Universidade Estadual Paulista

"Júlio de Mesquita Filho"

Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Camila Durães Ferreira dos Santos

Integração de métodos de datação (U-Pb, Traços de Fissão e U-Th/He): Aplicações no Domínio São José do Campestre e Província Mineral de Carajás

Presidente Prudente, SP

Julho de 2026

Camila Durães Ferreira dos Santos

Integração de métodos de datação (U-Pb, Traços de Fissão e U-Th/He): Aplicações no Domínio São José do Campestre e Província Mineral de Carajás

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia de Materiais, área de concentração Caracterização de Materiais, junto ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais (POSMAT) da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho".

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Tello Sáenz

Presidente Prudente, SP

Julho de 2026

S237i

Santos, Camila Durães Ferreira dos
Integração de métodos de datação (U-Pb, traços de fissão e U-Th/He) : aplicações no Domínio São José do Campestre e Província Mineral de Carajás / Camila Durães Ferreira dos Santos. -- Presidente Prudente, 2026
110 p. : il., tabs., fotos, mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente
Orientador: Carlos Alberto Tello Sáenz

1. Apatita. 2. Geocronologia. 3. Termocronologia. 4. Província Borborema. 5. Província Mineral de Carajás. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Presidente Prudente

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE CAMILA DURÃES FERREIRA DOS SANTOS, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS, DA FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA - CÂMPUS DE PRESIDENTE PRUDENTE.

Aos 28 de julho de 2026, às 10h, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de CAMILA DURÃES FERREIRA DOS SANTOS, intitulada "Integração de métodos de datação (U-Pb, Traços de Fissão e UTh/He): Aplicações no Domínio São José do Campestre e Província Mineral de Carajás". A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. CARLOS ALBERTO TELLO SAENZ (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Física / UNESP / Câmpus de Presidente Prudente - FCT, Prof. Dr. TIAGO AMANCIO NOVO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Geologia / Universidade Federal de Minas Gerais, Prof. Dr. DEUBER LINCON DA SILVA AGOSTINI (Participação Virtual) do(a) Departamento de Física / UNESP / Câmpus de Presidente Prudente - FCT, Após a exposição pela mestranda e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, a discente recebeu o conceito final:_ _ _ _Aprovado_ _ _ _ _ . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. CARLOS ALBERTO TELLO SAENZ

Agradecimentos

Agradeço à minha família e ao meu marido, Adriel, pelo apoio, incentivo, compreensão e presença constante ao longo de toda a minha formação acadêmica, sendo fundamentais para a conclusão desta etapa.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Carlos Alberto Tello Sáenz, pela orientação, disponibilidade, confiança e valiosas contribuições científicas durante o desenvolvimento deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil. Processo nº 2023/18307-7. Ao longo da minha formação e do desenvolvimento desta pesquisa, também tive apoio da FAPESP por meio da Bolsa de Iniciação Científica (Processo nº 2022/07601-9), da Bolsa Estágio de Pesquisa no Exterior – BEPE (Processo nº 2024/20042-4) e do Projeto de Pesquisa FAPESP (Processo nº 2020/02464-8), cujo financiamento possibilitou a realização de análises de LA-ICP-MS incorporadas a esta dissertação. Agradeço à Fundação pelo apoio concedido, fundamental para a realização deste trabalho e para minha formação científica. As opiniões, hipóteses e conclusões ou recomendações expressas neste material são de responsabilidade da autora e não necessariamente refletem a visão da FAPESP.

Agradeço ao Prof. Dr. Pieter Vermeesch e ao London Geochronology Centre (University College London) pela recepção, supervisão e apoio durante a realização do projeto BEPE, contribuindo significativamente para minha formação científica.

Aos colegas de laboratório e às minhas amigas Luana, Nyara e Maria Vitória, agradeço pelo convívio acadêmico, pelas trocas de conhecimento, pelo apoio mútuo e pela amizade construída ao longo dessa trajetória, que permanece presente independentemente da proximidade física ou institucional.

À UNESP – Faculdade de Ciências e Tecnologia e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais (POSMAT), agradeço pelo suporte institucional, pela infraestrutura e pelo apoio acadêmico ao longo do mestrado.

Por fim, agradeço também aos meus bichinhos — os gatos Galileia e Jorge e as cachorras Daisy e Elizabeth — pela companhia constante ao longo desse período.

Buscamos para encontrar, e encontramos
para continuar buscando.

Santo Agostinho

Resumo

Este estudo apresenta uma análise geocronológica e termocronológica integrada de apatitas e zircões do Domínio São José do Campestre (Província Borborema) e da Província Mineral de Carajás (Cráton Amazônico). O trabalho estabelece um protocolo metodológico para a aplicação da Tripla Datação (*Triple Dating*) em apatita, integrando os métodos U-Pb, Traços de Fissão (TFLA) e (U-Th)/He, e incorpora análises U-Pb e TFLA em zircão como ferramentas complementares para a investigação da evolução térmica das áreas estudadas. A abordagem considera ainda a influência da seleção dos grãos, da integridade estrutural dos minerais e do tratamento analítico sobre os resultados obtidos. No Domínio São José do Campestre, utilizado como área de controle, as idades U-Pb em apatita variaram entre $569,8 \pm 1,7$ Ma e $538,6 \pm 1,2$ Ma. As idades TFLA registraram episódios de resfriamento cretáceos entre 124 ± 4 Ma e 71 ± 3 Ma, enquanto as idades (U-Th)/He variaram entre $97,2 \pm 5,8$ Ma e $88,8 \pm 2,9$ Ma. A integração desses resultados é compatível com um histórico de resfriamento pós-Orogenia Brasiliana, com possível influência de processos associados à abertura do Oceano Atlântico Sul. Variações intragranulares nas concentrações de urânio e na resposta estrutural das apatitas também indicaram a importância das heterogeneidades composicionais e microestruturais na interpretação dos diferentes cronômetros. Na Província Mineral de Carajás, a aplicação dos métodos em apatitas e zircões revelou maior dispersão analítica e diferentes graus de preservação dos sistemas isotópicos. Os zircões registraram idades U-Pb arqueanas superiores a $2,7$ Ga, enquanto as idades TFLA apresentaram ampla distribuição, com idades centrais entre 443 ± 30 Ma e 1154 ± 178 Ma nas amostras analisadas. O ataque químico aplicado aos zircões mostrou potencial como ferramenta auxiliar de triagem estrutural e de posicionamento dos pontos de ablação, embora seus efeitos sobre as idades e os parâmetros estatísticos tenham variado entre as amostras. Em conjunto, os resultados indicam que a integração de diferentes cronômetros, associada à caracterização microestrutural e à avaliação crítica da qualidade dos grãos, pode contribuir para a interpretação de histórias térmicas complexas e para o aprimoramento da aplicação do protocolo de *Triple Dating*.

Palavras-chave: Apatita. Geocronologia. Termocronologia. Triple Dating. Província Borborema. Província Mineral de Carajás.

Abstract

This study presents an integrated geochronological and thermochronological analysis of apatite and zircon from the São José do Campestre Domain (Borborema Province) and the Carajás Mineral Province (Amazonian Craton). The study establishes a methodological protocol for the application of Triple Dating in apatite, integrating the U-Pb, fission-track (TFLA), and (U-Th)/He methods, and incorporates U-Pb and TFLA analyses in zircon as complementary tools for investigating the thermal evolution of the studied areas. The approach also considers the influence of grain selection, mineral structural integrity, and analytical data treatment on the obtained results. In the São José do Campestre Domain, used as a control area, apatite U-Pb ages ranged from 569.8 ± 1.7 Ma to 538.6 ± 1.2 Ma. TFLA ages recorded Cretaceous cooling episodes between 124 ± 4 Ma and 71 ± 3 Ma, whereas (U-Th)/He ages ranged from 97.2 ± 5.8 Ma to 88.8 ± 2.9 Ma. The integration of these results is consistent with a post-Brasiliano Orogeny cooling history, with possible influence from processes associated with the opening of the South Atlantic Ocean. Intragranular variations in uranium concentrations and in the structural response of apatite also highlighted the importance of compositional and microstructural heterogeneities in the interpretation of the different chronometers. In the Carajás Mineral Province, the application of these methods to apatite and zircon revealed greater analytical dispersion and different degrees of preservation of the isotopic systems. Zircons yielded Archean U-Pb ages older than 2.7 Ga, whereas TFLA ages showed a broad distribution, with central ages ranging from 443 ± 30 Ma to 1154 ± 178 Ma among the analyzed samples. Chemical etching applied to zircon showed potential as an auxiliary tool for structural screening and for guiding the positioning of ablation spots, although its effects on ages and statistical parameters varied among samples.

Overall, the results indicate that the integration of different chronometers, combined with microstructural characterization and critical assessment of grain quality, can contribute to the interpretation of complex thermal histories and to the improvement of the application of the Triple Dating protocol.

Keywords: Apatite. Geochronology. Thermochronology. Triple Dating. Borborema Province. Carajás Mineral Province.

Lista de Figuras

1 Temperaturas de fechamento de diferentes sistemas geotermocronológicos. . . 17
2 Fluxograma da estratégia analítica integrada (U-Pb, TFLA e U-Th/He). 20
3 Mecanismo de formação do traço latente segundo o modelo *Ion Spike*. (A) Passagem do fragmento de fissão; (B) Repulsão Coulombiana mútua; (C) Relaxamento da rede resultando em zona permanente de danos. 23
4 Distribuição de traços de fissão em apatita e detalhes de TINT e TINCLE. . . . 24
5 Mapa Geológico da Província Borborema (Escala 1:1.000.000). 27
6 Encarte geotectônico do Cráton Amazônico com a localização regional da Província Mineral de Carajás. 30
7 Etapas de cominuição e separação de minerais pesados. 33
8 Procedimentos de seleção e encapsulamento de grãos para datação (U-Th)/He. . 36
9 Componentes do sistema de extração de Hélio a laser: (A) Organização das alíquotas e (B) Sistema de extração a laser. 37
10 Espectro Raman da apatita Durango obtido experimentalmente utilizando laser de 633 nm. Os valores indicados correspondem às posições das principais bandas Raman identificadas. 38
11 Instrumentação LA-ICP-MS utilizada para análises *in situ*. 40
12 Sistema de introdução de amostras (*autosampler*) acoplado ao ICP-MS. 42
13 Fluxograma do protocolo de redução de dados e tratamento estatístico. 44
14 Interface operacional do pacote computacional *KJ*. 45
15 Imagens de catodoluminescência (CL) de apatitas do Domínio SJC, amostras (A) CEBP035, (B) CEBP321 e (C) BJ19C. 49
16 Imagens de catodoluminescência (CL) de zircões da Província Carajás, amostras (A) C16 e (B) C23. 49
17 Diagramas de concórdia Wetherill (U-Pb) para as amostras do Domínio SJC: (A) BJ19C ($569,8 \pm 1,7$ Ma); (B) CEBP-035 ($538,6 \pm 1,2$ Ma); (C) CEBP-321 ($551,1 \pm 1,2$ Ma). A escala de cores indica a concentração de Pb radiogênico (ppm). 51
18 Efeito da correção de Pb comum em diagramas Wetherill da amostra C16. (A) com correção e (B) sem correção de Pb comum. 52
19 Efeito da correção de Pb comum em diagramas Wetherill da amostra C01. (A) com correção e (B) sem correção de Pb comum. 53
20 Efeito da correção de Pb comum em diagramas Wetherill da amostra C18. (A) com correção e (B) sem correção de Pb comum. 53
21 Diagramas de concórdia de Wetherill (U–Pb) com linhas de discórdia e idades de interseção superior para as amostras de zircão C16 (A, B), C20 (C, D) e C23 (E, F). Coluna da esquerda: grãos não atacados; coluna da direita: grãos atacados. 56

22 Distribuição de traços de fissão em apatitas do Domínio SJC após ataque químico. (A) CEBP035; (B) BJ19C; (C) CEBP321. 57
23 *Radial plot* de idades TFLA e concentração de Urânio em apatita — Amostra C16. 58
24 *Radial plots* de idades TFLA e concentração de Urânio em apatita — (A) Amostra C02 e (B) Amostra C01. 59
25 *Radial plots* de idades TFLA e concentração de Urânio em zircão — (A) Amostra C16 e (B) Amostra E01. 60
26 Fotomicrografias ópticas de grãos de apatita. (A) Grão BJ19C-G16 com traços homogêneos. (B) Grão CEBP035-G10 com zoneamento de traços e pontos alvos de U. (C, D) Grãos A e B pós-LA-ICP-MS destacando os spots de ablação. . . 63
27 Caracterização multianalítica da apatita CEBP035-G01. (A) Imagem de CL pré-ablação exibindo zoneamento interno primário. (B) Fotomicrografia óptica pós-ablação indicando os pontos de LA-ICP-MS. (C) Mapa de FWHM de Raman destacando a deformação cristalina no núcleo. (D) Mapa de intensidade de Raman mostrando a ordem estrutural da superfície. 65

Lista de Tabelas

1 Condições experimentais de montagem e ataque químico para revelação de traços de fissão. 35
2 Parâmetros espectroscópicos Raman da amostra CEBP035 e do padrão Durango. 48
3 Dados analíticos de U–Pb em apatita — Província Borborema. 50
4 Síntese dos resultados isotópicos de U–Pb em zircão comparando a dispersão do modelo de população equivalente ($MSWD_{conc}$) com o ajuste da regressão linear ($MSWD_{reta}$). 55
5 Síntese dos resultados de Traços de Fissão em zircão (TFLA) — Província Mineral de Carajás. 60
6 Resultados de datação (U-Th)/He em apatita — Domínio São José do Campestre. 61
7 Resultados de datação (U-Th)/He em apatita — Província Mineral de Carajás. . 61
8 Dados analíticos de LA-ICP-MS combinados e parâmetros de traços de fissão para grãos de apatita da amostra BJ19C. 64
9 Dados analíticos de LA-ICP-MS combinados e densidade de traços de fissão (ρ_s) para grãos de apatita da amostra CEBP035. 64
10 Comparação de razões isotópicas brutas (Amostra C16): Protocolo Interno vs. KJ. 68

Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos

BEPE Bolsa de Estágio de Pesquisa no Exterior

CL Catodoluminescência

CPS *Counts per Second* (Contagens por Segundo)

DETRAN Grupo de Pesquisa em Detectores de Traços Nucleares

DSJC Domínio São José do Campestre

ETR Elementos Terras Raras

FAPESP Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo

FCT Faculdade de Ciências e Tecnologia

F_T Fator de Correção de Ejeção Alfa

FWHM *Full Width at Half Maximum* (Largura Total à Meia Altura)

ICP-MS *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*

IOCG *Iron Oxide Copper Gold* (Óxido de Ferro-Cobre-Ouro)

KJ Pacote computacional para redução e processamento de dados LA-ICP-MS

LA-ICP-MS *Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*

LGC *London Geochronology Centre*

MEV Microscopia Eletrônica de Varredura

MSWD *Mean Square of Weighted Deviates* (Média dos Quadrados dos Desvios Ponderados)

NIST *National Institute of Standards and Technology*

PAZ *Partial Annealing Zone* (Zona de Recozimento Parcial)

Pb_c Chumbo comum (não radiogênico)

PFA *Perfluoroalkoxy*

PMC Província Mineral de Carajás

POSMAT Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais

PRZ *Partial Retention Zone* (Zona de Retenção Parcial)

RDAAM *Radiation Damage Accumulation and Annealing Model* (Modelo de Acumulação e Recozimento de Danos por Radiação)

SRM *Standard Reference Material* (Material de Referência Padrão)

T_c Temperatura de fechamento

TFLA Traços de Fissão por Laser Ablation

TINCLE *Track-in-Cleavage* (Traço confinado revelado por clivagem ou fratura)

TINT *Track-in-Track* (Traço confinado revelado pela interseção com outro traço)

TRA *Time Resolved Analysis*

UCL *University College London*

UnB Universidade de Brasília

UNESP Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"

(U-Th)/He Método Urânio-Tório-Hélio

U-Pb Método Urânio-Chumbo

Sumário

Lista de Figuras **9**

Lista de Tabelas **10**

Lista de Abreviaturas, Siglas e Símbolos **11**

1 INTRODUÇÃO **15**
1.1 DESAFIOS DA INTEGRAÇÃO METODOLÓGICA 18
1.2 OBJETIVOS 19

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA **20**
2.1 O MINERAL APATITA 21
2.2 O MÉTODO U-Pb 22
2.3 O MÉTODO DE TRAÇOS DE FISSÃO POR LASER ABLATION (TFLA) . . 23
2.4 O MÉTODO (U-Th)/He EM APATITA 23
2.5 O ZIRCÃO COMO MINERAL DE REFERÊNCIA TERMOCRONOLÓGICA 25

3 CONTEXTO GEOLÓGICO **26**
3.1 ÁREA DE CONTROLE: DOMÍNIO SÃO JOSÉ DO CAMPESTRE (RN/PB) . 26
3.2 Descrição e Contexto Geológico das Amostras do Domínio São José do Campestre 27
3.3 ÁREA DE APLICAÇÃO: PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS 29
3.4 Descrição e Contexto Geológico das Amostras de Carajás 31

4 MATERIAIS E MÉTODOS **32**
4.1 SEPARAÇÃO MINERAL E TRIAGEM FÍSICA 33
4.2 PREPARAÇÃO E MONTAGEM DE AMOSTRAS 34
4.2.1 Montagem e Ataque Químico (Seções Polidas) 34
4.2.2 Seleção para (U-Th)/He em Apatita (Grãos Inteiros) 35
4.3 Caracterização Mineralógica e Estratégia de Amostragem 37
4.3.1 Espectroscopia Micro-Raman 37
4.3.2 Microscopia Eletrônica (MEV) e Catodoluminescência (CL) 38
4.3.3 Seleção de *Spots* para LA-ICP-MS e Critérios Ópticos 39
4.4 ANÁLISES ISOTÓPICAS E TERMOCRONOLÓGICAS 39
4.4.1 Geocronologia U-Pb e Traços de Fissão (LA-ICP-MS) 39
4.4.2 Termocronologia (U-Th)/He (Extração de Gás e ICP-MS) 41
4.5 REDUÇÃO DE DADOS: LA-ICP-MS (U-Pb e Traços de Fissão) 42
4.5.1 Protocolo Interno (Automação Python + Excel) 42
4.5.2 Validação Cruzada: O Pacote KJ (Julia) 45
4.5.3 Contexto de Aplicação e Desenvolvimento (BEPE) 46

4.6 REDUÇÃO DE DADOS: (U-Th)/He 46

5 RESULTADOS **47**
5.1 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA 47
5.1.1 Espectroscopia Micro-Raman 47
5.1.2 Análise por Catodoluminescência (CL) 48
5.2 GEOCRONOLOGIA U-Pb 49
5.2.1 U-Pb em Apatita 49
5.2.2 U-Pb em Zircão 54
5.3 TERMOCRONOLOGIA TFLA e (U-Th)/He 57
5.3.1 TFLA em Apatita 57
5.3.2 TFLA em Zircão 59
5.3.3 (U-Th)/He em Apatita 60
5.4 Controles Microquímicos e Estruturais nas Idades TFLA 62

6 DISCUSSÃO INTEGRADA E SÍNTESE DOS RESULTADOS **65**
6.1 Evolução Térmica Regional: Domínio São José do Campestre 66
6.2 Desafios Analíticos e Aplicação na Província Mineral de Carajás 67
6.3 Validação e Aprimoramento do Workflow de Redução de Dados 68

7 CONCLUSÕES **69**

Referências **71**

A Dados analíticos U–Pb **78**
A.1 Apatita – Domínio São José do Campestre 78
A.2 Apatita – Província Mineral de Carajás 84
A.3 Zircão – Província Mineral de Carajás 89
A.3.1 Grãos atacados 89
A.3.2 Grãos não atacados 92

B Dados analíticos de Traços de Fissão por Laser Ablation **96**
B.1 Apatita – Domínio São José do Campestre 96
B.2 Apatita – Província Mineral de Carajás 102
B.3 Zircão – Província Mineral de Carajás 106

1 INTRODUÇÃO

As rochas crustais atuam como arquivos geológicos que preservam registros fundamentais sobre a evolução térmica e cronológica da Terra. A recuperação dessas informações — que abrangem desde a cristalização magmática em profundidade até a exumação das rochas em direção à superfície — é viabilizada pela presença de minerais acessórios, como a apatita e o zircão, que incorporam traços de urânio como impurezas em sua estrutura cristalina (Price and Walker, 1963; Nasdala et al., 2001; Chew and Donelick, 2012; Cogné et al., 2020). O isótopo mais abundante, ^{238}U, sofre processos simultâneos de desintegração radioativa: a fissão espontânea, que gera danos lineares na rede cristalina (traços de fissão) (Gleadow and Seiler, 2014), e o decaimento alfa, que produz isótopos radiogênicos (como o chumbo) e partículas alfa (núcleos de hélio).

Esses produtos de decaimento constituem a base física para os três principais métodos de datação abordados nesta pesquisa: o método U-Pb, o método Traços de Fissão por Laser Ablation (TFLA) e o método (U-Th)/He (Vermeesch, 2017; Malusà and Fitzgerald, 2019).

O método U-Pb é um geocronômetro de alta temperatura. No zircão, sua alta temperatura de fechamento ($T_c \approx 900°C$) data tipicamente a cristalização do magma ou eventos metamórficos de alto grau (Schoene and Bowring, 2007). Na apatita, a T_c mais baixa (450–550°C) pode registrar o resfriamento através de temperaturas da crosta média (Chamberlain and Bowring, 2000).

O Método de Traços de Fissão, proposto primeiramente por Price and Walker (1963), utiliza trilhas de danos resultantes da fissão espontânea do ^{238}U. Essas trilhas representam defeitos lineares na rede cristalina do mineral, cujo estudo é central para o campo da cristalografia. As idades FT registram o tempo desde que um mineral resfriou abaixo de sua zona de recozimento parcial. A apatita ($T_c \approx 110 \pm 10°C$) é sensível a histórias térmicas da crosta superior, enquanto o zircão ($T_c \approx 240 \pm 40°C$) registra o resfriamento da crosta média (Malusà and Fitzgerald, 2019; Gleadow and Seiler, 2014).

O método (U-Th)/He é um termocronômetro de baixa temperatura baseado no acúmulo de ^{4}He produzido pelo decaimento de U e Th (Green et al., 2006; Zeitler et al., 1987). Na

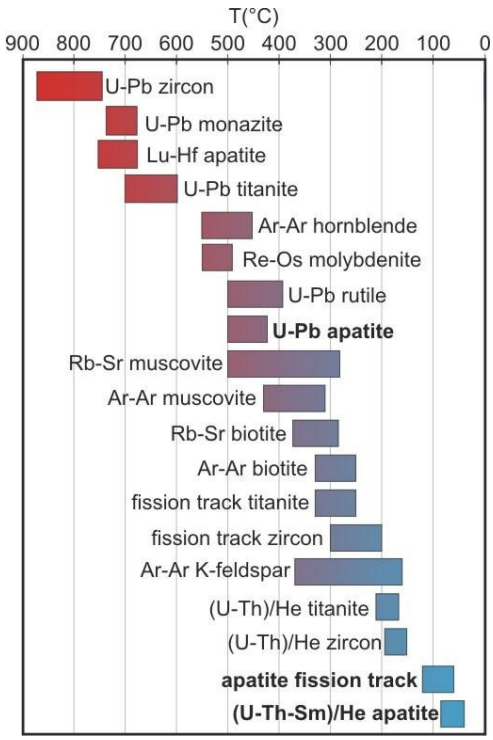
apatita, sua temperatura de fechamento muito baixa ($T_c \approx 70 \pm 10°C$) a torna ideal para rastrear os estágios finais de exumação e processos próximos à superfície (Reiners et al., 2005; Flowers et al., 2023; Siqueira-Ribeiro et al., 2019). Para os cálculos de idade, aplica-se uma correção para a ejeção alfa, expressa pelo fator F_T. Este fator considera a geometria do grão e a distribuição espacial dos emissores alfa, corrigindo a perda parcial de ^{4}He nas bordas do cristal (Farley et al., 1996; Farley, 2002; Flowers et al., 2023). A aplicação do F_T permite corrigir parcialmente esse efeito, contribuindo para que as idades obtidas reflitam de forma mais adequada a retenção efetiva de hélio e permitindo a comparação entre grãos de diferentes tamanhos e formas. (Ketcham et al., 2011, 2013; Zeigler et al., 2024).

Nesse contexto, a Geocronologia e a Termocronologia surgem como disciplinas complementares. Enquanto a Geocronologia tradicional foca na determinação da idade de formação ou cristalização de um mineral (fechamento do sistema isotópico em altas temperaturas), a Termocronologia estuda a trajetória de resfriamento da rocha ao longo do tempo (Ganguly, 2021). Esse campo fundamenta-se no conceito de "temperatura de fechamento", onde diferentes sistemas isotópicos e minerais acessórios tornam-se "relógios" sensíveis a faixas térmicas distintas (Figura 1). A integração de múltiplas técnicas no mesmo registro mineral permite a construção de trajetórias tempo-temperatura ($t - T$) detalhadas, essenciais para compreender processos como o soerguimento de cadeias de montanhas e a evolução de bacias sedimentares (Chew et al., 2014).

Atualmente, a técnica de Espectrometria de Massas com Plasma Indutivamente Acoplado e Ablação a Laser (LA-ICP-MS) representa um marco analítico ao permitir a coleta simultânea de dados cronológicos (U-Pb) e termocronológicos (Traços de Fissão) em uma única análise. Entretanto, a confiabilidade desses dados vai além da precisão do equipamento; ela depende intrinsecamente da integridade da rede cristalina do mineral. Danos acumulados por radiação e variações na composição química criam zonas de instabilidade no cristal. Essas irregularidades resultam em uma resposta heterogênea ao ataque químico — etapa essencial para revelar os traços de fissão —, gerando anisotropias de dissolução que podem levar a interpretações equivocadas sobre a história térmica da rocha (Donelick et al., 2005).

