E. 2001. Data reduction software for LA-ICP-MS. *Laser Ablation-ICP-mass spectrometry in the earth sciences: principles and applications*, p. 239-243.
- Van Schmus W.R., Oliveira E.P., Silva-Filho A.F., Toteu S.F., Penaye J., Guimarães I.P. 2008. Proterozoic links between the Borborema Province, NE Brazil, and the Central African Fold Belt. In: Pankhurst R.J., Trouw R.A.J., Brito Neves B.B., Wit M.J. *West Gondwana: Pre-Cenozoic Correlations Across the South Atlantic Region*, *Geological Society of London, Special Publications*, **294**:69-99.
- Vaz, P.T., Rezende, N.G.A.M., Wanderley Filho, J.R., Travassos, W.S. 2007. Bacia do Parnaíba. *Boletim de Geociências da Petrobras*, **15**:253-63.
- Vermeesch, P. 2012. On the visualisation of detrital age distributions. *Chemical Geology*, **312**:190-94.
- Vermeesch, P. 2021. Maximum depositional age estimation revisited. *Geoscience Frontiers*, **12**(2):843-850.
- Vermeesch, P., 2004, How many grains are needed for a provenance study? *Earth and Planetary Science Letters*, **224**(3-4):441-451.
- Vermeesch, P., Resentini, A., Garzanti, E. 2016. An R package for statistical provenance analysis. *Sedimentary Geology*, **336**:14-25.
- Zhang, X., Pease, V., Skogseid, J., Wohlgemuth-Ueberwasser, C. 2016. Reconstruction of tectonic events on the northern Eurasia margin of the Arctic, from U-Pb detrital zircon provenance investigations of late Paleozoic to Mesozoic sandstones in southern Taimyr Peninsula. *GSA Bulletin*, **128**(1-2):29-46.