Todavia, para a apatita, a literatura ainda carece de protocolos operacionais que correlacionem a seleção visual de grãos com a eficiência dessas datações integradas. A implementação

Figura 1 – Temperaturas de fechamento de diferentes sistemas geotermocronológicos.



Fonte: Adaptado de Carlson (2011) *apud* Döpke (2017).

de uma rotina que combine múltiplos termocronômetros em um único mineral exige, portanto, uma validação rigorosa dos critérios de escolha do material a ser analisado.

Nesse sentido, o presente trabalho busca avaliar a integração dos métodos U-Pb, Traços de Fissão e (U-Th)/He em apatitas, investigando a aplicabilidade de uma abordagem de *Triple Dating*. Utilizando amostras do Domínio Tectônico São José do Campestre como área de controle, esta pesquisa avalia o uso de critérios de seleção baseados em microscopia óptica como etapa de controle de qualidade para a aplicação conjunta desses cronômetros.

Além disso, integram-se resultados obtidos durante estágio de pesquisa no exterior (BEPE/FAPESP), realizado na University College London (UCL), sob supervisão do Prof. Dr. Pieter Vermeesch. Durante esse período, a abordagem de *Triple Dating* foi aplicada a apatitas da Província Mineral de Carajás, enquanto análises U-Pb e TFLA foram realizadas em zircões da mesma província. Esse conjunto de dados permite avaliar o comportamento dos diferentes métodos em amostras com histórias térmicas e características microestruturais mais complexas, possibilitando a comparação com os resultados obtidos nas amostras do Domínio São José do

Campestre.

Dessa forma, busca-se avaliar em que medida a integração dessas técnicas pode contribuir para a interpretação de trajetórias tempo-temperatura ($t-T$), bem como identificar limitações analíticas relacionadas à seleção dos grãos, à integridade da rede cristalina e ao tratamento dos dados. Os resultados obtidos também fornecem subsídios para o aprimoramento da aplicação integrada dessas técnicas no Grupo de Pesquisa em Detectores de Traços Nucleares (DETRAN).

1.1 DESAFIOS DA INTEGRAÇÃO METODOLÓGICA

Apesar dos avanços analíticos proporcionados pela técnica de LA-ICP-MS, que permitiu a automação e o aumento exponencial na aquisição de dados geocronológicos (Hasebe et al., 2004; Chew et al., 2014), a implementação efetiva da datação simultânea em uma rotina laboratorial impõe desafios operacionais significativos. A literatura aponta que a precisão dessas análises não depende apenas da capacidade instrumental, mas é criticamente afetada pelas propriedades cristaloquímicas do mineral (Chew and Donelick, 2012).

No caso específico da apatita, o principal obstáculo para a integração U-Pb e Traços de Fissão reside na influência da composição química e dos danos de radiação acumulados. Estudos demonstram que a solubilidade do cristal durante o ataque químico — etapa mandatória para a revelação dos traços — é anisotrópica e varia conforme o teor de halogênios (F, Cl) e o grau de metamictização (Donelick et al., 2005; Barbarand et al., 2003). Além disso, a apatita frequentemente incorpora quantidades significativas de Pb comum (Pb_c) não-radiogênico em sua estrutura, o que exige correções complexas para a obtenção de idades U-Pb confiáveis, diferentemente do zircão que costuma ser livre de Pb_c (Chew and Donelick, 2012).

Portanto, a questão central que norteia este trabalho foca na viabilidade técnica de mitigar esses efeitos de matriz utilizando protocolos de preparação acessíveis. Embora abordagens como mapeamento Raman e Catodoluminescência (CL) grão a grão sejam eficazes para descartar cristais alterados (Resende et al., 2019), elas tornam a rotina analítica lenta e onerosa.

A premissa avaliada nesta pesquisa é que a seleção criteriosa dos grãos por microscopia óptica pode atuar como uma etapa inicial de controle de qualidade para a aplicação integrada

dos métodos. Ao identificar visualmente áreas com densidade representativa de traços fósseis e selecionar superfícies polidas livres de inclusões e fraturas, busca-se reduzir a influência de heterogeneidades que possam comprometer as análises U-Pb e TFLA.

Nesse contexto, o desafio consiste em avaliar em que medida esse protocolo de seleção visual permite obter, no mesmo conjunto de grãos, informações geocronológicas e termocronológicas consistentes. A comparação entre os diferentes métodos permite também identificar as limitações da abordagem e os casos em que caracterizações microestruturais adicionais se tornam necessárias.

1.2 OBJETIVOS

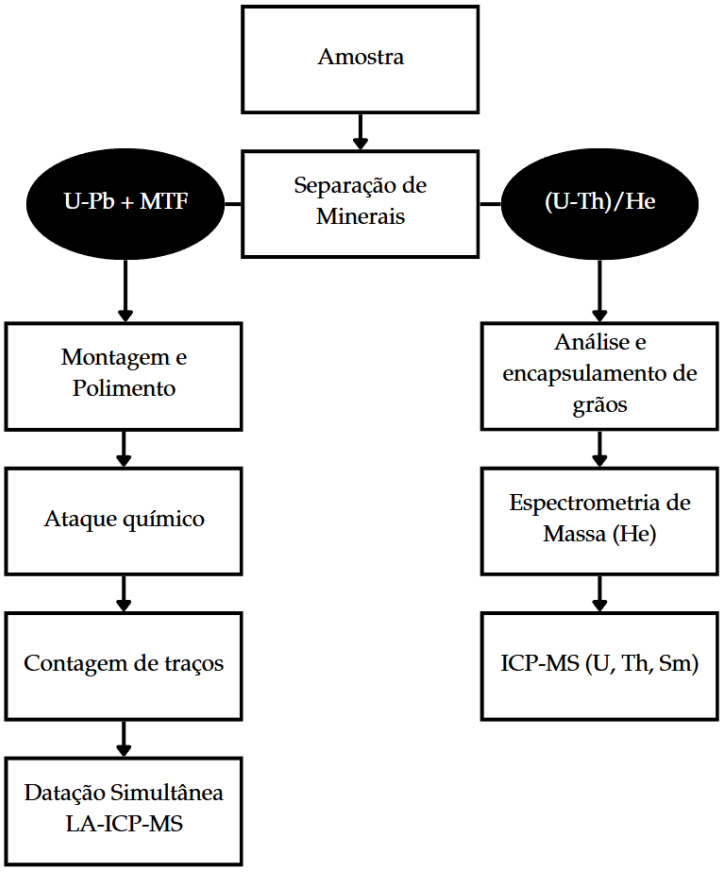
O objetivo geral deste trabalho é estabelecer e avaliar um protocolo metodológico para a aplicação integrada da Tripla Datação (*Triple Dating*) em apatita, combinando a geocronologia U-Pb com a termocronologia de Traços de Fissão e (U-Th)/He. Complementarmente, análises U-Pb e TFLA em zircão são utilizadas para ampliar a investigação geocronológica e termocronológica na Província Mineral de Carajás. Busca-se investigar a aplicabilidade dessas abordagens em diferentes contextos geológicos e avaliar a influência da seleção dos grãos, da integridade estrutural dos minerais e do tratamento analítico sobre os resultados obtidos.

Os objetivos específicos são:

- Estabelecer critérios ópticos de seleção e preparação de grãos de apatita, priorizando a identificação de superfícies polidas e áreas com densidade representativa de traços, visando reduzir a influência de heterogeneidades na aplicação integrada dos métodos;
- Aplicar e avaliar o protocolo de seleção visual em apatitas do Domínio São José do Campestre, utilizado como área de controle, por meio da obtenção de idades U-Pb, TFLA e U-Th/He;
- Avaliar a reprodutibilidade e a precisão analítica por meio da comparação dos resultados com materiais de referência internacionais;

- Realizar um estudo de caso na Província Mineral de Carajás, desenvolvido durante o estágio BEPE/UCL, aplicando a abordagem de *Triple Dating* em apatitas e os métodos U-Pb e TFLA em zircões, a fim de avaliar o comportamento desses sistemas em um contexto geológico complexo;
- Integrar os dados geocronológicos e termocronológicos obtidos para discutir as trajetórias tempo-temperatura ($t - T$) e a evolução térmica das áreas estudadas.

Figura 2 – Fluxograma da estratégia analítica integrada (U-Pb, TFLA e U-Th/He).



Fonte: Elaborada pela autora.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A reconstrução da evolução térmica de províncias geológicas fundamenta-se na compreensão dos mecanismos físicos de decaimento radioativo e na resposta dos minerais às variações de temperatura. Para a aplicação integrada de geocronômetros com sensibilidades distintas, é

imprescindível dominar as propriedades intrínsecas do material analisado. A apatita, devido à sua complexidade cristaloquímica, comporta-se como um sistema dinâmico onde a composição elementar influencia diretamente a retenção isotópica e a estabilidade dos danos de radiação.

Nesse contexto, a validade das idades obtidas não depende apenas da precisão analítica, mas do entendimento profundo dos fenômenos de difusão, *annealing* e das correções necessárias para efeitos de matriz e Pb comum nos sistemas U-Pb, Traços de Fissão e (U-Th)/He (Tello, 1998; Tello et al., 2006; Resende, 2015). Enquanto os dois primeiros métodos registram processos de alta a média temperatura e danos na rede cristalina, o sistema (U-Th)/He atua como um termocronômetro de baixíssima temperatura, sendo extremamente sensível ao acúmulo e à difusão de hélio (^{4}He) gerado pelo decaimento radioativo de U e Th. A integração desses três cronômetros no mesmo mineral permite rastrear a história exumacional de uma rocha, desde seu resfriamento na crosta média até sua chegada em níveis próximos à superfície.

2.1 O MINERAL APATITA

A apatita constitui o mineral de fosfato mais abundante na crosta terrestre, desempenhando um papel duplo e fundamental como acessório onipresente na geologia e biomaterial essencial para a vida. Sob a denominação genérica de "apatita", agrupa-se uma série de minerais isomorfos com a fórmula química geral $A_5(XO_4)_3Z$, onde em A ocupa-se majoritariamente Cálcio (Ca^{2+}), em X o grupo fosfato (PO_4^{3-}), e em Z acomoda-se ânions monovalentes. Essa variação composicional determina as três variedades principais e suas aplicações: a Hidroxiapatita ($Ca_5(PO_4)_3OH$) é a variante biológica que compõe a estrutura óssea e o esmalte dentário dos vertebrados; a Fluorapatita ($Ca_5(PO_4)_3F$) é a forma mais estável e comum no registro geológico; e a Clorapatita ($Ca_5(PO_4)_3Cl$) ocorre em ambientes específicos associados a fluidos hidrotermais (Kohn, 2003).

Para a geocronologia, a Fluorapatita destaca-se por sua robustez e flexibilidade estrutural, que permite a incorporação de actinídeos como Urânio (U^{4+}) e Tório (Th^{4+}) em substituição ao Cálcio. Esta arquitetura molecular, caracterizada pelo sistema hexagonal (grupo espacial $P6_3/m$), funciona como um depósito geoquímico natural, permitindo concentrações de Urânio que variam

tipicamente entre 1 e 100 ppm. No entanto, essa variabilidade química, especialmente a razão entre Flúor e Cloro, gera o chamado efeito de matriz. Este fenômeno impõe desafios como a anisotropia de dissolução durante o ataque químico para revelação de traços de fissão, onde a taxa de corrosão varia conforme a orientação cristalográfica e a química do grão, além de influenciar o fracionamento isotópico durante a ablação por LA-ICP-MS. Portanto, a compreensão dessas propriedades justifica a necessidade de protocolos de seleção (Piccoli and Candela, 2002; Barbarand et al., 2003; Donelick et al., 2005).

2.2 O MÉTODO U-Pb

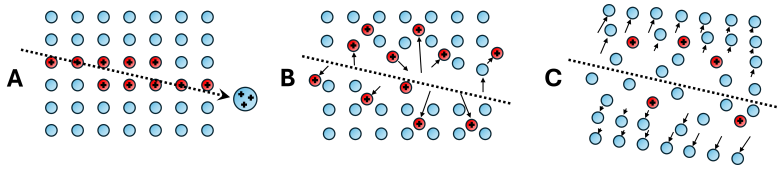
A datação U-Pb baseia-se nas cadeias de decaimento do $^{238}U \rightarrow ^{206}Pb$ e $^{235}U \rightarrow ^{207}Pb$. Enquanto no zircão este método registra majoritariamente a cristalização magmática, na apatita ele atua como um termocronômetro de média temperatura (Allègre, 2008). O conceito de temperatura de fechamento (T_c) é central nesta aplicação, definindo o momento em que o sistema cessa a perda de isótopos por difusão térmica. Para a apatita, a T_c situa-se entre 350°C e 550°C (Cherniak et al., 1991), posicionando o método estrategicamente entre o U-Pb em zircão (> 900°C) e métodos de baixa temperatura. Consequentemente, em terrenos com histórias térmicas complexas, como Carajás, a apatita pode registrar idades de resfriamento ou reaquecimento metamórfico significativamente mais jovens que a idade de formação da rocha.

O maior desafio analítico neste sistema é a presença de Pb comum (Pb_c), que, ao contrário do zircão, é incorporado pela apatita durante sua cristalização. A presença deste componente não-radiogênico mascara a idade real, exigindo estratégias de correção. Embora a medição do ^{204}Pb seja uma opção, as interferências isobáricas de Mercúrio (^{204}Hg) no LA-ICP-MS tornam essa via imprecisa. Por isso, este trabalho utiliza o Método da Isócrona no diagrama de Tera-Wasserburg ($^{207}Pb/^{206}Pb$ vs $^{238}U/^{206}Pb$). Ao plotar múltiplos grãos, define-se uma linha de mistura entre o componente comum inicial e o radiogênico puro, permitindo obter a idade pela interseção com a curva de Concórdia e eliminando matematicamente a influência do Pb_c.

2.3 O MÉTODO DE TRAÇOS DE FISSÃO POR LASER ABLATION (TFLA)

O Método de Traços de Fissão por Laser Ablation fundamenta-se na acumulação de danos lineares causados pela fissão espontânea do ^{238}U. Este evento violento fragmenta o núcleo em nuclídeos pesados que, ao percorrerem a rede cristalina, geram tubos de danos contínuos conhecidos como traços latentes, com cerca de 16μm de comprimento. Para torná-los visíveis ao microscópio óptico, aplica-se um ataque químico seletivo que dissolve a região desordenada do traço (Gleadow and Seiler, 2014; Negrão, 2007). A idade é determinada pela razão entre a densidade de traços fósseis acumulados e a concentração de Urânio atual, medida via LA-ICP-MS.

Figura 3 – Mecanismo de formação do traço latente segundo o modelo *Ion Spike*. (A) Passagem do fragmento de fissão; (B) Repulsão Coulombiana mútua; (C) Relaxamento da rede resultando em zona permanente de danos.



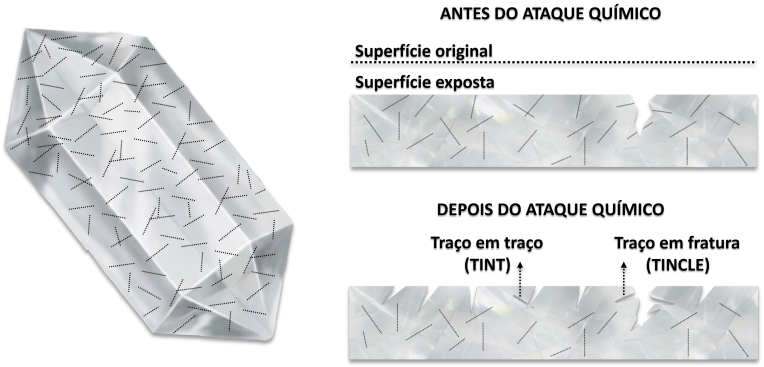
Fonte: Modificado pela autora a partir de Wagner and Van den Haute (1992).

A instabilidade térmica destes traços é o que confere ao método sua característica termocronológica. O processo de recozimento (*annealing*) promove a cicatrização dos danos em temperaturas elevadas, encurtando os traços até seu desaparecimento total. Definem-se assim três zonas: a Zona de Total Recozimento ($> 120°$C), onde o relógio é zerado; a Zona de Recozimento Parcial (PAZ, 60°C–120°C), onde a distribuição de comprimentos revela a história térmica; e a Zona de Retenção Total ($< 60°$C).

2.4 O MÉTODO (U-Th)/He EM APATITA

Complementando a análise termocronológica de baixa temperatura, o método (U-Th)/He baseia-se na acumulação de núcleos de Hélio (^4He) provenientes do decaimento radioativo das séries do ^{238}U, ^{235}U e ^{232}Th, além do decaimento por captura eletrônica do ^{147}Sm (Farley, 2002).

Figura 4 – Distribuição de traços de fissão em apatita e detalhes de TINT e TINCLE.



Fonte: Elaborado pela autora.

Por ser um gás nobre com raio atômico pequeno, o hélio não estabelece ligações químicas com a rede cristalina da apatita, o que o torna altamente móvel e extremamente sensível a variações térmicas. Em altas temperaturas, o hélio produzido é prontamente perdido por difusão para o meio externo; à medida que o mineral resfria, a taxa de difusão diminui até que o hélio passe a ser retido permanentemente no cristal.

A janela de temperatura na qual o hélio é parcialmente retido é denominada Zona de Retenção Parcial (PRZ - *Partial Retention Zone*), situada tipicamente entre 40°C e 80°C para a apatita. Essa característica torna o método (U-Th)/He uma ferramenta única para o estudo de processos crustais superficiais, como a evolução do relevo, taxas de denudação e a exumação final de blocos tectônicos (Wolf et al., 1998). A integração deste sistema com o U-Pb e Traços de Fissão permite construir trajetórias tempo-temperatura ($t-T$) contínuas, cobrindo desde o resfriamento na crosta média até a exposição em superfície.

No entanto, a precisão da idade (U-Th)/He exige correções físicas importantes, como a Correção de Retenção Alfa (F_T). Como as partículas alfa (núcleos de ^{4}He) são emitidas com alta energia cinética, elas percorrem uma distância antes de repousarem. Se o decaimento ocorre próximo à borda do cristal, a partícula pode ser ejetada para fora do mineral, resultando em uma perda de hélio puramente física e não térmica. A correção proposta por Farley et al. (1996) é

essencial para compensar essa perda baseando-se na geometria e na razão área/volume do grão analisado.

Além disso, estudos recentes demonstram que a estabilidade do hélio na apatita também é influenciada pela densidade de danos de radiação acumulados, onde cristais mais ricos em urânio e mais antigos tendem a reter hélio em temperaturas ligeiramente superiores devido ao aprisionamento dos átomos de gás em defeitos da rede (Flowers et al., 2023). Portanto, o uso deste método em conjunto com os demais geocronômetros fornece uma resolução térmica sem precedentes para a interpretação da história geológica da Província Mineral de Carajás e do Domínio São José do Campestre.

2.5 O ZIRCÃO COMO MINERAL DE REFERÊNCIA TERMOCRONOLÓGICA

Embora o foco seja a apatita, o zircão ($ZrSiO_4$) atua como o referencial de alta temperatura. Sendo um mineral ultra-refratário, sua estrutura retém isótopos de chumbo mesmo sob condições extremas, com T_c superior a 900°C. Essa robustez permite que o zircão registre a cristalização primária ou o pico metamórfico, preservando a memória térmica que seria apagada em minerais menos resistentes.

A aplicação do método TFLA em zircão (Tello et al., 2012) fornece um contraste importante, pois sua zona de recozimento de traços situa-se em patamares térmicos superiores aos da apatita ($\sim$ 210°C a 250°C). A utilização conjunta de ambos os minerais permite a chamada datação multimineral: enquanto o zircão define o início da história geológica, a apatita detalha os estágios finais de resfriamento e exumação. Na Província Mineral de Carajás, os dados de zircão servem como âncoras geocronológicas, permitindo distinguir se idades mais jovens na apatita refletem eventos geológicos reais de resfriamento lento ou reabertura do sistema isotópico por eventos tectono-térmicos posteriores.

3 CONTEXTO GEOLÓGICO

O primeiro cenário, o Domínio São José do Campestre, na Província Borborema, atua como uma área de controle. A presença de corpos plutônicos bem preservados e um embasamento estável oferece as condições ideais para testar a consistência do método de seleção visual de grãos. O segundo cenário, a Província Mineral de Carajás, no Cráton Amazônico, representa um ambiente de alta complexidade tectônica e metalogenética.

3.1 ÁREA DE CONTROLE: DOMÍNIO SÃO JOSÉ DO CAMPESTRE (RN/PB)

O Domínio São José do Campestre (DSJC) está inserido na Província Borborema, um complexo mosaico de cinturões orogênicos e maciços antigos no Nordeste do Brasil, estruturado principalmente durante a Orogênese Brasiliana (Neoproterozoico, $\sim$ 600 Ma). O DSJC integra o Domínio Rio Grande do Norte (RGN) e localiza-se em sua porção oriental, sendo delimitado por importantes zonas de cisalhamento regionais.

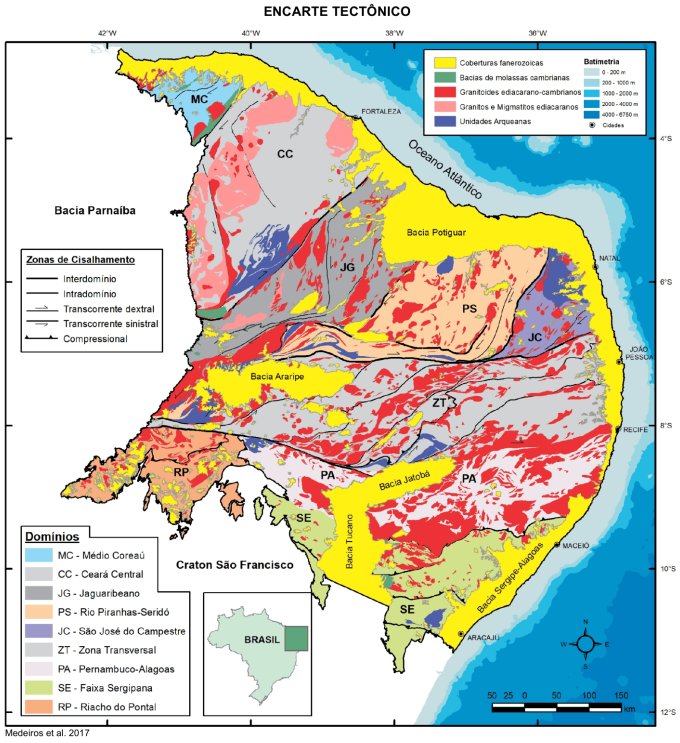
A porção norte da Província Borborema apresenta um arranjo estrutural complexo, marcado por cinco grandes zonas de cisalhamento regionais: Picuí–João Câmara, Patos, Portalegre, Senador Pompeu e Sobral–Pedro II. Nesse contexto, o maciço São José do Campestre ocupa uma área aproximada de 6.000 km^2 e abriga uma das porções de crosta mais antigas da América do Sul, com idades superiores a 3,45 Ga (Dantas et al., 2004). Essas idades são interpretadas como representativas de um núcleo arqueano preservado, cercado por rochas mais juvenis e intrudido por corpos plutônicos, configurando um fragmento cratônico envolvido por outros blocos tectônicos da Província Borborema (Dantas et al., 2004; Caxito et al., 2020).

O núcleo arqueano do DSJC é composto predominantemente por gnaisses e migmatitos, com intrusões máficas e ultramáficas associadas a eventos magmáticos que se estendem até o Neoproterozoico (Jesus, 2011). Dados geocronológicos indicam ao menos três fases principais de petrogênese arqueana, com eventos em torno de 3,45 Ga, 3,2 Ga e 2,7 Ga. Essas unidades foram posteriormente retrabalhadas durante a Orogênese Transamazônica, por volta de 2,2 Ga, e

intensamente reativadas do ponto de vista estrutural e metamórfico durante o Ciclo Brasiliano, há cerca de 600 Ma (Dantas et al., 1998).

Para este estudo, foram selecionadas amostras representativas de rochas graníticas neoproterozoicas e do embasamento arqueano do domínio, visando à aplicação integrada da tripla datação (U-Pb, traços de fissão e U-Th/He). As amostras graníticas correspondem aos corpos Monte das Gameleiras (CEBP321) e Barcelona (CEBP035), ambos associados ao magmatismo brasiliano. Adicionalmente, foi selecionada a amostra BJ19C, correspondente a um tonalito.

Figura 5 – Mapa Geológico da Província Borborema (Escala 1:1.000.000).



Fonte: Serviço Geológico do Brasil - SGB/CPRM (2023).

3.2 Descrição e Contexto Geológico das Amostras do Domínio São José do Campestre

As amostras analisadas, pertencentes aos corpos de Bom Jesus, Barcelona e Monte das Gameleiras, fazem parte do Domínio São José do Campestre (DSJC), localizado na porção norte da Província Borborema. Estas unidades registram uma complexa evolução magmática e

tectônica que abrange desde o Paleoarqueano até o Mesozoico (Dantas et al., 2004; Azevedo, 2021, 2026). A seguir, detalham-se as informações geológicas e geocronológicas de cada estação de amostragem.

No que se refere ao Gnaisse/Tonalito Bom Jesus (Amostra BJ19C), este pertence ao núcleo antigo do Maciço São José do Campestre e constitui um dos fragmentos de crosta continental mais antigos da América do Sul (Dantas et al., 2004; Azevedo, 2021). Trata-se de um ortognaisse de composição tonalítica a granodiorítica, de afinidade cálcio-alcalina, rico em plagioclásio, hornblenda e biotita, que contém enclaves de rochas dioríticas a gabroicas (Dantas et al., 2013). A gênese de seu magma associa-se à forte interação entre o manto e o retrabalhamento de material crustal preexistente (Dantas et al., 2013). Datações isotópicas U-Pb em cristais de zircão revelam idades de cristalização magmática extremamente antigas para esta unidade, variando de $3,41$ a $3,45$ Ga, o que situa a rocha no Paleoarqueano (Dantas et al., 2004, 2013; Azevedo, 2021). Além disso, os cristais de zircão registram bordas de recristalização que indicam superposições metamórficas no Paleoproterozoico, entre cerca de $2,1$ e $2,0$ Ga, e, mais tardiamente, associadas ao evento Brasiliano/Pan-Africano em torno de 619 Ma (Dantas et al., 2004).

Por sua vez, a amostra CEBP035 provém do Plúton Barcelona, um corpo intrusivo tardi-orogênico inserido no Domínio São José do Campestre que é classificado petrograficamente como um monzogranito porfirítico a biotita e microgranito a biotita. Sua colocação ocorreu durante a fase final do Ciclo Brasiliano/Pan-Africano, apresentando idades de cristalização por U-Pb em zircão entre 551 ± 6 Ma e 541 ± 7 Ma, no limite Ediacarano-Cambriano (Azevedo, 2026). O magma original assimilou porções de crosta mais antiga, fato evidenciado pela presença de zircões herdados do Pré-Cambriano com idades de aproximadamente 800 Ma e $1,4$ Ga (Azevedo, 2026). A termocronologia de baixa temperatura documenta sua história de resfriamento e exumação pós-orogênica, onde o método de Traços de Fissão em zircão (TFLA) exibe idades associadas ao período Jurássico, situadas entre 169 ± 13 Ma e 183 Ma (Azevedo, 2026). Análises adicionais de U-Th/He fornecem idades complementares de resfriamento na crosta superior de aproximadamente 228 Ma em zircão, correspondente ao Triássico, e de cerca de 119 Ma em apatita (Azevedo, 2021).

Finalmente, a amostra CEBP321 representa o Plúton Monte das Gameleiras, um granito de caráter regional intrudido no Maciço São José do Campestre e classificado geoquimicamente como metaluminoso e subalcalino (Azevedo, 2026). Sua cristalização ocorreu no período Ediacarano, exibindo idades U-Pb em zircão da ordem de 574 ± 6 Ma a 581 Ma, o que o alinha ao auge magmático da Orogenia Brasiliana. Assim como o Plúton Barcelona, o corpo de Monte das Gameleiras incorporou material da crosta antiga, abrigando cristais de zircão herdados com idades do Paleoproterozoico ao Mesoproterozoico de cerca de $1,0$ Ga, $1,6$ Ga e $1,8$ Ga. O estudo termocronológico de Traços de Fissão em zircão (TFLA) indica que a rocha sofreu um importante evento de exumação tectônica, cruzando a isoterma de sensibilidade do método no período Permiano, o que resultou no registro de idades médias ponderadas situadas entre 271 ± 11 Ma e 288 ± 9 Ma (Azevedo, 2026).

3.3 ÁREA DE APLICAÇÃO: PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS

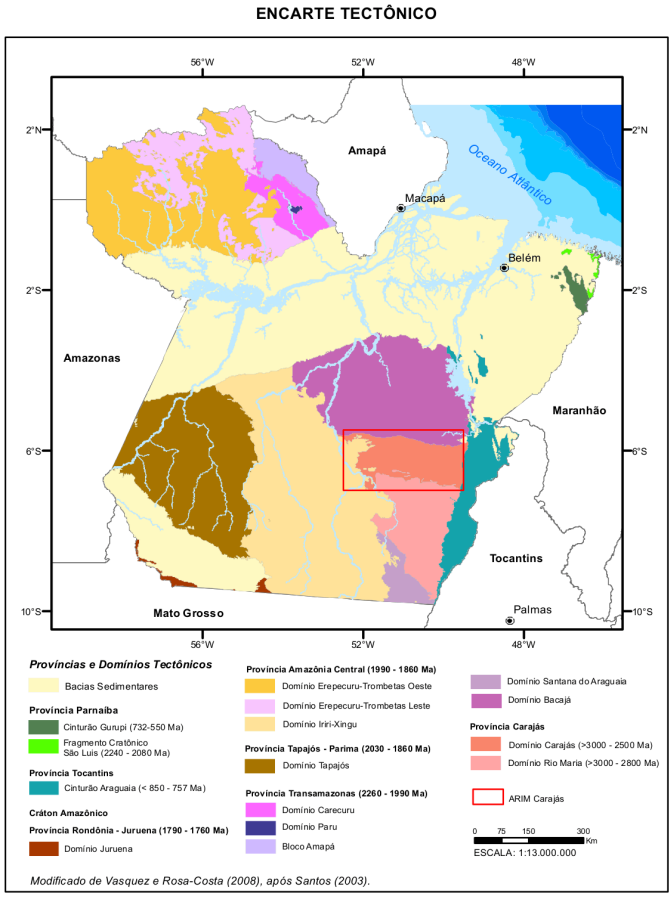
A Província Mineral de Carajás (PMC), situada na porção sudeste do Cráton Amazônico, constitui um dos domínios arqueanos mais expressivos do mundo, sendo reconhecida globalmente por seu vasto acervo metalogenético e complexidade estrutural. Tectonicamente, a província é dividida em dois domínios principais: o Domínio Rio Maria, ao sul, composto por terrenos *granite-greenstone* preservados do Mesoarqueano, e o Domínio Carajás, ao norte, caracterizado por um embasamento de alto grau (Complexo Pium) e sequências supracrustais do Neoarqueano (Bühn et al., 2012).

A geologia de Carajás é marcada por depósitos minerais hospedados em unidades meta-vulcanossedimentares do Supergrupo Itacaiúnas, com idades de aproximadamente 2,76 Ga. A região é notória por hospedar depósitos de classe mundial de ferro, manganês, ouro e elementos do grupo da platina, com destaque para os depósitos de óxido de ferro-cobre-ouro (IOCG), que incluem minas de relevância estratégica como Salobo, Igarapé Bahia/Alemão, Sossego e Cristalino (Tallarico et al., 2005; Moreto et al., 2011).

A história térmica da PMC é resultado de múltiplos eventos magmáticos e metamórficos. A formação dos depósitos IOCG está intrinsecamente ligada a intrusões graníticas do Arqueano

e Paleoproterozoico, que geraram sistemas hidrotermais de grande escala (Moreto et al., 2011). Este cenário de intenso hidrotermalismo impõe assinaturas complexas nas rochas encaixantes e nos minerais acessórios. O enriquecimento hidrotermal tardio e a circulação de fluidos agressivos são os principais responsáveis pela degradação física e modificação microestrutural de fases minerais menos refratárias na província.

Figura 6 – Encarte geotectônico do Cráton Amazônico com a localização regional da Província Mineral de Carajás.



Fonte: Mapa Geológico e Geotectônico da Província Mineral de Carajás (Costa et al., 2016).

A amostragem no Domínio Carajás (amostras C16, C20 e C23) combinou os minerais zircão e apatita para aplicar a técnica de Triple Dating, cobrindo desde altas até baixas temperaturas de resfriamento. Diferente de áreas com histórias térmicas simples, Carajás passou por múltiplos eventos ao longo de bilhões de anos, o que gera incertezas sobre o que guiou seu resfriamento final: se foi uma erosão lenta e de longo prazo (influenciada pela estabilidade do cráton e pela Bacia do Amazonas) ou se respondeu a impactos indiretos de grandes eventos tectônicos distan-

tes, como o surgimento dos Andes e a abertura do Oceano Atlântico. Além disso, o acúmulo prolongado de danos por radiação nesses minerais facilitou a perda de elementos químicos ao longo do tempo, tornando Carajás o ambiente de teste perfeito para verificar se a metodologia proposta é realmente robusta e confiável em cenários geológicos altamente complexos.

3.4 Descrição e Contexto Geológico das Amostras de Carajás

As amostras analisadas inserem-se no contexto geológico e metalogenético da Província Mineral de Carajás (PMC). Com base na associação direta dessas rochas com os sistemas hidrotermais do tipo Óxido de Ferro-Cobre-Ouro (IOCG) do Cinturão Sul do Cobre e na correlação litológica estabelecida com a literatura regional (Moreto et al., 2011, 2014, 2015), a origem, a unidade e o enquadramento geocronológico provável de cada conjunto de amostras são detalhados a seguir.

No que tange ao primeiro grupo, ambas as amostras C01 e C02 (CTND01/63,20 e CTND01/59,78), provenientes do Depósito Castanha, correspondem a magnetititos com calcita de origem hidrotermal. Este depósito é caracterizado como um sistema IOCG distal ou profundo em relação aos maiores corpos da região, marcado pelo forte desenvolvimento de halos de alteração ricos em magnetita e actinolita. Na sua área de ocorrência, a rocha hospedeira predominante é o pórfiro quartzo-feldspático Castanha, cuja cristalização magmática ocorreu no Neoarqueano, datada em aproximadamente 2,74 Ga. A idade de mineralização de 2,7 Ga indicada para essas amostras reflete o principal evento hidrotermal mineralizador Neoarqueano registrado em larga escala no Cinturão Sul do Cobre, o qual operou no intervalo entre 2,72 e 2,68 Ga (Moreto et al., 2015).

Em relação ao Depósito Sossego, as amostras C18 e C19 (SOS99/296,07 e SOS35/492,45) representam minérios de cobre de origem hidrotermal associados a um sistema geológico complexo que hospeda corpos mineralizados formados em distintos níveis crustais e em épocas diferentes (Moreto et al., 2014). A Amostra C18 (SOS99/296,07) é vinculada ao Corpo Sequeirinho, o qual se formou na porção mais profunda do sistema hidrotermal e se destaca por uma intensa alteração sódico-cálcica associada a corpos maciços de magnetita e apatita; sua

mineralização ocorreu durante o evento IOCG do Neoarqueano, com idades de U-Pb e Re-Os atestando a formação do minério entre 2,71 e 2,68 Ga (Moreto et al., 2014). Por outro lado, a Amostra C19 (SOS35/492,45) pertence ao Corpo Sossego, alojado em porções crustais mais rasas, onde predomina a alteração potássica e clorítica com forte controle estrutural e brechas. De acordo com as descrições de furos homólogos (como o gabronorito hospedeiro no furo SOS 35), a litologia original possui idade de cristalização magmática de 2,74 Ga, mas a idade hidrotermal reportada para o minério desta amostra ($\sim$1,8 Ga) é corroborada por datações U-Pb em monazita hidrotermal, confirmando que a mineralização Cu-Au nos corpos Sossego-Curral é produto de um sistema tardio, instalado no Paleoproterozoico, com idades balizadas entre 1,90 e 1,88 Ga (Moreto et al., 2014).

Por fim, as amostras C16 (CMTM06), C17 (OPBD21-177/45,6), C20 (CMTM07) e C23 (ONOVD001-79) inserem-se no contexto regional e de outros depósitos periféricos. Tais amostras correspondem a litologias regionais de origem metamórfica (milonitos) e ígnea (granitos), bem como a minério hidrotermal de áreas periféricas, como os depósitos Pedro Branca e Buriti. As rochas ígneas e metamórficas regionais (Amostras C16, C20 e C23) apresentam idade sugerida em torno de 2,8 Ga, o que se encaixa adequadamente no mapeamento geocronológico do embasamento Mesoarqueano local. Essas rochas são temporalmente correlatas a importantes blocos crustais mapeados na área, a exemplo do Granito Serra Dourada (2,85 a 2,86 Ga) e de ocorrências tonalíticas e trondhjemíticas variando de 2,87 a 3,0 Ga. Adicionalmente, a idade de 2,71 Ga da mineralização do Depósito Pedro Branca (Amostra C17; Sanches *et al.*, submetido) demonstra estrita sincronicidade com o pulso metalogenético Neoarqueano (2,72 a 2,68 Ga) formador dos grandes corpos mineralizados de todo o Cinturão Sul do Cobre.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada neste trabalho compreende desde a preparação física das amostras até a análise isotópica de alta precisão. O estudo concentrou-se em minerais acessórios provenientes de dois cenários geológicos distintos no Brasil:

(i) cristais e fragmentos de **apatita**, representados pelas amostras CEBP035 e BJ19C do

Domínio Tectônico São José do Campestre (Província Borborema), e pelas amostras C01, C02, C16, C17, C18 e C19 da Província Mineral de Carajás; e

(ii) grãos de **zircão** provenientes da Província Mineral de Carajás, representados pelas amostras C11, C15, C16, C20, C23, E01 e E06.

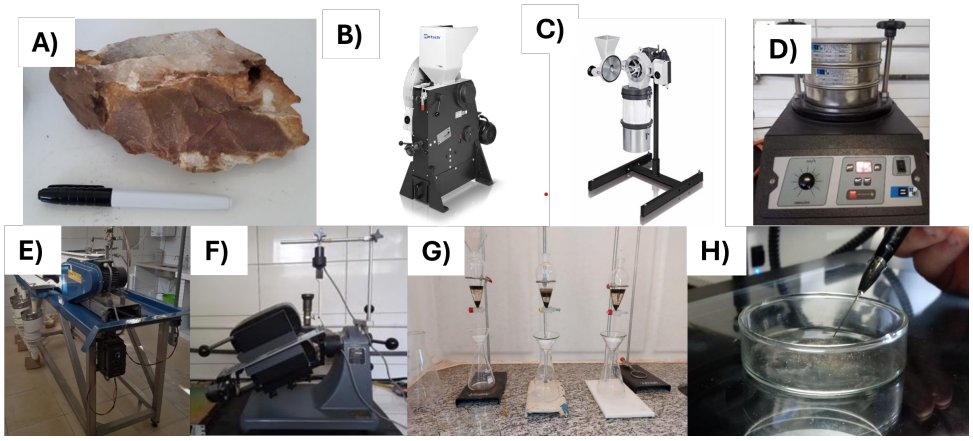
As etapas iniciais de separação mineral foram realizadas no laboratório do Grupo DETRAN (UNESP/Presidente Prudente), seguindo protocolos adaptados de Tagami et al. (1988) e Resende (2015), bem como no Laboratório de Geocronologia da Universidade de Brasília (UnB). As análises de microscopia eletrônica, espectroscopia Raman e geocronologia via LA-ICP-MS foram conduzidas durante o estágio de pesquisa no *London Geochronology Centre* (UCL).

4.1 SEPARAÇÃO MINERAL E TRIAGEM FÍSICA

O processo de obtenção dos concentrados de apatita e zircão baseia-se nas propriedades físicas distintas (densidade e suscetibilidade magnética) desses minerais em relação à matriz rochosa.

O primeiro estágio consiste na redução granulométrica da amostra de mão (A), onde fragmentos de rocha de até 5 cm são reduzidos em um britador de mandíbulas (*Jaw Crusher*) (B). A fração britada é então submetida a um moinho de discos pulverizador (C) para liberação dos grãos.

Figura 7 – Etapas de cominuição e separação de minerais pesados.



Fonte: Elaborada pela autora.

O material resultante é processado em um agitador de peneiras vibratório (D) por 30

minutos, selecionando-se a fração granulométrica entre 180 μm e 250 μm, intervalo ideal para a recuperação de cristais íntegros de apatita e zircão adequados para datação.

A concentração gravimétrica inicial é realizada em mesa vibratória (*Wilfley table*) (E), que utiliza o fluxo de água e a vibração lateral para segregar os minerais pesados (zircão, apatita, magnetita) dos leves (quartzo, feldspato), removendo a maior parte da matriz estéril.

Após secagem em estufa a 60°C, o concentrado é submetido à separação magnética em um separador isodinâmico Frantz (Modelo LB-1) (F). Utilizam-se correntes progressivas (0.5 A, 1.0 A e 1.5 A) para remover minerais ferromagnéticos e paramagnéticos. Apatita e zircão, sendo diamagnéticos, concentram-se na fração não-magnética final.

A purificação final utiliza líquidos densos (G). O concentrado é processado em funis de separação contendo Bromofórmio ($\delta \approx 2.85$ g/cm^3). Pela diferença de densidade, minerais leves flutuam, enquanto minerais densos como a apatita ($\delta \approx 3.2$ g/cm^3) e o zircão ($\delta \approx 4.7$ g/cm^3) decantam, formando o concentrado final de minerais pesados.

O passo definitivo consiste na catação manual (*hand-picking*) (H) sob microscópio estereoscópico (lupa binocular) Zeiss Stemi 305. Grãos de apatita e zircão são identificados por seu hábito cristalino e brilho, sendo selecionados individualmente para as montagens.

4.2 PREPARAÇÃO E MONTAGEM DE AMOSTRAS

Devido à natureza distinta das técnicas analíticas empregadas, a preparação das amostras foi dividida em duas rotinas independentes: (i) confecção de seções polidas para análises in-situ (Traços de Fissão e U-Pb) e (ii) seleção de grãos inteiros para termocronologia (U-Th)/He. Os grãos destinados às seções polidas foram montados em resina epóxi e Teflon, e posteriormente polidos para expor sua geometria e estrutura interna.

4.2.1 Montagem e Ataque Químico (Seções Polidas)

Para as análises que requerem exposição da superfície interna dos cristais (Traços de Fissão e U-Pb), a preparação seguiu protocolos específicos para apatita e zircão, respeitando a estabilidade térmica de cada mineral para evitar o recozimento dos traços latentes. Adicional-

mente, as populações de grãos foram triadas via microscopia óptica para identificar domínios livres de inclusões e zoneamentos de crescimento representativos. As condições detalhadas de montagem e ataque químico estão sumarizadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Condições experimentais de montagem e ataque químico para revelação de traços de fissão.

Mineral	Montagem	Reagente	Condições (T / Tempo)
Apatita	Epóxi (Cura a frio)	HNO_3 (5.5 M)	21°C / 20 s
Zircão	Teflon PFA (330°C)	Eutético NaOH:KOH	225°C / 4–10 h

Fonte: Elaborada pela autora com base em (Donelick et al., 2005) e (Gleadow and Seiler, 2014).

No caso da apatita, a montagem foi realizada exclusivamente com resina epóxi de cura a frio. A utilização de temperatura ambiente é mandatória para este mineral, visto que sua baixa temperatura de fechamento ($T_c \approx 60-110$°C) torna o registro geológico suscetível a apagamento térmico por fontes de calor exógenas. Após o polimento, a revelação dos traços ocorreu mediante imersão em ácido nítrico (HNO_3 5.5 M por 20 s a 21°C (Donelick et al., 2005)), suficiente para ampliar os canais de fissão sem degradar a superfície polida.

Para o zircão, a alta resistência química exige o uso de lâminas de Teflon (PFA) como suporte, prensadas sobre chapa aquecida a 330°C. A estabilidade térmica superior do mineral ($T_c > 200$°C) permite essa excursão térmica durante a montagem sem perda de traços. A revelação dos traços latentes demandou um ataque com fusão eutética de KOH-NaOH a 225°C, com tempo de exposição ajustado entre 4 e 10 horas (Gleadow and Seiler, 2014).

Como estratégia analítica adicional adaptada de Resende (2015), preparou-se também um conjunto separado de grãos de zircão não atacados quimicamente. Ambas as populações (atacadas e não atacadas) foram posteriormente analisadas via LA-ICP-MS para comparar de forma sistemática a resposta isotópica dos domínios estruturalmente preservados (sistema isotópico fechado) em relação àqueles metamictizados ou com elevado dano de radiação.

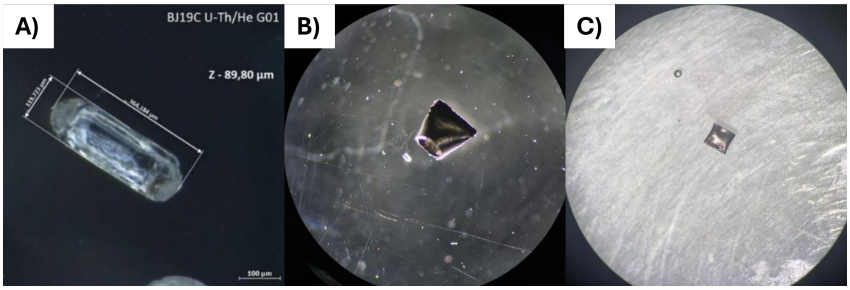
4.2.2 Seleção para (U-Th)/He em Apatita (Grãos Inteiros)

Para a termocronologia (U-Th)/He, a preparação dispensa o uso de resinas e ataques químicos prévios, fundamentando-se na seleção manual (*hand-picking*) de cristais inteiros sob

estereomicroscópio binocular com luz polarizada.

O processo de triagem seguiu os critérios metodológicos estabelecidos por Farley (2002). Priorizaram-se grãos euédricos, prismáticos e com terminações preservadas, garantindo-se a manutenção da geometria original de difusão do Hélio. A **Figura 8A** exemplifica um cristal selecionado (amostra BJ19C) que atende a estes critérios de integridade física. Buscou-se selecionar cristais com raio superior a 60 μm para mitigar os efeitos da ejeção de partículas alfa.

Figura 8 – Procedimentos de seleção e encapsulamento de grãos para datação (U-Th)/He.



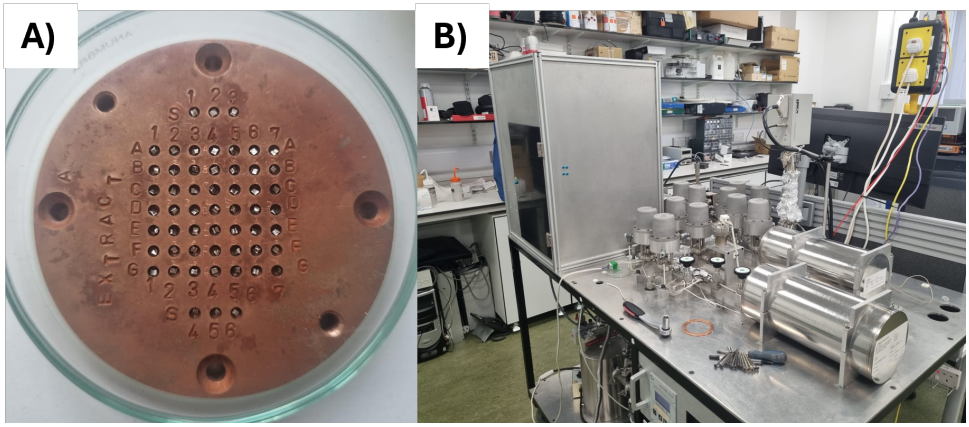
Fonte: Elaborada pela autora.

Simultaneamente, avaliou-se a pureza interna para descartar fraturas ou inclusões que pudessem atuar como armadilhas ou implantar excesso de Hélio. Após a seleção, as dimensões físicas de cada grão (comprimento, largura e espessura) foram mensuradas digitalmente no microscópio ZEISS Axio Imager, dados necessários para o cálculo do Fator de Correção de Ejeção Alfa (F_T).

Os grãos foram encapsulados individualmente em tubos de Nióbio (Nb) de grau cirúrgico. As etapas de inserção manual e compactação mecânica para o fechamento hermético do tubo estão demonstradas nas **Figuras 8A e B**, finalizando o encapsulamento para a análise **Figura 8C**.

Após esta etapa, os tubos de Nióbio foram organizados em uma matriz de cobre e inseridos na câmara da linha de extração de gases nobres. O sistema, conectado a bombas turbomoleculares, manteve o ambiente em ultra-alto vácuo para a realização das análises a laser, conforme ilustrado na **Figura 9**.

Figura 9 – Componentes do sistema de extração de Hélio a laser: (A) Organização das alíquotas e (B) Sistema de extração a laser.



Fonte: Elaborada pela autora.

4.3 Caracterização Mineralógica e Estratégia de Amostragem

A definição dos locais de análise (*spots*) visou integrar os dados termocronológicos e geocronológicos no mesmo domínio cristalino. Para isso, utilizou-se um fluxo de trabalho que envolveu a validação mineralógica, caracterização estrutural interna e inspeção óptica pós-ataque químico.

4.3.1 Espectroscopia Micro-Raman

A identificação mineralógica e a avaliação de possíveis heterogeneidades estruturais foram realizadas no Laboratório de Filmes Nanoestruturados e Espectroscopia (FCT/UNESP). As análises foram conduzidas em um espectrômetro Renishaw inVia, equipado com laser de Hélio-Neônio (He-Ne, $\lambda = 633$ nm). Os espectros foram adquiridos no intervalo de 100 a 1500 cm^{-1}, com resolução espectral de aproximadamente 1 cm^{-1}, permitindo a identificação da fase apatita a partir de seus modos vibracionais característicos (Sala, 2008; Xu et al., 2020).

Como referência experimental, foi adquirido um espectro Raman da apatita Durango nas mesmas condições instrumentais utilizadas para as amostras analisadas neste trabalho (Figura 10). O espectro apresenta como banda dominante o modo de estiramento simétrico ν_1 dos tetraedros PO_4, localizado próximo de 963 cm^{-1}, além de bandas de menor intensidade associadas aos demais modos vibracionais característicos da apatita (Sala, 2008; Xu et al., 2020).

Adicionalmente, foi realizado um mapeamento Raman de alta resolução em um grão não atacado da amostra CEBP035 (grão G01). Foram adquiridos aproximadamente 7000 espectros ao longo da superfície do cristal, com o objetivo de avaliar espacialmente variações no modo de estiramento simétrico dos tetraedros PO_4 ($\nu_1 \approx 965$ cm^{-1}). Foram analisadas variações na posição do pico e em sua largura total à meia altura (FWHM), parâmetros sensíveis a mudanças na ordem estrutural e no ambiente cristalino da apatita (Antonakos et al., 2007; Xu et al., 2020). O processamento dos espectros, incluindo correção de *baseline* e ajuste de picos (*peak fitting*), foi realizado no software OriginLab.

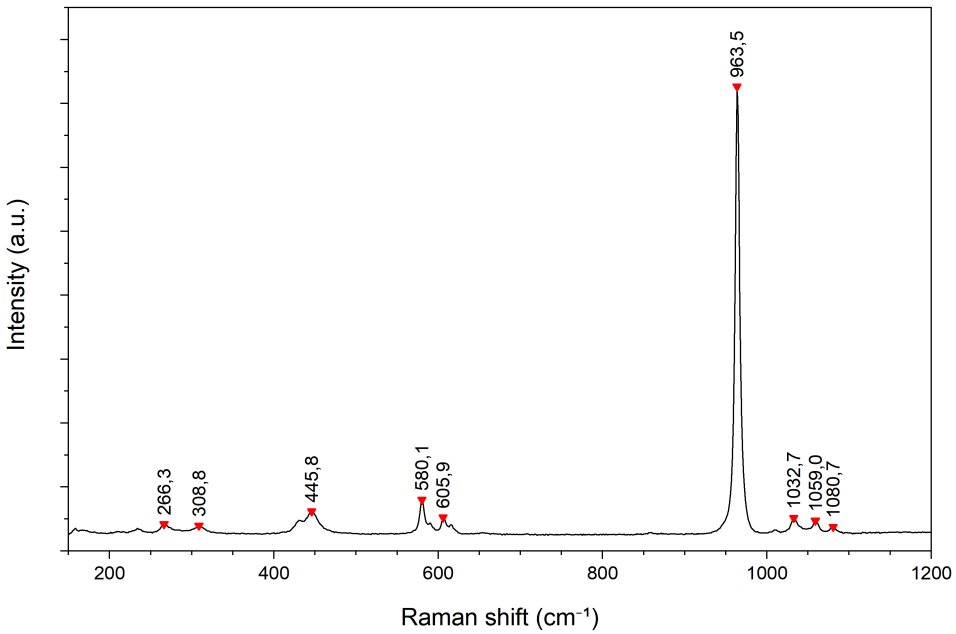


Figura 10 – Espectro Raman da apatita Durango obtido experimentalmente utilizando laser de 633 nm. Os valores indicados correspondem às posições das principais bandas Raman identificadas.

Fonte: Elaborado pela autora.

4.3.2 Microscopia Eletrônica (MEV) e Catodoluminescência (CL)

As imagens de Catodoluminescência (CL) foram obtidas no *Department of Earth Sciences* da *University College London* (UCL), Reino Unido, como parte do estágio de pesquisa no exterior (BEPE/FAPESP). Utilizou-se um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) modelo JEOL JSM-6480LV, equipado com um detector de CL. A técnica baseia-se na emissão de fótons

induzida por feixe de elétrons, sendo sensível a variações de elementos traço e defeitos estruturais (Goldstein et al., 2003). A CL foi aplicada com objetivos distintos:

- **Zircão (Amostras C16 e C23 – Carajás):** identificação de zoneamentos oscilatórios e núcleos herdados, garantindo que os *spots* fossem posicionados fora de zonas de metamictização excessiva.
- **Apatita (Amostras 035, 321 e BJ19C – Borborema/SJC):** visou identificar zoneamentos químicos. Contudo, observou-se que determinadas apatitas não apresentaram resposta satisfatória; mesmo com ajustes de voltagem e ganho, o sinal permaneceu saturado, limitando a resolução de estruturas internas.

4.3.3 Seleção de *Spots* para LA-ICP-MS e Critérios Ópticos

Após a validação por Raman/CL e o ataque químico, a definição final dos pontos de ablação obedeceu a dois critérios baseados na microscopia óptica (refletida e transmitida):

1. **Grãos com Traços de Fissão (TFLA):** o *spot* de U-Pb foi posicionado sobre a mesma área analisada para traços ou em sua vizinhança imediata, assegurando o acoplamento entre a idade e a história térmica do cristal específico.
2. **Grãos sem Traços ou Densidade Insuficiente:** a seleção priorizou a integridade física da superfície. Buscou-se por áreas especulares — regiões lisas, polidas e livres de fraturas ou rugosidade excessiva do ataque químico — garantindo a estabilidade do sinal analítico.

4.4 ANÁLISES ISOTÓPICAS E TERMOCRONOLÓGICAS

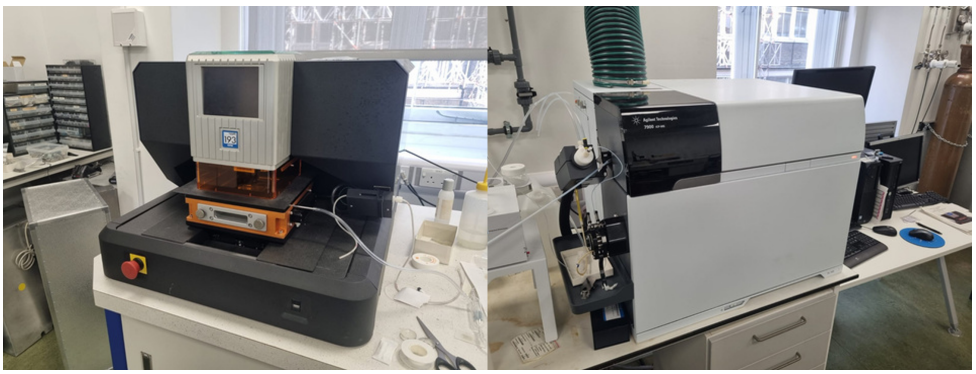
As análises analíticas de alta precisão foram conduzidas no London Geochronology Centre (LGC), University College London (UCL).

4.4.1 Geocronologia U-Pb e Traços de Fissão (LA-ICP-MS)

As datações U-Pb e a determinação de Urânio para Traços de Fissão foram realizadas simultaneamente via LA-ICP-MS. O sistema de ablação consistiu em um laser excimer de 193 nm

modelo New Wave NWR193 HE, acoplado a um espectrômetro de massa com filtro quadrupolo Agilent 7900 (ou Agilent 7700, conforme a sessão de rotina). Os parâmetros operacionais do laser de ablação foram ajustados com tamanho de feixe (*spot size*) de 30 μm, frequência de repetição de 10 Hz e uma fluência energética de aproximadamente 2,5 J/cm^{-2}.

Figura 11 – Instrumentação LA-ICP-MS utilizada para análises *in situ*.



Fonte: Elaborada pela autora.

O processo analítico inicia-se com a ablação da amostra sólida pelo feixe de laser pulsado, gerando um aerossol de micropartículas que é transportado por um fluxo contínuo de gás Hélio ($\sim$0,8 L/min, gás de arraste). Antes da introdução no espectrômetro, este fluxo é misturado com gás Argônio para a estabilização do plasma de acoplamento indutivo. Ao atingir a tocha do ICP, submetida a temperaturas entre 6.000 e 10.000 K, o material sofre dessolvatação, vaporização, atomização e ionização. Os íons formados são extraídos para a região de alto vácuo e focalizados por lentes iônicas em direção ao quadrupolo (m/z). A detecção é realizada por um multiplicador de elétrons.

A estratégia de análise de *double dating* combinou a densidade de traços espontâneos (ρ_s), quantificada sob microscópio óptico, com a determinação de Urânio e razões isotópicas via laser no mesmo ponto.

Para a calibração de dados e controle de deriva na rotina de **apatitas**, adotou-se a apatita de Madagascar como material de referência primário, enquanto a apatita Durango e o vidro padrão NIST SRM 612 foram utilizados como padrões secundários de validação (Chew et al., 2014). Para as análises de **zircão**, o zircão Plešovice serviu como padrão primário, assistido sistematicamente pelo zircão 91500 e pelo padrão NIST SRM 612 como materiais de referência

secundários.

4.4.2 Termocronologia (U-Th)/He (Extração de Gás e ICP-MS)

A metodologia seguiu o protocolo de análise em alíquotas multi-grão (*multi-grain aliquots*), conforme rotinas do London Geochronology Centre (UCL). O processo analítico teve início com a extração térmica do gás em uma linha de ultra-alto vácuo, onde conjuntos de cristais de apatita, agrupados em tubos de Nióbio (Nb), foram aquecidos por um laser de diodo infravermelho.

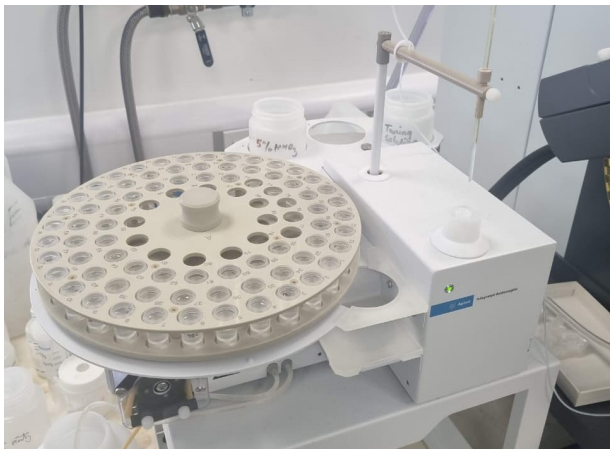
O sistema de aquecimento foi calibrado para assegurar a difusão total do ^4He radiogênico das alíquotas, preservando a integridade dos isótopos pais. Nos casos em que as alíquotas apresentaram concentrações de gás excepcionalmente elevadas — atribuídas ao grande volume dos cristais ou à presença de fases minerais altamente retentivas (como micro-inclusões) —, aplicou-se uma etapa de re-extração (reaquecimento) para garantir o esgotamento total do Hélio residual.

O gás liberado foi quantificado em um espectrômetro de massa quadrupolar Hiden Analytical. A calibração da medida foi realizada pelo método de comparação direta (bracketing), utilizando alíquotas de gás padrão de volume manometricamente conhecido.

Para a análise dos isótopos pais, adotou-se o protocolo de dissolução direta pelo traçador. Os tubos contendo as amostras desgaseificadas foram pesados e receberam a adição de 50 μL de solução traçadora ácida (*spike*) contendo isótopos enriquecidos de U, Th e Sm. As amostras permaneceram em repouso à temperatura ambiente por um período mínimo de 24 horas, permitindo que a própria solução traçadora promovesse a dissolução completa dos cristais e a equilibração isotópica simultânea.

Após o período de digestão, as soluções foram diluídas com 1.500 μL de água ultrapura (Milli-Q). As alíquotas preparadas foram então posicionadas no amostrador automático (*autosampler*) acoplado ao sistema, sendo as concentrações finais determinadas por espectrometria de massa (Agilent 7900 ICP-MS). O controle de qualidade analítica de cada bateria incluiu a análise de brancos de reagente (água Milli-Q), brancos de traçador e soluções padrão de referência de Samário para monitoramento da precisão e calibração instrumental.

Figura 12 – Sistema de introdução de amostras (*autosampler*) acoplado ao ICP-MS.



Fonte: Elaborada pela autora.

4.5 REDUÇÃO DE DADOS: LA-ICP-MS (U-Pb e Traços de Fissão)

A redução de dados de LA-ICP-MS impõe um desafio operacional significativo devido à natureza dos arquivos brutos gerados pelo equipamento (formato *Time Resolved Analysis* - TRA). Para otimizar esse processo e garantir o controle de qualidade estatístico, desenvolveu-se um fluxo de trabalho híbrido. Este protocolo combina a transparência e auditabilidade das planilhas eletrônicas com a capacidade de automação da linguagem Python, visando a obtenção de razões isotópicas e concentrações elementares formatadas para o cálculo final de idades no software IsoplotR (Vermeesch, 2018).

4.5.1 Protocolo Interno (Automação Python + Excel)

O fluxo de redução de dados foi estruturado em quatro etapas sequenciais, orquestradas por scripts em Python que manipulam a entrada e saída de dados em templates de cálculo (Excel), conforme detalhado na Figura 13.

1. Plotagem Automatizada e Triagem Visual: A etapa inicial consistiu na execução do *Script Python - Plotagem*, responsável por gerar gráficos de sinal (*intensity vs. time*) para todos os arquivos brutos (formato .csv). Esta visualização permitiu uma triagem manual rigorosa, onde medidas apresentando instabilidades críticas — como ejeção do grão, inclusões ou fraturas — foram imediatamente descartadas, garantindo que apenas dados com sinal estável prosseguissem

no fluxo.

2. Injeção de Dados e Modelagem Matemática: Os arquivos aprovados na triagem foram processados pelo *Script Python - Injeção*, que transferiu os dados brutos para o *Template Excel*. Neste ambiente, aplicaram-se modelos matemáticos baseados em lógica booleana e estatística descritiva para o tratamento do sinal:

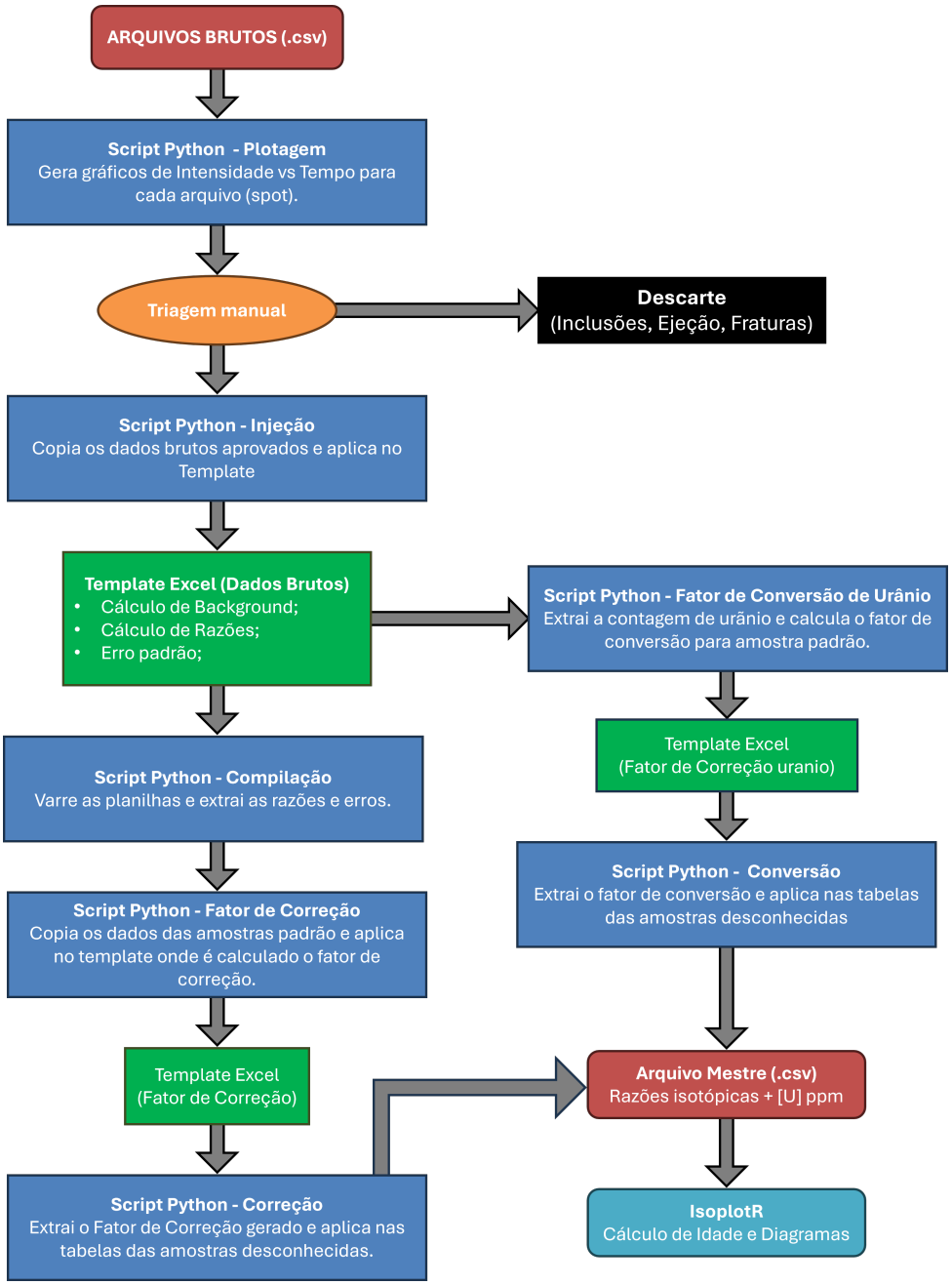
- *Definição do Background:* Cálculo dos percentis de 5% e 95% da distribuição do sinal para estabelecimento do limiar de ruído de fundo.
- *Cálculo de Razões e Erros:* Após a subtração do background, as razões isotópicas foram integradas ciclo a ciclo. A incerteza foi derivada do erro padrão da média ($s/\sqrt{n}$), garantindo a propagação correta do erro analítico.

3. Compilação e Determinação Independente de Fatores: Após o processamento individual, o *Script Python - Compilação* varreu as planilhas para extrair as razões e erros. Nesta etapa, o fluxo de dados foi bifurcado para o cálculo independente dos parâmetros de calibração, utilizando os minerais padrão analisados na mesma sessão:

- *Fator de Correção Isotópica:* O script extraiu os dados dos padrões primários para calcular o fator de correção necessário para corrigir o fracionamento instrumental e a deriva das razões isotópicas ($^{206}Pb/^{238}U$ e $^{207}Pb/^{206}Pb$).
- *Fator de Conversão de Urânio:* Paralelamente, extraiu-se a taxa de contagem média (CPS) dos padrões de concentração conhecida para determinar o fator de sensibilidade relativo, permitindo a conversão de CPS para ppm.

4. Aplicação de Correções e Consolidação (Arquivo Mestre): Na etapa final, scripts específicos (*Script Python - Correção* e *Script Python - Conversão*) aplicaram os fatores calculados anteriormente às tabelas das amostras desconhecidas. Os resultados corrigidos — contendo tanto as razões isotópicas finais quanto as concentrações absolutas de Urânio — foram consolidados em um único Arquivo Mestre (.csv). Este arquivo serviu como entrada direta para o software IsoplotR, onde as idades geológicas finais e os diagramas de Concórdia foram gerados, aplicando correções de Pb comum (Pb_c) via regressão isocrônica.

Figura 13 – Fluxograma do protocolo de redução de dados e tratamento estatístico.

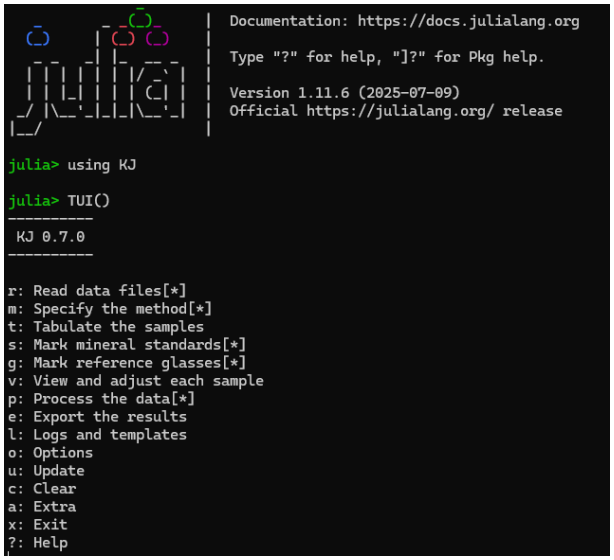


Fonte: Elaborada pela autora.

4.5.2 Validação Cruzada: O Pacote KJ (Julia)

Visando a validação rigorosa do protocolo interno descrito acima, os dados brutos foram processados paralelamente utilizando o pacote KJ, desenvolvido em linguagem Julia por P. Vermeesch (Vermeesch, 2025).

Figura 14 – Interface operacional do pacote computacional *KJ*.



Fonte: Elaborada pela autora.

A utilização do KJ justifica-se pela necessidade de comparar a redução "manual"(baseada em médias lineares) com algoritmos mais complexos de modelagem física da ablação. O software KJ aplica correções automatizadas para:

- **Fracionamento Dependente da Profundidade (*Downhole Fractionation*):** O pacote modela a variação da razão isotópica à medida que o laser perfura o grão (frequentemente seguindo leis exponenciais ou lineares), corrigindo o viés introduzido pela geometria da cratera.
- **Deriva Instrumental (*Drift*):** O algoritmo interpola a sensibilidade do equipamento entre os blocos de padrões analisados no início e fim da bateria, corrigindo variações temporais de sinal.
- **Normalização:** Aplica os fatores de correção com base nos valores certificados dos padrões primários e secundários de referência.

4.5.3 Contexto de Aplicação e Desenvolvimento (BEPE)

O desenvolvimento e a aplicação deste protocolo de automação (Python + KJ) ocorreram no contexto do Estágio de Pesquisa no Exterior (BEPE/FAPESP), realizado no London Geochronology Centre, University College London (UCL), sob supervisão do Prof. Dr. Pieter Vermeesch. Durante este período, a autora participou ativamente da aquisição e processamento de dados brutos referentes às amostras da Província Mineral de Carajás e do conjunto de amostras do mestrado (Domínio São José do Campestre).

Esta experiência *in loco* contrasta com a etapa inicial do projeto, na qual um lote de amostras foi enviado ao laboratório de Londres e os resultados foram recebidos já processados (razões isotópicas e erros finais reduzidos pela equipe técnica interna).

A oportunidade de operar o equipamento e, principalmente, de lidar diretamente com os arquivos brutos durante o estágio foi o catalisador para a criação das rotinas de automação aqui descritas. O acesso direto à "caixa preta"da redução de dados permitiu transitar da posição de usuária de resultados para a de desenvolvedora de métodos. Nesse contexto, foi possível transpor e automatizar fluxos de trabalho que anteriormente eram executados de forma manual via planilhas de Excel no laboratório de origem.

4.6 REDUÇÃO DE DADOS: (U-Th)/He

Diferentemente do LA-ICP-MS, o fluxo de trabalho para a termocronologia (U-Th)/He envolve a integração de dados provenientes de duas etapas analíticas distintas: a espectrometria de gases nobres e a espectrometria de massa em solução.

O cálculo das idades foi realizado através da equação de decaimento radioativo padrão, que relaciona a abundância de ^{4}He (filho) com as concentrações de ^{238}U, ^{235}U, ^{232}Th e ^{147}Sm (pais). O protocolo de redução consistiu em:

1. **Quantificação do Hélio:** O sinal do gás extraído foi calibrado utilizando alíquotas de um tanque padrão de ^{4}He de volume manometricamente conhecido, analisado periodicamente durante a sessão para corrigir a sensibilidade do espectrômetro de nobres.

2. **Quantificação dos Pais:** As concentrações de U, Th e Sm obtidas no ICP-MS foram calculadas por diluição isotópica, utilizando as razões medidas entre os isótopos naturais da amostra e os isótopos enriquecidos da solução traçadora (*spike*).

3. **Correção Alfa (F_T):** Aplicou-se o Fator de Correção de Ejeção Alfa (F_T), calculado com base nas dimensões morfométricas de cada grão (mensuradas na etapa de microscopia), para compensar a perda de partículas alfa nas bordas do cristal (Zeitler et al., 1987; Farley et al., 1996; Farley, 2002; Flowers et al., 2023; Green et al., 2006; Ketcham et al., 2011).

A integração final desses parâmetros e o cálculo das idades corrigidas foram realizados utilizando planilhas de redução padrão do laboratório, validadas com o uso da amostra padrão Durango.

5 RESULTADOS

5.1 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

A caracterização detalhada das amostras foi essencial para validar a identidade mineralógica, avaliar a integridade da rede cristalina e orientar a seleção dos locais de análise isotópica (*spots*).

5.1.1 Espectroscopia Micro-Raman

A caracterização estrutural focou nos modos vibracionais fundamentais do grupo fosfato (PO_4^{3-}). De acordo com a simetria de apatitas ($P6_3/m$), as vibrações internas do tetraedro são divididas em quatro modos: estiramento simétrico (ν_1), flexão duplamente degenerada (ν_2), estiramento assimétrico triplamente degenerado (ν_3) e flexão triplamente degenerada (ν_4).

Os resultados para a amostra CEBP035 (Domínio SJC) e o padrão internacional Durango estão sumarizados na Tabela 2. Para a amostra CEBP035, os picos diagnósticos apresentaram-se bem definidos e com baixo erro padrão, confirmando a excelente cristalinidade do material.

Um diferencial importante observado na amostra CEBP035 foi a presença nítida do modo vibracional do Sulfato ($\nu_1 SO_4$) em $1002,49 \pm 0,03$ cm^{-1}. Esta banda, indicativa da substituição

parcial de PO_4^{3-} por SO_4^{2-}, apresentou-se mais definida na amostra de Borborema do que no padrão Durango.

Tabela 2 – Parâmetros espectroscópicos Raman da amostra CEBP035 e do padrão Durango.

Modo	Amostra	Center Gravity (cm^{-1})		FWHM (cm^{-1})	
$\nu_1(PO_4)$	CEBP035	964,25 ±	0,04	4,99 ±	0,12
	Durango	963,95 ±	—	5,93 ±	—
$\nu_1(SO_4)$	CEBP035	1002,49 ±	0,03	2,35 ±	0,23
	Durango	— ±	—	— ±	—
$\nu_2(PO_4)$	CEBP035	432,95 ±	0,91	4,42 ±	1,05
	Durango	444,97 ±	—	1,74 ±	—
$\nu_3(PO_4)$	CEBP035	1052,35 ±	0,06	6,11 ±	0,19
	Durango	1059,28 ±	—	7,04 ±	—
$\nu_4(PO_4)$	CEBP035	590,81 ±	0,03	5,87 ±	0,20
	Durango	580,43 ±	—	5,93 ±	—

Nota: Erro padrão calculado para $n = 10$ pontos na amostra CEBP035.

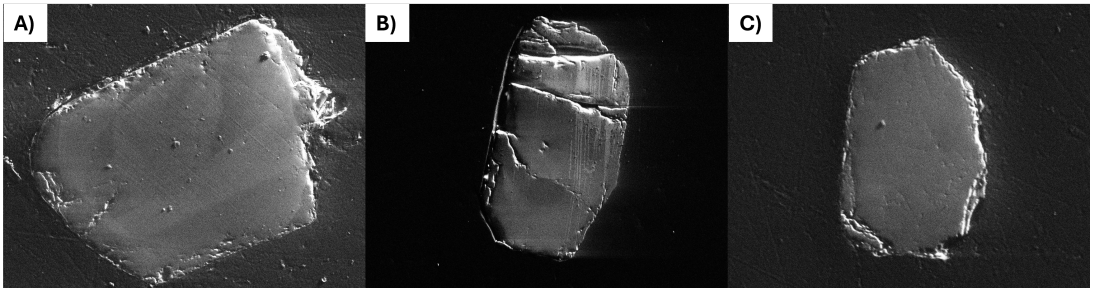
A largura à meia altura (FWHM) do modo $\nu_1(PO_4)$ é uma medida direta da ordem atômica. O valor de $4,99 \pm 0,12$ obtido para a amostra CEBP035 indica um baixo dano de radiação acumulado na rede.

5.1.2 Análise por Catodoluminescência (CL)

Enquanto a Espectroscopia Raman confirmou a integridade estrutural, a Catodoluminescência (CL) foi aplicada para investigar o zoneamento composicional e a textura interna dos grãos. A resposta à catodoluminescência variou significativamente entre os minerais e as províncias estudadas, influenciando diretamente a estratégia de seleção de *spots*.

Apatitas do Domínio SJC As apatitas das amostras BJ19C, CEBP321 e CEBP035 apresentaram, de modo geral, uma baixa resposta ao bombardeamento eletrônico. Diferente dos padrões clássicos de zoneamento, estas amostras revelaram estruturas internas sutis e zoneamentos químicos muito fracos (Figura 15). Procedimentos adicionais de recobrimento (*recoating*) foram aplicados na tentativa de otimizar a emissão luminescente, porém não resultaram em melhorias significativas no sinal. A luminescência predominante foi homogênea, com variações tonais mínimas.

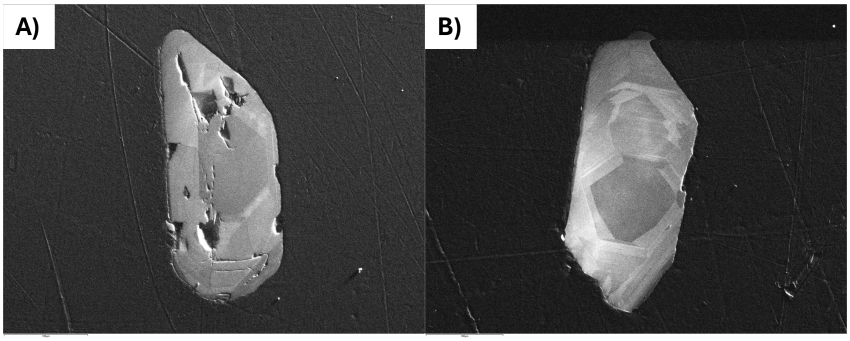
Figura 15 – Imagens de catodoluminescência (CL) de apatitas do Domínio SJC, amostras (A) CEBP035, (B) CEBP321 e (C) BJ19C.



Fonte: Elaborado pela autora.

Zircões da Província Carajás Em contraste com as apatitas, os zircões das amostras C16 e C23 exibiram uma resposta intensa e zoneamentos extremamente bem definidos (Figura 16).

Figura 16 – Imagens de catodoluminescência (CL) de zircões da Província Carajás, amostras (A) C16 e (B) C23.



Fonte: Elaborado pela autora.

Dessa forma, a integração entre o Micro-Raman e a CL assegurou que apenas cristais estruturalmente íntegros fossem selecionados para as etapas de geocronologia U-Pb e termocronologia por traços de fissão.

5.2 GEOCRONOLOGIA U-Pb

5.2.1 U-Pb em Apatita

Domínio São José do Campestre A geocronologia U–Pb em apatita foi aplicada às amostras do Domínio São José do Campestre com o objetivo de registrar eventos de alta temperatura associados à evolução térmica neoproterozoica da Província Borborema. Os resultados isotópicos e parâmetros estatísticos obtidos estão sumarizados na Tabela 3. A distribuição dos dados

isotópicos é apresentada nos diagramas de concórdia de Wetherill (Figura 17), nos quais a escala de cores representa a concentração de urânio (ppm) em cada ponto analítico.

Tabela 3 – Dados analíticos de U–Pb em apatita — Província Borborema.

Amostra	Idade de Concórdia (Ma)	χ^2_v (MSWD)	$P(\chi^2)$	N
BJ19C	569,8 ± 1,7	0,0078	0,93	52
CEBP035	538,6 ± 1,2	0,19	0,67	106
CEBP321	551,1 ± 1,2	0,0021	0,96	81

As razões isotópicas U–Pb revelam, em todas as amostras analisadas, a presença significativa de Pb comum (Pb_c), uma característica intrínseca da apatita, que incorpora chumbo não radiogênico durante a cristalização. Em consequência, as idades aparentes não corrigidas apresentam elevada dispersão e, em alguns casos, valores geologicamente irreais. Dessa forma, a aplicação da correção isocrônica de Pb comum (calculada internamente pelo software IsoplotR) é essencial para a obtenção de idades geologicamente interpretáveis. Os resultados corrigidos são representados em diagramas de concórdia de Wetherill (Figura 17), com uma escala de cor evidenciando a homogeneidade ou zoneamento das concentrações de urânio.

A amostra BJ19C apresenta forte dispersão nas idades não corrigidas, com valores que atingem até aproximadamente 2850 Ma. Após a aplicação da correção isocrônica, os dados definem uma isócrona bem estabelecida (Figura 17a), resultando em uma idade de concórdia de 569,8 ± 1,7 Ma ($N = 52$). A homogeneidade estatística do conjunto de dados, refletida no baixo valor de MSWD (0,0078), sustenta a robustez geológica da idade, interpretada como o registro do resfriamento regional ou da passagem da unidade pela isoterma de fechamento da apatita (∼450–500°C) associada à evolução tardia da Orogenia Brasiliana.

A amostra CEBP035 registra a idade U–Pb mais jovem do conjunto, com valor de 538,6 ± 1,2 Ma ($N = 106$), associado a um MSWD baixo (0,19) e elevada significância estatística ($P(\chi^2) = 0{,}67$). O elevado número de análises e a boa definição da isócrona (Figura 17b) conferem confiabilidade à idade obtida, interpretada como relacionada ao estágio final do resfriamento regional ou a pulsos térmicos tardios associados ao colapso pós-colisional da Província Borborema.

A amostra CEBP321 apresenta um conjunto de dados coerente, refletido por um MSWD

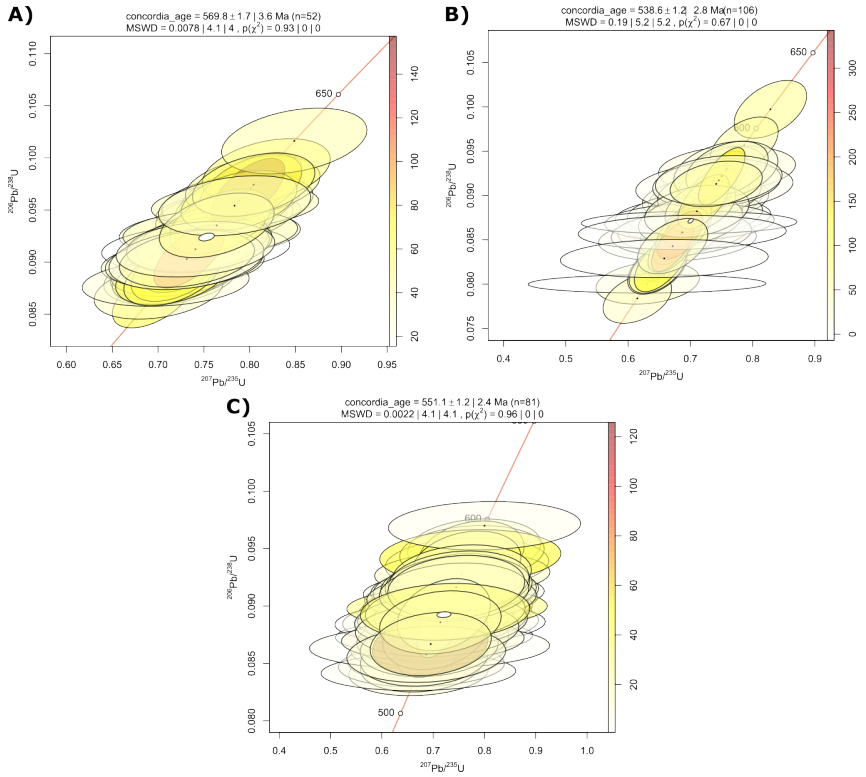


Figura 17 – Diagramas de concórdia Wetherill (U-Pb) para as amostras do Domínio SJC: (A) BJ19C ($569,8 \pm 1,7$ Ma); (B) CEBP-035 ($538,6 \pm 1,2$ Ma); (C) CEBP-321 ($551,1 \pm 1,2$ Ma). A escala de cores indica a concentração de Pb radiogênico (ppm).

extremamente baixo (0,0021) e elevada probabilidade estatística ($P(\chi^2) = 0{,}96$). O diagrama de concórdia corrigido (Figura 17c) define uma idade de concórdia de 551,1 ± 1,2 Ma ($N = 81$), interpretada como representativa de um estágio avançado do resfriamento pós-orogênico, imediatamente subsequente ao pico térmico Brasiliano, com fechamento efetivo do sistema U–Pb em apatita.

Província Mineral de Carajás Os resultados de U–Pb em apatita para a Província Mineral de Carajás foram divididos em dois conjuntos com base na qualidade do material: o primeiro, composto por grãos bem formados e transparentes, que apresentaram diferentes graus de concordância e dispersão após a correção de Pb comum; e o segundo, constituído por fragmentos de apatita porosos, que apresentaram maior complexidade isotópica e elevada dispersão estatística.

Grãos Bem Formados e Transparentes Para a amostra C16, os dados não corrigidos ($n = 44$) resultaram em uma idade de concórdia de 2182,6 ± 6,1 Ma, porém com um MSWD extremamente elevado de 210, indicando que a dispersão dos dados supera amplamente a

incerteza analítica. A aplicação da correção de Pb comum reduziu o MSWD para 0,45, resultando em uma idade de concórdia corrigida de 2041,4 ± 5,9 Ma. Os dados corrigidos e não corrigidos são apresentados em diagramas de concórdia Wetherill na Figura 18.

O mesmo procedimento foi aplicado à amostra C01 (CTND01/63.2) ($n = 71$). Após a correção de Pb comum, foi obtida uma idade de concórdia de aproximadamente 2256 Ma, embora o ajuste ainda apresente MSWD elevado, indicando dispersão significativa entre as análises. Os diagramas antes e após a correção de Pb comum são apresentados na Figura 19.

A amostra C02 (CTND01/59.78), por sua vez, apresentou comportamento isotópico fortemente disperso. Mesmo após a correção de Pb comum, as análises permaneceram distribuídas ao longo de uma ampla faixa da concórdia, não permitindo a obtenção de uma idade de concórdia única e estatisticamente robusta. Dessa forma, nenhuma idade U–Pb formal foi atribuída à C02, e seu diagrama de concórdia não é apresentado entre os resultados principais.

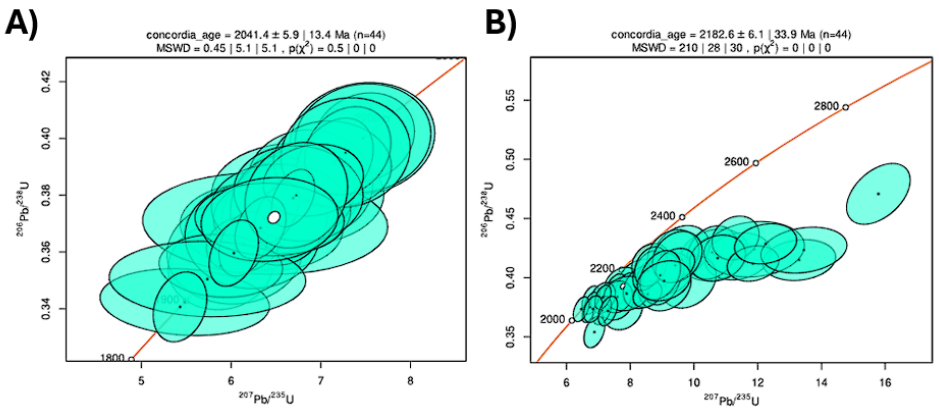


Figura 18 – Efeito da correção de Pb comum em diagramas Wetherill da amostra C16. (A) com correção e (B) sem correção de Pb comum.

A dispersão residual observada nessas apatitas evidencia a heterogeneidade do sistema U–Pb entre diferentes domínios analíticos. No caso da C01, apesar da obtenção de uma idade de concórdia, o MSWD elevado indica que as análises não constituem uma população isotopicamente homogênea. Para a C02, essa heterogeneidade é ainda mais pronunciada, impossibilitando a definição de uma idade única. Observações microscópicas revelaram zoneamento de traços de fissão (*track zoning*), sugerindo a presença de microdomínios distintos; entretanto, a relação entre esse zoneamento e a dispersão isotópica deve ser considerada com cautela.

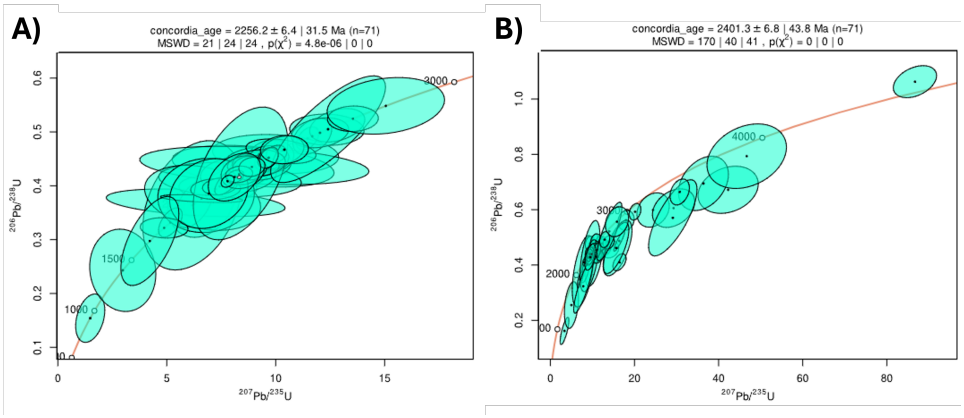


Figura 19 – Efeito da correção de Pb comum em diagramas Wetherill da amostra C01. (A) com correção e (B) sem correção de Pb comum.

Fragmentos de Apatita Porosos Em contraste com os grãos que forneceram resultados mais interpretáveis, os fragmentos porosos das amostras C18 e C19 apresentaram comportamento isotópico mais complexo.

Na amostra C18, a correção de Pb comum deslocou as análises para uma faixa de idades mais restrita, embora a dispersão residual tenha permanecido elevada. Assim, apesar da obtenção de uma idade de concórdia, o resultado deve ser interpretado com cautela devido à heterogeneidade isotópica do conjunto. Os diagramas após a correção de Pb comum (Figura 20A) e antes da correção (Figura 20B) evidenciam esse comportamento.

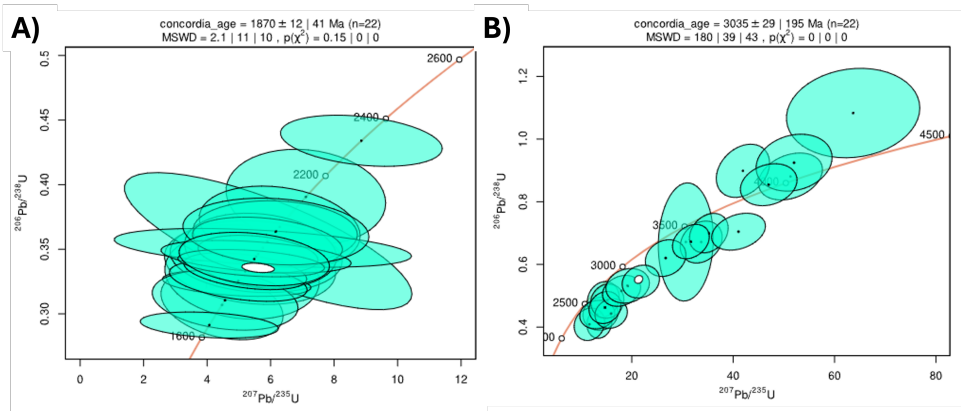


Figura 20 – Efeito da correção de Pb comum em diagramas Wetherill da amostra C18. (A) com correção e (B) sem correção de Pb comum.

A amostra C19 apresentou dispersão ainda mais pronunciada. Após a correção de Pb comum, diversos pontos produziram idades extremamente variáveis e, em alguns casos, valores sem significado geológico plausível. Esse comportamento indica que o sistema U–Pb dessa

amostra não forneceu uma solução cronológica robusta, impossibilitando a atribuição de uma idade única.

A porosidade e a heterogeneidade microestrutural observadas nesses fragmentos podem contribuir para maior sensibilidade à perda ou redistribuição de Pb e à influência de Pb comum, embora essas relações devam ser interpretadas com cautela. Os resultados reforçam, portanto, a importância da caracterização pré-analítica dos cristais e da avaliação crítica da qualidade dos dados antes da interpretação geocronológica.

5.2.2 U-Pb em Zircão

Ao contrário da resiliência estrutural observada na apatita, as amostras de zircão arqueanas da Província de Carajás (C16, C20 e C23; $> 2,7$ Ga) exibem uma degradação significativa da rede cristalina (metamictização) acumulada ao longo do tempo geológico. A análise comparativa entre as populações revela que o ataque químico superficial (utilizado originalmente para a revelação de traços de fissão) desempenhou um papel metodológico atuando como uma ferramenta de triagem estrutural antes das análises por LA-ICP-MS.

A comparação entre os grãos atacados e não atacados evidencia diferenças no comportamento isotópico entre as condições analisadas (Tabela 4). Nos grãos não atacados, a ausência de feições superficiais reveladas pelo ataque químico limita a identificação visual de domínios potencialmente afetados por danos de radiação, tornando menos direcionada a seleção dos pontos de ablação.

O ataque químico torna algumas dessas heterogeneidades estruturais mais facilmente identificáveis ao operador, permitindo utilizar as feições reveladas como guia para o posicionamento dos *spots* durante as análises *in situ* por LA-ICP-MS.

Como resultado, a utilização do ataque químico como guia visual permitiu direcionar os *spots* de ablação para domínios estruturalmente mais preservados. Os efeitos desse procedimento sobre os resultados isotópicos variaram entre as amostras, produzindo alterações nas idades de interseção superior e nos parâmetros estatísticos, sem uma tendência uniforme entre todos os conjuntos analisados (Tabela 4).

Na amostra C16, a população não atacada apresentou uma linha de discórdia com in-

Tabela 4 – Síntese dos resultados isotópicos de U–Pb em zircão comparando a dispersão do modelo de população equivalente ($MSWD_{conc}$) com o ajuste da regressão linear ($MSWD_{reta}$).

Amostra	Condição	n	Inters. Sup. (Ma)	$\pm 1\sigma$ (Ma)	$MSWD_{conc}$ [1]	$MSWD_{reta}$ [2]	*Age Offset* (Ma)
C16	Não atacado	24	2778,0	24,0	130,0	1,50	-18,0
	Atacado	45	2760,0	9,0	85,0	0,42	
C20	Não atacado	21	2730,8	9,6	0,67	0,62	+15,2
	Atacado	21	2746,0	12,0	83,0	0,55	
C23	Não atacado	31	2743,0	11,0	86,0	0,47	0,0
	Atacado	34	2743,0	11,0	85,0	0,70	

Nota: *n* = número de pontos analíticos por LA-ICP-MS; Inters. Sup. = Idade de Interseção Superior (*Upper Intercept*).
[1] $MSWD_{conc}$: Média dos quadrados dos desvios ponderados testando a hipótese de população equivalente/ponto único de concórdia (Ludwig, 1998).
[2] $MSWD_{reta}$: MSWD do ajuste da linha de regressão linear no diagrama de discórdia (Vermeesch, 2018). O *age offset* representa a variação na idade de interseção superior obtida após a triagem visual e remoção de domínios metamictizados ($Idade_{Atacado} - Idade_{Não\ atacado}$).

terseção superior de $2778,0 \pm 24,0$ Ma (Figura 21A e B). O ajuste pelo modelo de ponto único de concórdia resultou em $MSWD_{conc} = 130,0$, enquanto a regressão linear forneceu $MSWD_{reta} = 1,50$. Na alíquota submetida ao ataque químico, a interseção superior foi determinada em $2760,0 \pm 9,0$ Ma, com $MSWD_{reta} = 0,42$ e $MSWD_{conc} = 85,0$. O desvio entre os interceptos superiores (*age offset*) foi de $-18,0$ Ma, acompanhado por uma redução no erro analítico associado de $\pm 24,0$ Ma para $\pm 9,0$ Ma.

Para a amostra C20, a população não atacada forneceu uma idade de interseção superior de $2730,8 \pm 9,6$ Ma ($MSWD_{reta} = 0,62$; $MSWD_{conc} = 0,67$; Figura 21D). Na alíquota atacada, a interseção superior deslocou-se para $2746,0 \pm 12,0$ Ma ($MSWD_{reta} = 0,55$; $MSWD_{conc} = 83,0$; Figura 21C), registrando um *age offset* de $+15,2$ Ma. Esse deslocamento associa-se à alteração dos pontos de ablação em relação a domínios metamictizados pré-existentes.

A amostra C23 apresentou idades de interseção superior idênticas para ambas as alíquotas, fixadas em $2743,0 \pm 11,0$ Ma (*age offset* de $0,0$ Ma; Figura 21E e F). Os ajustes das regressões lineares forneceram $MSWD_{reta} = 0,47$ (não atacado) e $MSWD_{reta} = 0,70$ (atacado), contrastando com a dispersão sob o modelo de população equivalente ($MSWD_{conc} = 86,0$ e $85,0$, respectivamente).

Nas amostras arqueanas da Província Mineral de Carajás, a distribuição das análises nos grãos não atacados reflete a amostragem de microdomínios metamictizados e a consequente perda

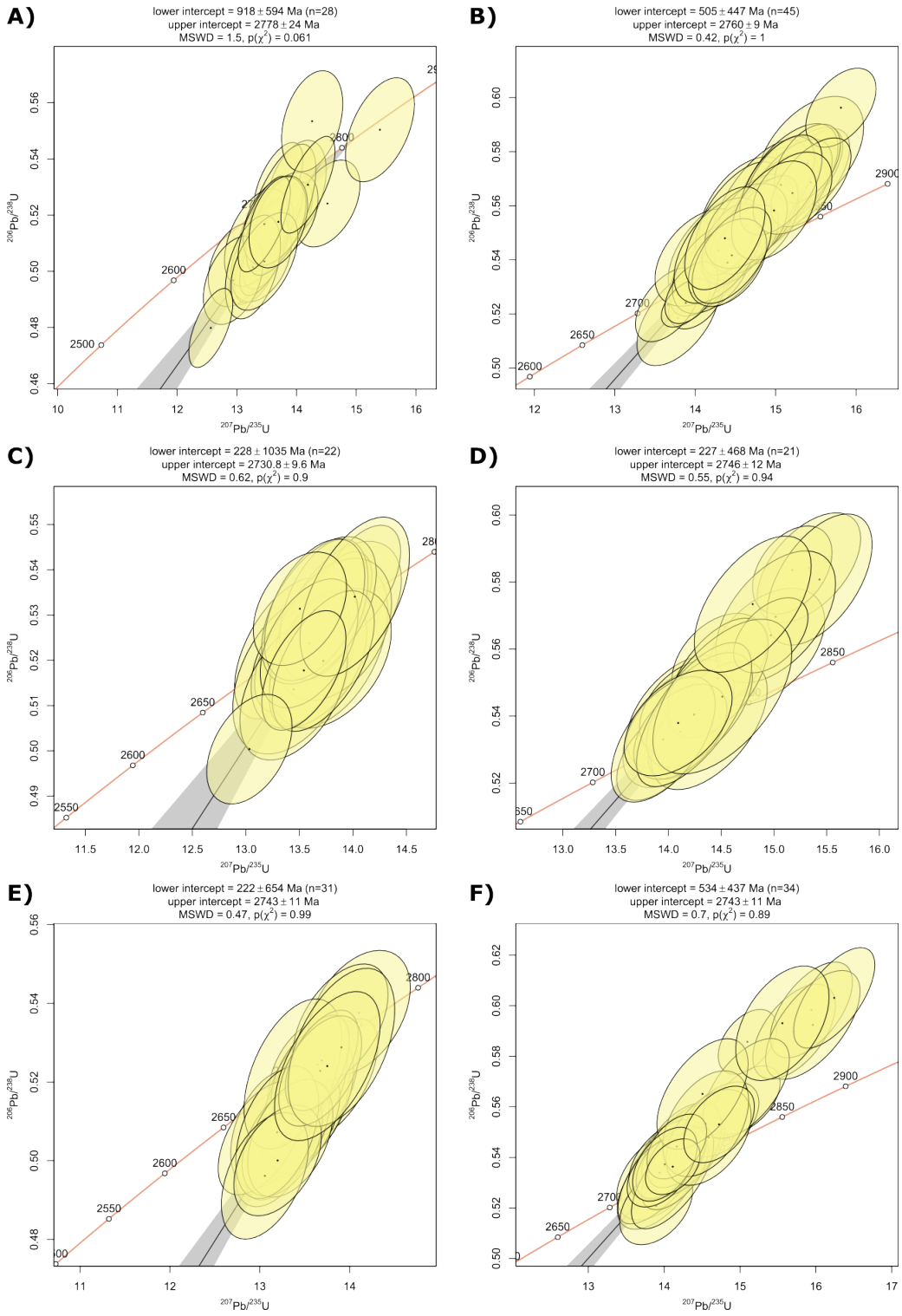


Figura 21 – Diagramas de concórdia de Wetherill (U–Pb) com linhas de discórdia e idades de interseção superior para as amostras de zircão C16 (A, B), C20 (C, D) e C23 (E, F). Coluna da esquerda: grãos não atacados; coluna da direita: grãos atacados.

de Pb radiogênico por sistema aberto. O tratamento por ataque químico permitiu a identificação visual de tais feições e o direcionamento dos pontos de ablação para zonas cristalinas preservadas. Consequentemente, a aplicação do modelo de regressão linear resultou em ajustes caracterizados por $\mathrm{MSWD}_{\mathrm{reta}} \leq 1,50$, permitindo a determinação das idades de interseção superior para os protólitos analisados.

5.3 TERMOCRONOLOGIA TFLA e (U-Th)/He

5.3.1 TFLA em Apatita

Domínio São José do Campestre As idades de Traços de Fissão em Apatita obtidas por LA-ICP-MS para as amostras do Domínio São José do Campestre concentram-se majoritariamente no intervalo do Cretáceo Inferior ao Cretáceo Superior, indicando um episódio regional de resfriamento através da janela de estabilidade dos traços de fissão em apatita (aproximadamente 110–120 °C). As idades TFLA variam entre 124 ± 4 Ma e 71 ± 3 Ma, refletindo diferenças espaciais e/ou cinéticas no histórico térmico do domínio.

A amostra BJ19C forneceu uma idade média TFLA de 124 ± 4 Ma, interpretada como o registro da passagem do sistema pela isoterma de traços de fissão durante o Cretáceo Inferior. Quando integrada à idade U–Pb em apatita (apresentada anteriormente), essa idade indica um intervalo prolongado de resfriamento lento desde o Neoproterozoico até o Mesocretáceo, compatível com estabilidade térmica crustal seguida por exumação progressiva associada à ruptura continental.

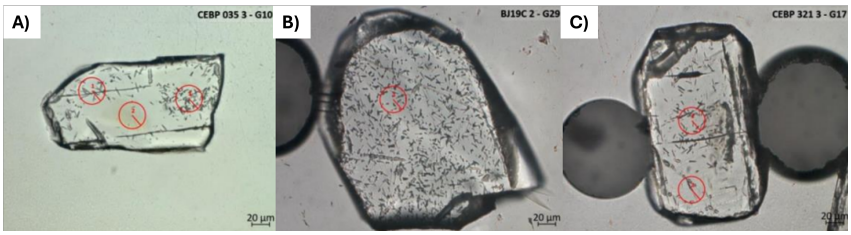


Figura 22 – Distribuição de traços de fissão em apatitas do Domínio SJC após ataque químico. (A) CEBP035; (B) BJ19C; (C) CEBP321.

A amostra CEBP321 apresentou uma idade TFLA de 120 ± 5 Ma, dentro do erro daquela obtida para a BJ19C. A concordância entre as idades TFLA dessas duas amostras sugere

que porções significativas do Domínio São José do Campestre experimentaram um evento de resfriamento relativamente síncrono no Mesocretáceo.

Em contraste, a amostra CEBP035 revelou uma idade TFLA significativamente mais jovem, de 71 ± 3 Ma, posicionando o resfriamento dessa porção do domínio no Cretáceo Superior. Para compreender a origem dessa discrepância — e avaliar se ela representa um evento geológico local ou um controle cinético/composicional —, foi realizada uma caracterização isotópica e estrutural detalhada intra-grão.

Província Mineral de Carajás As análises de Traços de Fissão em Apatita (TFLA) via LA-ICP-MS revelaram histórias térmicas complexas para todas as amostras da Província Mineral de Carajás, caracterizadas por uma significativa dispersão estatística das idades de grãos individuais.

A amostra C16 (CMTM06) ($n = 38$) apresentou uma idade central de 72 ± 16 Ma. Contudo, seu diagrama radial (Figura 23) exibe uma dispersão de 65% (MSWD = 13), com idades individuais variando de 17,2 Ma a 366,6 Ma.

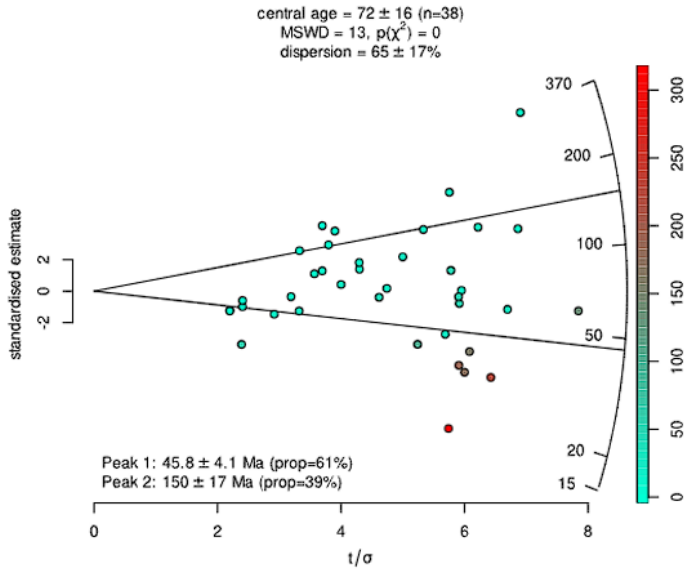


Figura 23 – *Radial plot* de idades TFLA e concentração de Urânio em apatita — Amostra C16.

As amostras C02 ($n = 25$) e C01 ($n = 68$) exibiram complexidade ainda maior (MSWD de 9,7 e 30, respectivamente). Suas distribuições de idade são descritas como misturas de pelo menos duas populações distintas (Figura 24). Ambas compartilham um pico dominante no Cretáceo (∼129–132 Ma), mas diferem nos componentes herdados: a amostra C02 preserva um

pico Paleozoico (∼454 Ma), enquanto a C01 retém um pico Neoproterozoico (∼784 Ma).

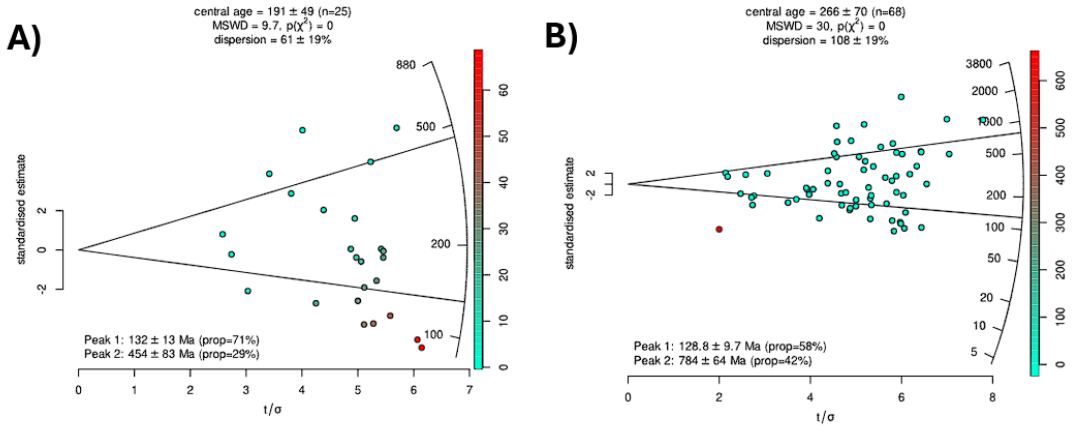


Figura 24 – *Radial plots* de idades TFLA e concentração de Urânio em apatita — (A) Amostra C02 e (B) Amostra C01.

Uma tendência inversa entre a concentração de U e as idades TFLA foi observada em parte das análises. Esse comportamento pode estar relacionado à influência do dano por radiação na estabilidade térmica dos traços, embora outros fatores também possam contribuir para a dispersão observada.

5.3.2 TFLA em Zircão

Província Mineral de Carajás As análises de Traços de Fissão em zircão na Província Mineral de Carajás fornecem informações sobre a história de resfriamento em uma janela de temperatura intermediária (∼ 240 °C), estabelecendo uma ligação entre os registros de cristalização magmática e os eventos posteriores de resfriamento. Os resultados apresentam diferentes graus de dispersão entre as amostras, evidenciando a complexidade das populações analisadas.

A amostra C16 ($n = 43$) apresentou idade central de 758 ± 81 Ma, com MSWD = 7,9 e dispersão de 33,5%, indicando que as idades individuais não constituem uma população estatisticamente homogênea (Figura 25A). Comportamento semelhante foi observado nas amostras C23, com idade central de 988 ± 131 Ma e MSWD = 9,6, e C20, com idade central de 1154 ± 178 Ma e MSWD = 8,3.

A amostra E01 ($n = 47$) apresentou uma distribuição comparativamente mais concentrada,

com idade central de 443 ± 30 Ma, MSWD = 4,1 e dispersão de 20,7% (Figura 25B). Apesar da menor dispersão em relação às amostras C16, C20 e C23, o MSWD ainda indica variabilidade superior à esperada para uma população estatisticamente homogênea. Os resultados das demais amostras são sintetizados na Tabela 5.

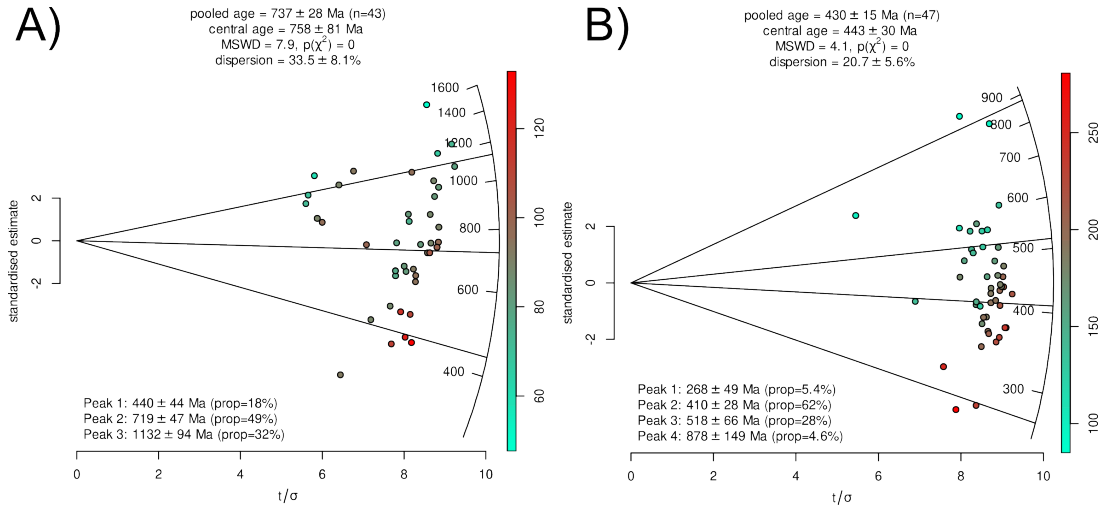


Figura 25 – *Radial plots* de idades TFLA e concentração de Urânio em zircão — (A) Amostra C16 e (B) Amostra E01.

Tabela 5 – Síntese dos resultados de Traços de Fissão em zircão (TFLA) — Província Mineral de Carajás.

Amostra	Idade Central (Ma)	MSWD	n
C11	574 ± 88	1,1	8
C15	837 ± 100	0,58	14
C16	758 ± 81	7,9	43
C20	1154 ± 178	8,3	20
C23	988 ± 131	9,6	34
E01	443 ± 30	4,1	47
E06	490 ± 45	7,3	47

5.3.3 (U-Th)/He em Apatita

Domínio São José do Campestre A datação pelo método (U–Th)/He em cristais de apatita foi aplicada para registrar o estágio final de resfriamento das amostras do Domínio São José do Campestre, correspondente à passagem pela isoterma de aproximadamente 60–70 °C. Os resultados das idades médias por amostra estão sintetizados na Tabela 6.

As idades médias obtidas para as amostras BJ19C (97,2 Ma) e CEBP321 (89,4 Ma) apresentam-se consistentes com a hierarquia termocronológica regional, situando-se em idades mais jovens que as obtidas por Traços de Fissão (∼120–124 Ma).

Tabela 6 – Resultados de datação (U-Th)/He em apatita — Domínio São José do Campestre.

Amostra	**Idade Média (I_m)**	**Erro ($\pm 1\sigma$)**	**Desvio Padrão (s)**	**n**
BJ19C	97,2 Ma	± 5,8 Ma	15,3 Ma	7
CEBP035	88,8 Ma	± 2,9 Ma	8,3 Ma	8
CEBP321	89,4 Ma	± 6,8 Ma	16,8 Ma	6

Entretanto, a amostra CEBP035 revelou uma idade média (U–Th)/He de 88,8 Ma, evidenciando uma inversão termocronológica em relação à sua idade TFLA (71 ± 3 Ma). Conforme discutido anteriormente, o sistema (U–Th)/He deveria registrar idades mais jovens que o sistema de traços de fissão, dada sua menor temperatura de fechamento.

Província Mineral de Carajás Os resultados obtidos pelo método (U–Th)/He em apatitas da Província Mineral de Carajás refletem a etapa final de resfriamento crustal da região. Contudo, os dados apresentam uma dispersão estatística acentuada, conforme sumarizado na Tabela 7, o que está diretamente relacionado à qualidade física e às características mineralógicas dos grãos selecionados.

Tabela 7 – Resultados de datação (U-Th)/He em apatita — Província Mineral de Carajás.

Amostra	**Idade Média (I_m)**	**Erro ($\pm 1\sigma$)**	**Desvio Padrão (s)**	**n**
55-02	286,2 Ma	± 32,8 Ma	73,4 Ma	5
55-12	381,4 Ma	± 162,3 Ma	362,9 Ma	5
C01	47,1 Ma	± 9,2 Ma	22,6 Ma	6
C02	159,4 Ma	± 21,3 Ma	56,3 Ma	7
C16	111,4 Ma	± 17,9 Ma	35,9 Ma	4
C17	65,9 Ma	± 6,8 Ma	15,3 Ma	5
C18	4,4 Ma	± 2,5 Ma	6,6 Ma	7
C19	3161,1 Ma	± 729,5 Ma	1631,2 Ma	5

Idade média aritmética; Erro calculado como erro padrão da média ($\sigma/\sqrt{n}$).

Análise de Grãos Bem Formados (C16, C01 e C02) As amostras compostas por cristais transparentes e euédricos forneceram idades médias que variam entre o Mesocretáceo e o Paleógeno. A amostra C16 resultou em uma idade média de 111,4 ± 17,9 Ma. Apesar da exclusão de *outliers* (idades extremas variando de 11 Ma a 9793 Ma), o erro padrão reflete a heterogeneidade intrínseca dos grãos. De modo análogo, as amostras C01 (47,1 ± 9,2 Ma) e C02 (159,4 ± 21,3 Ma) corroboram um histórico de resfriamento final tardio para a PMC.

Impacto da Porosidade e Fragmentação (C17, C18 e C19) As amostras consistindo em fragmentos porosos (C17, C18 e C19) apresentaram resultados que não possuem significado geocronológico direto, servindo apenas como indicadores do grau de alteração física dos cristais. Por um lado, a alta porosidade e área superficial facilitam a lixiviação natural e a perda total do gás, resultando em idades artificialmente jovens, como na amostra C18 (4,4 Ma). Por outro lado, grãos com essa mesma qualidade óptica ruim frequentemente abrigam microinclusões refratárias (zircão/monazita), gerando um excesso de hélio herdado que eleva as idades para valores geologicamente irreais, a exemplo da amostra C19 (3161 Ma).

A magnitude extrema do erro padrão nesta amostra (± 729,5 Ma) e a discrepância com a realidade geológica da Província Mineral de Carajás confirmam a inviabilidade do uso de fragmentos porosos para reconstruções termocronológicas. Tais dados foram descartados das interpretações de exumação, reforçando que apenas grãos hígidos e bem formados (como os das amostras C16, C01 e C02) fornecem sinais de resfriamento confiáveis.

5.4 Controles Microquímicos e Estruturais nas Idades TFLA

A caracterização isotópica via LA-ICP-MS revelou assinaturas químicas distintas que explicam o comportamento cinético das amostras. A amostra BJ19C (Figura 26A) exibe distribuições uniformes de traços de fissão ao longo das superfícies dos cristais, o que indica a ausência de gradientes internos significativos de urânio. Em contrapartida, a amostra jovem CEBP035 (Figura 26B) apresenta um zoneamento marcante na densidade de traços, correlacionado a um forte enriquecimento localizado de urânio.

Amostra BJ19C: Esta amostra exibe uma distribuição composicional homogênea (Ta-

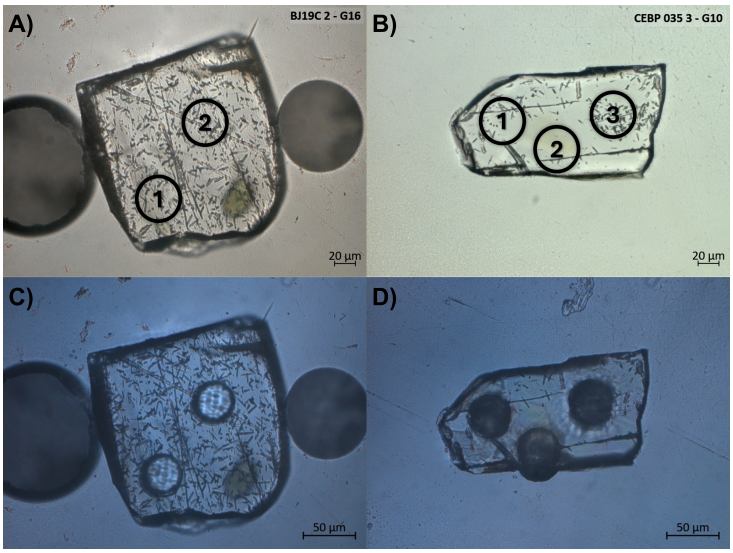


Figura 26 – Fotomicrografias ópticas de grãos de apatita. (A) Grão BJ19C-G16 com traços homogêneos. (B) Grão CEBP035-G10 com zoneamento de traços e pontos alvos de U. (C, D) Grãos A e B pós-LA-ICP-MS destacando os spots de ablação.

Fonte: Elaborada pela autora.

bela 8). As concentrações de urânio situam-se na faixa restrita entre 30 e 65 ppm. O grão G16, por exemplo, forneceu concentrações de U de $55,03$ ppm (ponto 1) e $63,45$ ppm (ponto 2), sem variação significativa na densidade de traços. As idades U-Pb intra-grão são estatisticamente indistinguíveis dentro da incerteza analítica, resultando em uma idade de concórdia de Wetherill altamente precisa de $569,8 \pm 1,7$ Ma (Figura 17A) com baixo MSWD (0,007). Isso indica que os domínios preservam uma rede cristalina íntegra e fechada, justificando a preservação da idade TFLA mais antiga (124 Ma).

Amostra CEBP035: Em contrapartida, análises intragranulares revelam uma pronunciada heterogeneidade química. No grão G83, as concentrações de urânio saltam de $58,94$ ppm para $232,00$ ppm em um espaço micrométrico (Tabela 9), acompanhando um halo denso de traços de fissão. Esse aumento drástico na concentração de urânio provoca pequenos desvios (*offsets*) nas idades U-Pb localizadas (Figura 17B) e, mais importante, aumenta exponencialmente o dano por radiação na rede cristalina.

Para avaliar a resposta estrutural associada ao enriquecimento em U, realizou-se o mapeamento Raman e a Catodoluminescência (CL) no grão CEBP035-G01 (Figura 27). A imagem de CL revela forte zoneamento de crescimento primário. O ponto enriquecido em U

Tabela 8 – Dados analíticos de LA-ICP-MS combinados e parâmetros de traços de fissão para grãos de apatita da amostra BJ19C.

Grão - Ponto	U (ppm)	Th (ppm)	Idade U-Pb (Ma)	N_s	A (μm^2)	ρ_s (10^6 tr/cm^2)
G03 - 1	63,99	34,62	$562,1 \pm 8,5$	59	1711,3	$3,33 \pm 0,44$
G03 - 2	30,69	14,50	$586,4 \pm 10,8$	60	1711,3	$2,45 \pm 0,38$
G04 - 1	54,36	19,40	$618,8 \pm 10,3$	57	1711,3	$3,68 \pm 0,46$
G15 - 1	20,67	13,34	$685,1 \pm 14,5$	42	1711,3	$3,57 \pm 0,76$
G15 - 2	49,31	39,80	$634,2 \pm 11,0$	22	616,1	$4,22 \pm 0,41$
G16 - 1	55,03	19,83	$605,8 \pm 10,5$	104	2464,2	$3,45 \pm 0,45$
G16 - 2	63,45	24,42	$624,1 \pm 10,5$	63	1711,3	$3,51 \pm 0,45$
G36 - 1	54,11	25,08	$593,5 \pm 10,2$	80	1711,3	$4,67 \pm 0,52$
G44 - 1	49,18	29,95	$594,1 \pm 10,3$	38	1711,3	$2,22 \pm 0,36$

Nota: N_s = número de traços de fissão espontâneos contados; A = área analisada (μm^2); ρ_s = densidade de traços de fissão espontâneos expressa em $\times 10^6$ traços/cm^2. As incertezas em ρ_s são de 1σ e derivadas da estatística de contagem assumindo uma distribuição de Poisson. As concentrações de U e Th foram obtidas por LA-ICP-MS. As idades U–Pb são reportadas com incertezas analíticas de 1σ.

Tabela 9 – Dados analíticos de LA-ICP-MS combinados e densidade de traços de fissão (ρ_s) para grãos de apatita da amostra CEBP035.

Grão - Ponto	U (ppm)	Th (ppm)	Idade U-Pb (Ma)	N_s	A (μm^2)	ρ_s (10^6 tr/cm^2)
G10 - 1	57,06	35,18	$576,4 \pm 9,0$	8	1089,0	$0,73 \pm 0,26$
G10 - 3	112,19	123,54	$554,3 \pm 7,3$	60	1232,1	$4,87 \pm 0,63$
G16 - 1	111,02	120,17	$594,5 \pm 8,3$	31	616,1	$5,03 \pm 0,90$
G16 - 2	128,01	135,57	$538,1 \pm 7,5$	7	616,1	$1,14 \pm 0,43$
G36 - 1	140,93	199,79	$532,5 \pm 6,6$	33	616,1	$5,36 \pm 0,93$
G36 - 2	115,29	145,92	$549,8 \pm 7,1$	4	616,1	$0,65 \pm 0,32$
G54 - 1	94,16	86,78	$587,8 \pm 8,1$	8	616,1	$1,30 \pm 0,46$
G54 - 2	77,77	84,76	$575,1 \pm 8,3$	48	1095,2	$4,38 \pm 0,63$
G61 - 1	28,81	42,88	$595,5 \pm 11,1$	32	1711,3	$1,87 \pm 0,33$
G61 - 2	29,25	46,67	$595,2 \pm 11,0$	30	1711,3	$1,75 \pm 0,32$
G70 - 1	70,47	104,04	$572,2 \pm 8,3$	21	616,1	$3,41 \pm 0,74$
G70 - 2	87,55	116,38	$589,0 \pm 8,5$	26	616,1	$4,22 \pm 0,83$
G82 - 1	192,13	195,98	$551,1 \pm 7,2$	71	1711,3	$4,15 \pm 0,49$
G82 - 2	115,45	123,17	$556,3 \pm 7,9$	17	1711,3	$0,99 \pm 0,24$
G83 - 1	58,94	49,76	$585,4 \pm 9,4$	14	1711,3	$0,82 \pm 0,22$
G83 - 2	232,00	239,52	$546,4 \pm 7,1$	26	1711,3	$1,52 \pm 0,30$

Nota: N_s = número de traços de fissão espontâneos contados; A = área analisada (μm^2); ρ_s = densidade de traços de fissão espontâneos expressa em $\times 10^6$ traços/cm^2. As incertezas em ρ_s são de 1σ e derivadas da estatística de contagem assumindo uma distribuição de Poisson. As concentrações de U e Th foram obtidas por LA-ICP-MS. As idades U–Pb são reportadas com incertezas analíticas de 1σ.

(≈ 146,0 ppm) apresenta aumento sutil na largura total à meia altura no Raman (FWHM ≈ 4,4 cm^{-1}) em comparação com a zona depletada em U (≈ 3,2 cm^{-1}). Essas diferenças sugerem variações estruturais locais no cristal e são compatíveis com a influência do acúmulo de danos por radiação. Esse efeito pode contribuir para diferenças no comportamento cinético dos traços de fissão e, consequentemente, para a idade TFLA mais jovem observada na amostra CEBP035 (71 Ma), embora os dados disponíveis não permitam atribuir essa diferença exclusivamente à concentração de U.

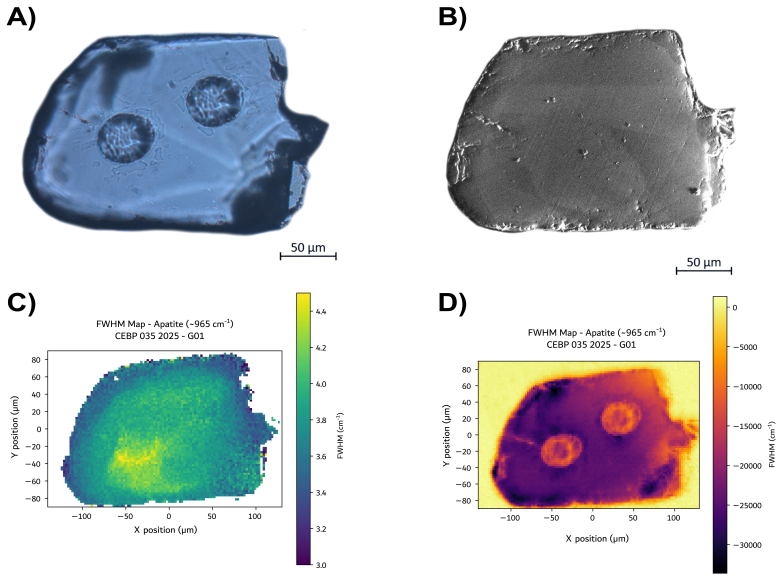


Figura 27 – Caracterização multianalítica da apatita CEBP035-G01. (A) Imagem de CL pré-ablação exibindo zoneamento interno primário. (B) Fotomicrografia óptica pós-ablação indicando os pontos de LA-ICP-MS. (C) Mapa de FWHM de Raman destacando a deformação cristalina no núcleo. (D) Mapa de intensidade de Raman mostrando a ordem estrutural da superfície.

6 DISCUSSÃO INTEGRADA E SÍNTESE DOS RESULTADOS

A integração dos dados obtidos pelos diferentes cronômetros (U–Pb, TFLA e (U–Th)/He) permitiu reconstruir as trajetórias tempo-temperatura ($t - T$) de longo prazo e validar a eficácia do protocolo de *Triple Dating* em diferentes contextos geológicos.

6.1 Evolução Térmica Regional: Domínio São José do Campestre

No Domínio São José do Campestre, os resultados revelam um histórico de resfriamento regional monotônico e lento, típico de áreas tectonicamente estáveis pós-orogenia. As idades U–Pb em apatita, situadas entre 573 Ma e 539 Ma, registram o fechamento do sistema isotópico em alta temperatura ($>$ 450–500 °C) logo após o pico do Ciclo Brasiliano. Essa variação sistemática reflete a heterogeneidade térmica do domínio e demonstra que a apatita é um geocronômetro sensível para registrar estágios intermediários da evolução crustal.

A transição para o regime de baixa temperatura é marcada pelo resfriamento cretáceo. Para as amostras BJ19C e CEBP321, observa-se uma concordância robusta na hierarquia termocronológica (U–Pb $>$ TFLA $>$ He), com idades (U–Th)/He entre 97,2 Ma e 89,4 Ma. Esse cenário é compatível com a exumação associada à abertura do Oceano Atlântico Sul.

Contudo, a amostra CEBP035 revelou uma aparente inversão termocronológica, onde a idade TFLA (71 Ma) é mais jovem que a idade (U–Th)/He (88,8 Ma). Embora o comportamento padrão preveja idades de He mais jovens devido à sua menor temperatura de fechamento, a análise detalhada dos dados intragranulares (Tabela 9) e a caracterização microestrutural (Figura 27) revelam que esta amostra pode ser, na verdade, um caso de estudo sobre o efeito do dano de radiação na cinética de retenção isotópica.

O enriquecimento localizado em urânio observado na amostra CEBP035, com concentrações de até 232 ppm, sugere a possibilidade de maior acúmulo de danos por radiação em determinados domínios da rede cristalina. Segundo o modelo RDAAM (*Radiation Damage Accumulation and Annealing Model*) proposto por Flowers et al. (2009), o acúmulo de danos estruturais pode modificar a difusividade e a retenção de hélio na apatita. Nesse contexto, os valores de FWHM observados no mapeamento Raman de um grão representativo são compatíveis com a existência de variações estruturais locais que podem influenciar o comportamento dos cronômetros de baixa temperatura.

A inversão observada entre a idade TFLA (71 Ma) e a idade (U–Th)/He (88,8 Ma) pode, portanto, estar relacionada, ao menos em parte, à influência do dano por radiação sobre a cinética de retenção isotópica. Entretanto, como a caracterização Raman foi realizada em um número

limitado de domínios e não constitui uma avaliação sistemática de toda a população de grãos, essa relação deve ser considerada uma hipótese compatível com os dados, e não uma demonstração direta do mecanismo responsável pela inversão termocronológica.

6.2 Desafios Analíticos e Aplicação na Província Mineral de Carajás

Em contraste com a estabilidade do Domínio São José do Campestre, a Província Mineral de Carajás (PMC) impôs desafios analíticos significativos devido à sua evolução polifásica e à qualidade física dos minerais. A complexidade microestrutural das apatitas de Carajás — intensamente fraturadas, porosas e com elevado histórico de contaminação — refletiu-se na alta dispersão estatística e em anomalias nas idades de baixa temperatura.

A amostra C16 ilustra perfeitamente essa complexidade cinética. Enquanto o sistema U–Pb em zircão ancorou a cristalização no Arqueano ($\sim 2,78$ Ga) e a apatita registrou o evento magmático-hidrotermal paleoproterozoico ($\sim 2,04$ Ga), as idades de baixa temperatura exibiram uma inversão na hierarquia termocronológica clássica, onde a idade (U–Th)/He ($111,4 \pm 17,9$ Ma) se apresentou substancialmente mais antiga do que a idade TFLA (72 ± 16 Ma). A exemplo das feições identificadas na amostra CEBP035, esse comportamento não aponta necessariamente para um erro analítico, mas é condizente com os efeitos do acúmulo de dano por radiação na rede cristalina da apatita. Em cristais antigos submetidos a regimes de baixa temperatura por períodos prolongados, o decaimento contínuo de U e Th pode gerar microdefeitos estruturais que tendem a atuar como armadilhas (traps) para o hélio radiogênico. De acordo com as premissas do modelo RDAAM (Flowers et al., 2009), o aprisionamento do gás nessas feições pode elevar a energia de ativação e a temperatura de fechamento do sistema (U–Th)/He, inibindo localmente a difusão e favorecendo a retenção de hélio em condições térmicas superiores às tipicamente associadas ao recozimento de traços de fissão. Ademais, discrepâncias atípicas — como a idade (U–Th)/He de ~ 3161 Ma na amostra C19 — sugerem a possível influência sobreposta de hélio herdado, potencialmente associado a inclusões fluidas ou minerais aprisionados em domínios porosos do cristal.

Sob a perspectiva metodológica e da ciência dos materiais, os resultados de zircão suge-

rem que valores baixos de MSWD, isoladamente, não são suficientes para avaliar a integridade estrutural da rede cristalina. A amostra C20 exemplifica essa limitação, uma vez que a condição não atacada apresentou baixo MSWD de concórdia, enquanto o ataque químico modificou tanto a idade de interseção superior quanto os parâmetros estatísticos do conjunto.

As diferenças observadas entre as populações atacadas e não atacadas indicam que o ataque químico pode auxiliar na identificação visual de domínios com diferentes graus de preservação estrutural. Entretanto, sua influência sobre os resultados isotópicos não foi uniforme entre as amostras. Na C16, observou-se redução da incerteza analítica e alteração da idade de interseção superior; na C20, o ataque também modificou a idade obtida, enquanto na C23 as idades permaneceram essencialmente inalteradas. Dessa forma, o procedimento deve ser interpretado como uma ferramenta auxiliar de triagem estrutural e seleção dos pontos de ablação, e não como um método que necessariamente melhora a concordância ou produz idades mais confiáveis em todos os casos.

O uso das feições reveladas pelo ataque químico como guia para o posicionamento do laser pode auxiliar na identificação de domínios com diferentes graus de alteração estrutural. Conforme discutido por Moreto et al. (2011) para a região de Carajás, a ablação em zonas fortemente afetadas pode estar associada a alterações no comportamento isotópico. Nesse sentido, a utilização do ataque como ferramenta visual de triagem pode contribuir para um posicionamento mais criterioso dos pontos analíticos, embora os resultados obtidos neste trabalho mostrem que seu efeito varia entre as diferentes amostras.

6.3 Validação e Aprimoramento do Workflow de Redução de Dados

A robustez da rotina laboratorial (Python/Excel) foi testada com o pacote KJ por meio de uma comparação direta utilizando a amostra C16 (Tabela 10).

Tabela 10 – Comparação de razões isotópicas brutas (Amostra C16): Protocolo Interno vs. KJ.

Razão Isotópica	Rotina Interna	Rotina KJ	Diferença (%)
$^{238}U/^{206}Pb$	2,9231 ± 0,0895	2,5132 ± 0,0521	16,31%
$^{207}Pb/^{206}Pb$	0,1508 ± 0,0152	0,1644 ± 0,0050	8,27%

As divergências observadas na amostra C16 (16,31% para U/Pb e 8,27% para Pb/Pb) são atribuídas à sensibilidade dos algoritmos perante sinais heterogêneos e elevado Pb comum (Pb_c). Atualmente, a rotina interna baseia-se em médias lineares de sinais aprovados em triagem visual. Em contrapartida, o pacote *KJ* utiliza modelagens físicas mais complexas para tratar o *downhole fractionation* (fracionamento dependente da profundidade da cratera de laser) e a deriva instrumental (*drift*) de forma interpolada.

A comparação com o pacote *KJ* evidenciou que o tratamento de fracionamento (*downhole*) e deriva instrumental via modelagem física é o caminho para a redução das incertezas em amostras complexas. O desenvolvimento da rotina interna em Python demonstrou que, para amostras ricas em Pb_c, a transição de médias simples para modelos de processamento temporal é o passo subsequente lógico para o aprimoramento da precisão laboratorial.

7 CONCLUSÕES

A aplicação integrada dos métodos U–Pb, Traços de Fissão e (U–Th)/He em apatitas permitiu testar a aplicabilidade do protocolo de Triple Dating e fornecer subsídios para refinar a evolução térmica das áreas estudadas. No Domínio São José do Campestre, os dados são condizentes com um resfriamento regional lento e estável pós-Orogenia Brasiliana, indicando que a exumação principal pode ter ocorrido no Cretáceo, em potencial associação com a abertura do Oceano Atlântico Sul. A combinação de diferentes métodos, acompanhada pelo controle microquímico, auxiliou na observação de variações cinéticas locais que poderiam não ser evidenciadas em abordagens individuais. Enquanto os cristais com distribuição homogênea e teores mais baixos de urânio (como a amostra BJ19C, com valores concentrados entre 30 e 65 ppm) mantiveram a sequência termocronológica esperada, a amostra CEBP035 apresentou uma inversão pontual, associada a um zoneamento marcante e a concentrações mais elevadas de urânio em domínios micrométricos, alcançando até 232 ppm. Ao considerar esse comportamento sob a perspectiva do modelo de dano por radiação (RDAAM), considera-se a hipótese de que o acúmulo local de danos na rede cristalina possa favorecer a formação de microdefeitos estruturais. Tais feições poderiam atuar como armadilhas temporárias, sugerindo um aumento na temperatura

de retenção do hélio em relação aos modelos teóricos convencionais.

Em contrapartida, os resultados na Província Mineral de Carajás indicam que a integridade física do mineral se posiciona como um fator crítico para a aplicação da termocronologia de baixa temperatura em terrenos polifásicos. A presença de feições como porosidade e a possível influência de hélio herdado — evidenciadas em amostras pontuais como a C19 — sugerem limitações para reconstruções termocronológicas diretas em cristais fisicamente degradados. Tais achados reforçam a conveniência de um critério de seleção amostral rigoroso, priorizando grãos euédricos e transparentes em detrimento de fragmentos porosos, com o intuito de mitigar ruídos que possam afetar a retenção isotópica e a fidedignidade dos modelos térmicos.

Ainda no contexto da complexidade de Carajás, a investigação U-Pb em zircões neoarqueanos evidenciou a importância da avaliação da integridade estrutural dos grãos na interpretação dos resultados isotópicos. O ataque químico mostrou-se uma ferramenta auxiliar de triagem estrutural, permitindo identificar domínios com diferentes graus de preservação e orientar o posicionamento dos pontos de ablação. Entretanto, seus efeitos sobre as idades e os parâmetros estatísticos não foram uniformes entre as amostras analisadas. Dessa forma, o procedimento pode contribuir para uma seleção mais criteriosa dos domínios analisados, mas não deve ser interpretado como garantia de redução da dispersão ou de melhoria da concordância dos dados U-Pb.

No âmbito do desenvolvimento metodológico, a comparação entre a rotina interna e o pacote KJ ofereceu um diagnóstico útil sobre o impacto da modelagem física no tratamento do fracionamento dependente da profundidade (downhole fractionation) e da deriva instrumental, indicando que o aprimoramento dessas ferramentas computacionais contribui continuamente para o refinamento da precisão analítica.

Por fim, os dados obtidos indicam que o suporte analítico do mapeamento Raman e da Catodoluminescência (MEV-CL) fornece um caminho valioso para correlacionar o estado de degradação da rede cristalina com eventuais dispersões isotópicas. O protocolo metodológico avaliado consolida-se como uma abordagem promissora para o estudo de terrenos polimetamórficos, demonstrando que a avaliação da estrutura microcristalina é um parâmetro importante na interpretação de histórias térmicas complexas.

Referências

Allègre, C. J. (2008). *Isotope Geology*. Cambridge University Press, Cambridge.

Antonakos, A., Liarokapis, E., and Leventouri, T. (2007). Micro-raman and ftir studies of synthetic and natural apatites. *Biomaterials*, 28(19):3043–3054.

Azevedo, M. C. (2021). Caracterização Cristalográfica e Isotópica do Mineral Zircão Através do Método de Traços De Fissão, U-Pb e U-Th/He: Geocronologia da Província Borborema, RN, Brasil. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia dos Materiais (POSMAT), Presidente Prudente, SP.

Azevedo, M. C. (2026). *Método de Traços de Fissão, U-Pb e U-Th/He no mineral zircão: Termocronologia da Província Borborema e sua relação com a Bacia Potiguar*. Tese de doutorado, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia dos Materiais (POSMAT), Presidente Prudente, SP.

Barbarand, J., Carter, A., Wood, I., and Hurford, T. (2003). Compositional and structural control of fission-track annealing in apatite. *Chemical Geology*, 198(1-2):107–137.

Bühn, B., Santos, R. V., Dardenne, M. A., and Oliveira, C. G. (2012). Mass-dependent and mass-independent sulfur isotope fractionation (δ^{34}s and δ^{33}s) from brazilian archean and proterozoic sulfide deposits by laser ablation multi-collector icp-ms. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 90:44–57.

Carlson, R. W. (2011). Absolute age determinations: Radiometric. In *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*, pages 1–8. Springer, Dordrecht.

Caxito, F. D. A., Santos, L. C. M. d. L., Ganade, C. E., Bendaoud, A., Fettous, E. H., and Bouyo, M. H. (2020). Toward an integrated model of geological evolution for ne brazil–nw africa: The borborema province and its connections to the trans-saharan (benino-nigerian and tuareg shields) and central african orogens. *Brazilian Journal of Geology*, 50(2).

Chamberlain, K. R. and Bowring, S. A. (2000). Apatite–feldspar U–Pb thermochronometer: a reliable, mid-range (∼450°C), diffusion-controlled system. *Chemical Geology*, 172:173–200.

Cherniak, D. J., Lanford, W. A., and Ryerson, F. J. (1991). Lead diffusion in apatite and zircon using ion implantation and rutherford backscattering techniques. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(6):1663–1673.

Chew, D. M. and Donelick, R. A. (2012). Combined apatite fission track and U–Pb dating by LA–ICP–MS and its application in apatite provenance analysis. In Sylvester, P. J., editor, *Quantitative Mineralogy and Microanalysis of Sediments and Sedimentary Rocks*, volume 42 of *Mineralogical Association of Canada Short Course Series*, pages 219–247. Mineralogical Association of Canada, St. John's, NL.

Chew, D. M., Petrus, J. A., and Kamber, B. S. (2014). U–Pb LA–ICPMS dating using accessory mineral standards with variable common Pb. *Chemical Geology*, 363:185–199.

Cogné, N., Chew, D. M., Donelick, R. A., and Ansberque, C. (2020). LA-ICP-MS apatite fission track dating: A practical zeta-based approach. *Chemical Geology*, 531:119302.

Costa, U. A. P., de Paula, R. R., Silva, D. P. B., Barbosa, J. d. P. d. O., Silva, C. M. G. d., Tavares, F. M., Oliveira, J. K. M. d., and Justo, A. P. (2016). *Mapa geológico-geofísico ARIM Carajás: versão preliminar*. Belém. 1 mapa, color. Escala 1:250.000. Projeto Evolução Crustal e Metalogenia da Província Mineral de Carajás.

Dantas, E. L., de Souza, Z. S., Wernick, E., Hackspacher, P. C., Martin, H., Xiaodong, D., and Li, J.-W. (2013). Crustal growth in the 3.4–2.7ga são josé de campestre massif, borborema province, ne brazil. *Precambrian Research*, 227:120–156.

Dantas, E. L., Hackspacher, P. C., Van Schmus, W. R., and Brito Neves, B. B. d. (1998). Archean accretion in the são josé do campestre massif, borborema province, northeast brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 28(2):221–228.

Dantas, E. L., Van Schmus, W. R., Hackspacher, P. C., Fetter, A. H., Brito Neves, B. B. d.,

Cordani, U., and Williams, I. S. (2004). The 3.4–3.5 ga são josé do campestre massif, ne brazil: remnants of the oldest crust in south america. *Precambrian Research*, 130(1–4):113–137.

Donelick, R., O'Sullivan, P., and Ketcham, R. (2005). Apatite fission-track analysis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 58:49–94.

Döpke, D. (2017). *Modelling the thermal history of onshore Ireland, Britain and its offshore basins using low-temperature thermochronology*. PhD thesis, University of Glasgow, Glasgow, UK.

Farley, K. A. (2002). (U-Th)/he dating: Techniques, calibrations, and applications. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 47(1):819–844.

Farley, K. A., Wolf, R., and Silver, L. (1996). The effects of long alpha-stopping distances on (U-Th)/he ages. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(21):4223–4229.

Flowers, R. M., Ketcham, R. A., Shuster, D. L., and Farley, K. A. (2009). Apatite (u–th)/he thermochronometry using a radiation damage accumulation and annealing model. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(8):2347–2365.

Flowers, R. M., Zeitler, P. K., Danišík, M., Reiners, P. W., Gautheron, C., Ketcham, R. A., Metcalf, J. R., Stockli, D. F., Enkelmann, E., and Brown, R. W. (2023). (U-Th)/he chronology: Part 1. data, uncertainty, and reporting. *GSA Bulletin*, 135(1-2):104–136.

Ganguly, J. (2021). *Thermodynamics in Earth and Planetary Sciences*. Springer, Cham.

Gleadow, A. J. and Seiler, C. (2014). Fission track dating and thermochronology. In Rink, W. J. and Thompson, J. W., editors, *Encyclopedia of Scientific Dating Methods*. Springer, Dordrecht.

Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Joy, D. C., Lyman, C. E., Echlin, P., Lifshin, E., Sawyer, L., and Michael, J. R. (2003). *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*. Springer Science+Business Media, New York, 3 edition.

Green, P. F., Crowhurst, P. V., Duddy, I. R., Japsen, P., and Holford, S. P. (2006). Conflicting

(U–Th)/he and fission track ages in apatite: Enhanced He retention, not anomalous annealing behaviour. *Earth and Planetary Science Letters*, 245(3-4):561–571.

Hasebe, N., Barbarand, J., Jarvis, K., Carter, A., and Hurford, A. J. (2004). Apatite fission-track chronometry using laser ablation ICP-MS. *Chemical Geology*, 207(3-4):135–145.

Jesus, B. A. d. (2011). Rochas máficas e ultramáficas do complexo riacho da telha, maciço são josé do campestre, província borborema – ne do brasil. Dissertação (mestrado em geologia), Universidade de Brasília, Brasília.

Ketcham, R. A., Gautheron, C., and Tassan-Got, L. (2011). Accounting for long alpha-particle stopping distances in (U–Th–Sm)/he geochronology: Refinement of the baseline case. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(24):7779–7794.

Ketcham, R. A., Guenthner, W. R., and Reiners, P. W. (2013). Geometric analysis of radiation damage connectivity in zircon, and its implications for helium diffusion. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 117:222–237.

Kohn, M. J. (2003). Geochemical zoning in metamorphic minerals. In Holland, H. D. and Turekian, K. K., editors, *Treatise on Geochemistry*, volume 3, pages 229–261. Elsevier, Oxford.

Ludwig, K. R. (1998). On the treatment of concordant uranium-lead ages. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(4):665–676.

Malusà, M. G. and Fitzgerald, P. G., editors (2019). *Fission-Track Thermochronology and its Application to Geology*. Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment. Springer, Cham.

Moreto, C. P. N., Monteiro, L. V. S., Xavier, R. P., Amaral, W. S., dos Santos, T. J. S., Juliani, C., and de Souza Filho, C. R. (2011). Mesoarchean (3.0 and 2.86 Ga) host rocks of the iron oxide–Cu–Au Bacaba deposit, Carajás mineral province: U–Pb geochronology and metallogenetic implications. *Mineralium Deposita*, 46:789–811.

Moreto, C. P. N., Monteiro, L. V. S., Xavier, R. P., Creaser, R. A., DuFrane, S. A., Melo, G. H. C., Delinardo da Silva, M. A., Tassinari, C. C. G., and Sato, K. (2014). Timing of multiple hydrothermal events in the iron oxide–copper–gold deposits of the southern copper belt, carajás province, brazil. *Mineralium Deposita*, 50(5):517–546.

Moreto, C. P. N., Monteiro, L. V. S., Xavier, R. P., Creaser, R. A., DuFrane, S. A., Tassinari, C. C. G., Sato, K., Kemp, A. I. S., and Amaral, W. S. (2015). Neoarchean and paleoproterozoic iron oxide-copper-gold events at the sossego deposit, carajas province, brazil: Re-os and u-pb geochronological evidence. *Economic Geology*, 110(3):809–835.

Nasdala, L., Wenzel, M., Vavra, G., Irmer, G., Wenzel, T., and Kober, B. (2001). Metamictization of natural zircon: accumulation versus thermal annealing of radioactivity-induced damage. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 141:125–144.

Negrão, S. C. B. (2007). *Estudo de aplicabilidade da Metodologia de traços de fissão em apatitas na região dômica de Monte Alegre – Pará*. PhD thesis, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas.

Piccoli, P. M. and Candela, P. A. (2002). Apatite in igneous systems. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 48(1):255–292.

Price, P. B. and Walker, R. M. (1963). A simple method of measuring low uranium concentrations in natural crystals. *Applied Physics Letters*, 2(2):23–25.

Reiners, P. W., Ehlers, T. A., and Zeitler, P. K. (2005). Past, present, and future of thermochronology. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 58(1):1–18.

Resende, R. S. (2015). *Aprimoramento da Sistemática U-Pb através do Método de Traços de Fissão e Técnicas de Caracterização: Termocronologia da Faixa Brasília e sua Correlação com a Bacia do Paraná*. PhD thesis, UNESP, Presidente Prudente.

Resende, R. S., Tello Sáenz, C. A., Pereira, L. A. S., and Dantas, E. L. (2019). The effect of chemical and physical imperfections in zircon grains in influencing the U-Pb age analyses: Insights from zircon fission track etching. *Lithos*, 346–347:105138.

Sala, O. (2008). *Fundamentos da espectroscopia Raman e no infravermelho*. Editora UNESP, São Paulo, 2 edition.

Schoene, B. and Bowring, S. A. (2007). Determining accurate temperature-time paths from U-Pb thermochronology: An example from the Kaapvaal craton, southern Africa. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(1):165–185.

Siqueira-Ribeiro, M. C., Hackspacher, P. C., Reiners, P. W., Iunes, P. J., and Guedes, S. (2019). The performance of the (U+Th)/he thermochronology laboratory at UNESP Rio Claro, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 91(1):e20170397.

Tagami, T., Galbraith, R., Yamada, R., and Laslett, G. (1988). Fission-track dating using external detector method: a laboratory procedure. *Memoirs of the Faculty of Science, Kyoto University. Series of geology and mineralogy*, 53(1-2):1–30.

Tallarico, F. H. B., Figueiredo, B. R., Groves, D. I., Kositcin, N., McNaughton, N. J., Fletcher, I. R., and Rego, J. L. (2005). Geology and shrimp u–pb geochronology of the igarapé bahia deposit, carajás copper-gold belt, brazil: An archean (2.57 ga) example of iron-oxide cu-au-(u-ree) mineralization. *Economic Geology*, 100(1):7–28.

Tello, C. A. (1998). *Estudo de annealing de traços de fissão em apatitas, tanto em seções basais quanto em seções sem orientação preferencial, análise dos comprimentos dos traços de fissão*. PhD thesis, Instituto de Física Gleb Wataghin, Universidade Estadual de Campinas.

Tello, C. A., Curvo, E. A. C., Dias, A. N. C., Soares, C. J., Constantino, C. J. L., Alencar, I., Guedes, S., Palissari, R., and Hadler Neto, J. C. (2012). Effects of etching on zircon grains and its implications for the fission track method. *Applied Spectroscopy*, 66(5):545–551.

Tello, C. A., Palissari, R., Hadler, J. C., Iunes, P. J., Guedes, S., Curvo, E. A. C., and Paulo, S. R. (2006). Annealing experiments on induced fission tracks in apatite: Measurements of horizontal-confined track lengths and track densities in basal sections and randomly oriented grains. *American Mineralogist*, 91(2-3):252–260.

Vermeesch, P. (2017). Statistics for LA-ICP-MS based fission track dating. *Chemical Geology*, 456:19–27.

Vermeesch, P. (2018). Isoplotr: a free and open toolbox for geochronology. *Geoscience Frontiers*, 9(5):1479–1493.

Vermeesch, P. (2025). KJ: A Julia package for physics-based LA-ICP-MS data processing. In *Goldschmidt 2025 Conference Abstracts*, Prague, Czech Republic. European Association of Geochemistry and the Geochemical Society. Oral Presentation.

Wagner, G. A. and Van den Haute, P. (1992). *Fission Track Dating*, volume 6 of *Solid Earth Sciences Library*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

Wolf, R. A., Farley, K. A., and Kass, D. M. (1998). Modeling of the temperature sensitivity of the apatite (u-th)/he pyrometer. *Chemical Geology*, 148(1-2):105–114.

Xu, B., Kou, G., Etschmann, B., Liu, D., and Brugger, J. (2020). Spectroscopic, Raman, EMPA, micro-XRF and micro-XANES analyses of sulphur concentration and oxidation state of natural apatite crystals. *Crystals*, 10:1032.

Zeigler, S. D., Ault, A. K., Guenthner, W. R., and Hamblock, J. M. (2024). The geometric correction method for zircon (U–Th)-he chronology: correcting systematic error and assigning uncertainties to alpha-ejection corrections and eU concentrations. *Geochronology*, 6(1):1–23.

Zeitler, P. K., Herczeg, A., McDougall, I., and Honda, M. (1987). U-Th-He dating of apatite: A potential thermochronometer. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51(10):2865–2868.

A Dados analíticos U–Pb

A.1 Apatita – Domínio São José do Campestre

Identificador	U (ppm)	$^{238}U/^{206}Pb$	Erro	$^{207}Pb/^{206}Pb$	Erro
BJ19C-1	30.03	6.204	0.104	0.191	0.003
BJ19C-2	63.99	10.821	0.160	0.079	0.001
BJ19C-3	30.69	9.318	0.156	0.112	0.002
BJ19C-4	54.36	8.832	0.133	0.110	0.002
BJ19C-5	64.69	6.058	0.084	0.189	0.002
BJ19C-6	38.82	7.563	0.117	0.147	0.002
BJ19C-7	29.96	7.416	0.122	0.147	0.002
BJ19C-8	34.3	8.503	0.137	0.139	0.002
BJ19C-9	20.67	6.408	0.112	0.190	0.003
BJ19C-10	49.31	8.137	0.123	0.125	0.002
BJ19C-11	55.03	8.052	0.119	0.139	0.002
BJ19C-12	63.45	8.017	0.116	0.131	0.002
BJ19C-13	33.84	8.872	0.145	0.133	0.002
BJ19C-14	31.65	8.869	0.149	0.126	0.002
BJ19C-15	30.65	7.857	0.128	0.147	0.002
BJ19C-16	36.6	6.089	0.095	0.186	0.003
BJ19C-17	55.25	8.783	0.132	0.131	0.002
BJ19C-18	47.27	8.150	0.125	0.147	0.002
BJ19C-19	31.51	7.059	0.116	0.176	0.003
BJ19C-20	56.66	8.689	0.129	0.122	0.002
BJ19C-21	28.83	7.109	0.118	0.181	0.003
BJ19C-22	54.11	8.501	0.127	0.131	0.002
BJ19C-23	89.98	9.618	0.137	0.096	0.001
BJ19C-24	44.45	7.568	0.115	0.154	0.002
BJ19C-25	49.18	8.943	0.138	0.118	0.002
BJ19C-26	57.85	9.284	0.144	0.116	0.002
BJ19C-27	67.43	9.563	0.140	0.089	0.001
BJ19C-28	95.27	9.105	0.129	0.093	0.001
BJ19C-29	29.64	7.700	0.130	0.157	0.003
BJ19C-30	72.95	10.295	0.151	0.082	0.001
BJ19C-31	65.54	10.220	0.155	0.087	0.001
BJ19C-32	69.64	9.226	0.134	0.098	0.002
BJ19C-33	55.26	10.007	0.151	0.095	0.002
BJ19C-34	35.93	6.475	0.106	0.183	0.003
BJ19C-35	36.34	8.581	0.140	0.125	0.002
BJ19C-36	36.64	7.838	0.125	0.148	0.002
BJ19C-37	42.09	7.877	0.123	0.129	0.002
BJ19C-38	51.9	8.224	0.131	0.115	0.002
BJ19C-39	74.39	8.821	0.128	0.115	0.002
BJ19C-40	33.8	7.890	0.128	0.146	0.002
BJ19C-41	77.85	9.321	0.142	0.088	0.001
BJ19C-42	152.07	10.114	0.137	0.066	0.001
BJ19C-43	57.17	9.483	0.144	0.093	0.002
BJ19C-44	124.23	10.898	0.151	0.063	0.001

Identificador	U (ppm)	$^{238}U/^{206}Pb$	Erro	$^{207}Pb/^{206}Pb$	Erro
BJ19C-45	57.37	8.578	0.129	0.113	0.002
BJ19C-46	40.56	7.640	0.125	0.124	0.002
BJ19C-47	25.46	8.294	0.146	0.139	0.003
BJ19C-48	51.76	8.457	0.131	0.112	0.002
BJ19C-49	39.51	8.496	0.137	0.133	0.002
BJ19C-50	30.53	7.765	0.131	0.151	0.003
BJ19C-51	44.89	9.175	0.145	0.103	0.002
BJ19C-52	31.35	7.760	0.129	0.138	0.002
CEBP035-1	8.83	3.723	0.089	0.300	0.007
CEBP035-2	28.14	8.632	0.143	0.142	0.003
CEBP035-3	40.1	8.728	0.133	0.133	0.002
CEBP035-4	59.36	10.230	0.150	0.094	0.002
CEBP035-5	62.39	9.890	0.143	0.108	0.002
CEBP035-6	80.72	11.041	0.156	0.073	0.001
CEBP035-7	66.66	9.927	0.141	0.089	0.001
CEBP035-8	40.86	8.834	0.152	0.159	0.003
CEBP035-9	329.79	11.882	0.148	0.050	0.001
CEBP035-10	5.94	2.657	0.066	0.332	0.007
CEBP035-11	57.02	10.481	0.155	0.099	0.002
CEBP035-12	156.91	12.076	0.157	0.057	0.001
CEBP035-13	54.27	10.150	0.149	0.091	0.002
CEBP035-14	34.61	8.628	0.137	0.144	0.002
CEBP035-15	57.06	9.940	0.145	0.098	0.002
CEBP035-16	12.26	6.095	0.119	0.207	0.004
CEBP035-17	112.19	11.233	0.153	0.067	0.001
CEBP035-18	38.45	11.356	0.187	0.096	0.002
CEBP035-19	50.53	11.489	0.180	0.078	0.002
CEBP035-20	72.99	9.164	0.128	0.112	0.002
CEBP035-21	92.72	10.378	0.143	0.082	0.001
CEBP035-22	111.02	10.198	0.140	0.081	0.001
CEBP035-23	128.01	11.453	0.171	0.057	0.001
CEBP035-24	155.08	11.203	0.151	0.057	0.001
CEBP035-25	26.22	8.275	0.142	0.145	0.003
CEBP035-26	95.72	11.189	0.167	0.069	0.001
CEBP035-27	59.08	10.328	0.151	0.093	0.002
CEBP035-28	13.53	6.707	0.139	0.199	0.004
CEBP035-29	82.88	10.831	0.152	0.075	0.001
CEBP035-30	49.8	10.054	0.153	0.095	0.002
CEBP035-31	33.19	5.631	0.087	0.224	0.003
CEBP035-32	99.44	11.413	0.158	0.069	0.001
CEBP035-33	40.54	8.261	0.136	0.145	0.003
CEBP035-34	153.13	11.732	0.156	0.055	0.001
CEBP035-35	167.6	11.444	0.149	0.068	0.001
CEBP035-36	31.77	8.615	0.141	0.129	0.002

Identificador	U (ppm)	$^{238}U/^{206}Pb$	Erro	$^{207}Pb/^{206}Pb$	Erro
CEBP035-37	60.05	10.043	0.147	0.086	0.001
CEBP035-38	60.24	8.134	0.150	0.143	0.003
CEBP035-39	25.62	6.607	0.122	0.175	0.003
CEBP035-40	137.2	11.827	0.159	0.057	0.001
CEBP035-41	70.44	8.964	0.134	0.090	0.002
CEBP035-42	162.58	11.940	0.157	0.051	0.001
CEBP035-43	18.08	7.246	0.131	0.168	0.003
CEBP035-44	67.26	10.149	0.146	0.084	0.001
CEBP035-45	66.84	10.263	0.151	0.080	0.001
CEBP035-46	210.29	11.772	0.152	0.052	0.001
CEBP035-47	140.93	11.380	0.153	0.054	0.001
CEBP035-48	115.29	11.269	0.155	0.060	0.001
CEBP035-49	135.48	11.671	0.158	0.065	0.001
CEBP035-50	71.13	10.732	0.155	0.070	0.001
CEBP035-51	152.62	12.070	0.160	0.055	0.001
CEBP035-52	163.36	11.396	0.152	0.054	0.001
CEBP035-53	34.48	9.095	0.147	0.116	0.002
CEBP035-54	15.93	7.563	0.145	0.171	0.004
CEBP035-55	151.46	11.206	0.148	0.051	0.001
CEBP035-56	74.98	10.678	0.166	0.080	0.002
CEBP035-57	185.48	11.631	0.154	0.053	0.001
CEBP035-58	63.02	10.474	0.156	0.083	0.001
CEBP035-59	60.13	11.448	0.174	0.079	0.001
CEBP035-60	142.33	11.062	0.148	0.066	0.001
CEBP035-61	94.16	10.498	0.147	0.074	0.001
CEBP035-62	77.77	10.570	0.151	0.080	0.001
CEBP035-63	77.73	10.432	0.149	0.072	0.001
CEBP035-64	41.07	9.934	0.158	0.101	0.002
CEBP035-65	16.23	7.166	0.135	0.176	0.004
CEBP035-66	177.67	11.162	0.148	0.059	0.001
CEBP035-67	118.61	10.158	0.138	0.090	0.001
CEBP035-68	201.43	11.299	0.149	0.053	0.001
CEBP035-69	28.81	8.656	0.145	0.135	0.003
CEBP035-70	29.25	8.738	0.145	0.132	0.002
CEBP035-71	35.25	9.184	0.151	0.105	0.002
CEBP035-72	12.07	6.544	0.133	0.183	0.004
CEBP035-73	36.32	9.733	0.161	0.112	0.002
CEBP035-74	219.72	11.236	0.148	0.063	0.001
CEBP035-75	27.28	8.248	0.140	0.138	0.003
CEBP035-76	70.47	10.777	0.158	0.074	0.001
CEBP035-77	87.55	10.281	0.147	0.082	0.001
CEBP035-78	11.44	5.702	0.114	0.220	0.005
CEBP035-79	58.36	9.543	0.142	0.085	0.001
CEBP035-80	49.52	9.498	0.148	0.100	0.002

Identificador	U (ppm)	$^{238}U/^{206}Pb$	Erro	$^{207}Pb/^{206}Pb$	Erro
CEBP035-81	134.5	10.410	0.147	0.072	0.001
CEBP035-82	206.9	11.774	0.164	0.048	0.001
CEBP035-83	19.37	7.396	0.136	0.158	0.003
CEBP035-84	16.53	7.231	0.139	0.182	0.004
CEBP035-85	121.77	12.149	0.198	0.057	0.001
CEBP035-86	30.34	8.580	0.148	0.139	0.003
CEBP035-87	115.59	11.397	0.160	0.068	0.001
CEBP035-88	6.53	3.205	0.069	0.290	0.006
CEBP035-89	115.66	10.636	0.149	0.071	0.001
CEBP035-90	146.66	10.582	0.147	0.072	0.001
CEBP035-91	80.35	11.068	0.162	0.073	0.001
CEBP035-92	97.63	11.646	0.168	0.064	0.001
CEBP035-93	23.73	8.703	0.157	0.117	0.003
CEBP035-94	192.13	11.306	0.153	0.064	0.001
CEBP035-95	115.45	11.013	0.155	0.076	0.001
CEBP035-96	58.94	9.924	0.152	0.096	0.002
CEBP035-97	232	11.406	0.154	0.066	0.001
CEBP035-98	215.96	11.899	0.161	0.057	0.001
CEBP035-99	42.03	9.184	0.147	0.103	0.002
CEBP035-100	110.58	11.041	0.157	0.063	0.001
CEBP035-101	25.38	8.738	0.154	0.131	0.003
CEBP035-102	143.73	11.137	0.155	0.051	0.001
CEBP035-103	7.57	4.779	0.106	0.250	0.006
CEBP035-104	59.54	10.855	0.179	0.086	0.002
CEBP035-105	22.7	7.503	0.136	0.154	0.003
CEBP035-106	59.17	8.265	0.126	0.134	0.002
CEBP035-107	7.43	5.498	0.128	0.241	0.006
CEBP321-1	18.44	6.717	1.867	0.193	2.062
CEBP321-2	14.47	6.171	1.950	0.226	2.104
CEBP321-3	12.27	5.520	2.026	0.241	2.146
CEBP321-4	9.87	5.046	2.104	0.257	2.194
CEBP321-5	45.46	8.305	1.595	0.151	1.813
CEBP321-6	18.88	6.452	1.839	0.196	2.026
CEBP321-7	9.9	4.254	2.072	0.259	2.126
CEBP321-8	15.94	5.892	1.903	0.212	2.074
CEBP321-9	12.08	5.360	2.021	0.242	2.153
CEBP321-10	14.97	5.388	1.918	0.236	2.048
CEBP321-11	9.46	4.898	2.160	0.247	2.269
CEBP321-12	20.65	7.040	1.809	0.185	2.032
CEBP321-13	14.82	6.026	1.994	0.220	2.172
CEBP321-14	8.99	4.094	2.125	0.262	2.185
CEBP321-15	42.13	8.098	1.628	0.144	1.893
CEBP321-16	13.29	5.995	2.014	0.220	2.205
CEBP321-17	12.52	5.453	2.088	0.223	2.259

Identificador	U (ppm)	$^{238}U/^{206}Pb$	Erro	$^{207}Pb/^{206}Pb$	Erro
CEBP321-18	11.06	4.404	2.017	0.257	2.115
CEBP321-19	10.88	5.617	1.977	0.227	2.149
CEBP321-20	13.13	4.949	2.113	0.246	2.252
CEBP321-21	6.61	3.604	2.235	0.290	2.247
CEBP321-22	18.92	4.954	2.086	0.236	2.240
CEBP321-23	10.42	6.758	1.906	0.183	2.159
CEBP321-24	20.32	7.175	1.865	0.194	2.122
CEBP321-25	9.89	5.082	2.190	0.239	2.349
CEBP321-26	19.48	6.102	1.867	0.190	2.106
CEBP321-27	12.73	4.464	2.357	0.260	2.450
CEBP321-28	9.34	5.099	2.060	0.224	2.239
CEBP321-29	11.59	5.293	2.043	0.237	2.213
CEBP321-30	16.03	4.383	2.069	0.248	2.195
CEBP321-31	12.04	6.331	1.931	0.194	2.182
CEBP321-32	7.03	4.111	2.253	0.287	2.324
CEBP321-33	5.35	3.934	2.427	0.276	2.483
CEBP321-34	12.57	5.865	2.252	0.215	2.485
CEBP321-35	6.1	3.719	2.789	0.290	2.765
CEBP321-36	22.41	7.121	1.816	0.174	2.113
CEBP321-37	13.21	7.037	1.893	0.196	2.174
CEBP321-38	21.9	6.278	2.097	0.212	2.354
CEBP321-39	16.19	6.306	1.911	0.196	2.182
CEBP321-40	13.25	6.003	2.029	0.214	2.285
CEBP321-41	31.22	8.101	1.790	0.144	2.149
CEBP321-42	11.26	5.191	2.040	0.234	2.252
CEBP321-43	11.07	5.857	1.933	0.212	2.184
CEBP321-44	15.52	5.179	2.082	0.238	2.291
CEBP321-45	17.76	6.713	1.906	0.195	2.197
CEBP321-46	14.05	5.923	1.984	0.217	2.242
CEBP321-47	16.74	5.707	1.895	0.203	2.155
CEBP321-48	8.99	7.968	1.729	0.144	2.091
CEBP321-49	31.88	3.973	2.273	0.270	2.383
CEBP321-50	28.83	7.549	1.759	0.149	2.110
CEBP321-51	20.33	6.543	1.871	0.187	2.182
CEBP321-52	22.02	6.976	1.967	0.181	2.288
CEBP321-53	17.92	6.278	1.902	0.204	2.192
CEBP321-54	47.75	4.860	2.197	0.229	2.411
CEBP321-55	10.49	9.765	1.680	0.110	2.105
CEBP321-56	25.35	7.745	1.828	0.166	2.190
CEBP321-57	27.18	7.578	1.796	0.151	2.173
CEBP321-58	12.34	4.687	2.128	0.259	2.334
CEBP321-59	9.96	5.459	2.047	0.221	2.321
CEBP321-60	31.11	8.489	1.791	0.144	2.207
CEBP321-61	16.96	6.943	1.999	0.195	2.343

Identificador	U (ppm)	$^{238}U/^{206}Pb$	Erro	$^{207}Pb/^{206}Pb$	Erro
CEBP321-62	12.44	5.192	2.061	0.231	2.324
CEBP321-63	8.86	4.211	2.177	0.240	2.380
CEBP321-64	22.87	7.380	1.875	0.163	2.258
CEBP321-65	10.39	5.604	2.186	0.226	2.477
CEBP321-66	13.66	5.900	2.118	0.220	2.423
CEBP321-67	27.34	6.236	2.058	0.197	2.398
CEBP321-68	14.88	8.592	1.907	0.142	2.361
CEBP321-69	121.19	7.795	1.855	0.169	2.242
CEBP321-70	24.66	11.105	1.566	0.063	2.060
CEBP321-71	18.57	6.422	1.920	0.188	2.277
CEBP321-72	16.78	6.246	1.949	0.196	2.298
CEBP321-73	13.26	5.944	2.074	0.213	2.402
CEBP321-74	17.35	6.558	1.967	0.186	2.345
CEBP321-75	12.41	6.376	2.130	0.214	2.480
CEBP321-76	15.41	6.221	2.003	0.199	2.357
CEBP321-77	17.74	6.815	1.976	0.180	2.368
CEBP321-78	10.92	8.890	1.813	0.127	2.279
CEBP321-79	32.08	5.813	2.168	0.217	2.506
CEBP321-80	22.25	7.548	1.894	0.169	2.308
CEBP321-81	22.36	7.784	1.923	0.169	2.349

Nota: U = concentração de urânio, em ppm; $^{238}U/^{206}Pb$ e $^{207}Pb/^{206}Pb$ = razões isotópicas utilizadas na análise U–Pb. Os erros apresentados correspondem a incertezas absolutas de 1σ associadas às respectivas razões isotópicas.

A.2 Apatita – Província Mineral de Carajás

Identificador	U (ppm)	$^{238}U/^{206}Pb$	Erro	$^{207}Pb/^{206}Pb$	Erro	ρ
C01-1	7.07	6.188	0.774	0.151	0.013	0.322
C01-2	16.15	3.918	0.530	0.142	0.023	0.577
C01-3	638.16	3.724	1.301	0.175	0.065	0.488
C01-4	32.66	3.094	0.382	0.176	0.011	0.325
C01-5	10.91	2.439	0.074	0.291	0.011	0.347
C01-6	3.05	2.884	0.101	0.148	0.004	0.276
C01-7	98.54	0.941	0.021	0.592	0.015	0.503
C01-8	10.83	1.488	0.077	0.456	0.035	0.460
C01-9	5.24	2.650	0.371	0.150	0.020	0.509
C01-10	5.80	1.752	0.173	0.370	0.025	0.581
C01-11	1.47	2.601	0.135	0.158	0.007	0.413
C01-12	99.06	2.618	0.082	0.149	0.005	0.450
C01-13	1.44	2.447	0.209	0.183	0.014	0.520
C01-14	3.91	2.166	0.193	0.251	0.019	0.444
C01-15	13.83	2.167	0.178	0.246	0.015	0.424
C01-16	7.26	2.326	0.050	0.191	0.009	0.222
C01-17	51.78	2.186	0.062	0.225	0.014	0.310
C01-18	51.88	2.395	0.046	0.170	0.006	0.320
C01-19	24.22	2.391	0.044	0.170	0.005	0.343
C01-20	1.72	1.651	0.078	0.351	0.025	0.341
C01-21	15.78	2.414	0.040	0.160	0.006	0.171
C01-22	87.67	2.054	0.064	0.244	0.003	0.141
C01-23	21.86	2.254	0.031	0.194	0.006	0.321
C01-24	13.91	2.406	0.062	0.154	0.006	0.460
C01-25	12.58	2.240	0.052	0.193	0.007	0.311
C01-26	13.50	2.282	0.047	0.182	0.006	0.341
C01-27	31.61	2.364	0.038	0.161	0.004	0.404
C01-28	67.19	2.440	0.027	0.141	0.002	0.400
C01-29	1.19	1.260	0.076	0.427	0.037	0.424
C01-30	7.42	2.173	0.054	0.202	0.010	0.313
C01-31	22.68	2.234	0.042	0.185	0.006	0.353
C01-32	15.61	2.333	0.105	0.160	0.008	0.328
C01-33	36.83	1.439	0.083	0.380	0.027	0.491
C01-34	29.36	2.387	0.028	0.145	0.003	0.307
C01-35	59.92	2.273	0.077	0.172	0.013	0.268
C01-36	37.96	2.276	0.045	0.170	0.005	0.393
C01-37	28.68	2.238	0.034	0.180	0.006	0.337
C01-38	31.35	2.337	0.040	0.155	0.004	0.306
C01-39	28.51	2.328	0.035	0.156	0.005	0.329
C01-40	25.07	2.314	0.282	0.158	0.017	0.596
C01-41	8.17	2.308	0.069	0.157	0.007	0.395
C01-42	4.34	2.248	0.058	0.169	0.006	0.430
C01-43	7.02	2.291	0.070	0.156	0.008	0.377
C01-44	14.66	2.200	0.048	0.178	0.006	0.474

C01-45	14.21	2.072	0.042	0.208	0.008	0.298
C01-46	66.30	2.288	0.040	0.154	0.004	0.386
C01-47	16.63	2.298	0.069	0.151	0.005	0.335
C01-48	17.41	2.307	0.042	0.148	0.004	0.373
C01-49	12.31	2.275	0.038	0.155	0.004	0.422
C01-50	5.30	2.214	0.064	0.166	0.011	0.309
C01-51	7.70	2.209	0.052	0.165	0.008	0.303
C01-52	6.06	2.165	0.038	0.175	0.009	0.251
C01-53	25.58	2.218	0.044	0.162	0.004	0.463
C01-54	2.18	1.670	0.071	0.296	0.020	0.394
C01-55	5.25	1.506	0.044	0.336	0.012	0.550
C01-56	10.89	2.120	0.039	0.185	0.006	0.269
C01-57	8.15	2.093	0.044	0.187	0.007	0.421
C01-58	49.55	2.224	0.043	0.154	0.004	0.436
C01-59	8.50	2.118	0.060	0.178	0.008	0.481
C01-60	25.96	2.259	0.037	0.143	0.003	0.507
C01-61	59.25	2.235	0.039	0.149	0.003	0.533
C01-62	59.48	2.133	0.030	0.170	0.003	0.492
C01-63	5.33	2.034	0.049	0.190	0.008	0.417
C01-64	14.82	2.153	0.051	0.159	0.006	0.363
C01-65	83.48	2.122	0.037	0.151	0.003	0.530
C01-66	32.12	2.081	0.057	0.159	0.006	0.482
C01-67	8.37	1.781	0.047	0.233	0.011	0.424
C01-68	9.35	2.057	0.046	0.161	0.008	0.272
C01-69	8.72	1.918	0.159	0.195	0.010	0.210
C01-70	10.85	1.688	0.035	0.247	0.007	0.432
C01-71	9.47	2.094	0.048	0.143	0.007	0.281
C01-72	2.22	1.797	0.071	0.206	0.015	0.316
C01-73	19.76	1.908	0.030	0.166	0.005	0.427
C01-74	7.80	1.308	0.036	0.186	0.009	0.428
C01-75	0.84	0.469	0.035	0.425	0.033	0.514
C02-1	445.67	12.138	1.635	0.136	0.020	0.695
C02-2	1.14	2.176	0.130	0.331	0.033	0.409
C02-3	2.94	1.293	0.045	0.332	0.017	0.410
C02-4	30.04	1.702	0.081	0.317	0.030	0.336
C02-5	25.01	1.791	0.036	0.248	0.008	0.387
C02-6	7.89	2.264	0.052	0.189	0.009	0.295
C02-7	2.15	2.133	0.093	0.180	0.017	0.276
C02-8	5.00	2.269	0.065	0.170	0.010	0.363
C02-9	7.88	1.382	0.129	0.193	0.008	0.146
C02-10	23.44	2.398	0.043	0.159	0.005	0.465
C02-11	21.92	2.451	0.047	0.157	0.005	0.376
C02-12	60.64	2.127	0.036	0.161	0.004	0.343
C02-13	4.26	0.997	0.029	0.189	0.008	0.495
C02-14	32.99	2.276	0.029	0.156	0.004	0.310

C02-15	20.47	2.615	0.038	0.147	0.004	0.294
C02-16	41.13	2.262	0.035	0.156	0.003	0.420
C02-17	5.04	2.102	0.064	0.159	0.008	0.359
C02-18	20.08	2.339	0.037	0.152	0.004	0.413
C02-19	8.14	2.251	0.046	0.153	0.005	0.358
C02-20	11.58	2.133	0.052	0.156	0.006	0.265
C02-21	66.23	2.429	0.037	0.149	0.003	0.309
C02-22	26.30	2.436	0.040	0.147	0.004	0.260
C02-23	26.48	2.296	0.034	0.151	0.004	0.350
C02-24	34.15	2.354	0.089	0.149	0.006	0.417
C02-25	1.07	2.318	0.038	0.150	0.004	0.424
C02-26	20.96	2.166	0.032	0.154	0.005	0.262
C02-27	26.78	2.136	0.037	0.154	0.005	0.259
C02-28	12.85	1.558	0.027	0.168	0.006	0.327
C02-29	44.34	2.515	0.038	0.142	0.004	0.380
C02-30	36.37	2.583	0.037	0.140	0.003	0.415
C02-31	15.99	2.507	0.044	0.139	0.005	0.283
C02-32	18.63	2.268	0.043	0.138	0.005	0.345
C16-1	56.55	2.519	0.048	0.152	0.006	0.334
C16-2	19.15	2.542	0.041	0.143	0.004	0.304
C16-3	26.99	2.681	0.050	0.151	0.005	0.354
C16-4	13.01	2.575	0.040	0.141	0.003	0.403
C16-5	18.07	2.385	0.051	0.184	0.008	0.321
C16-6	306.33	2.392	0.047	0.197	0.008	0.340
C16-7	20.94	2.576	0.043	0.149	0.004	0.489
C16-8	15.04	2.626	0.047	0.143	0.005	0.400
C16-9	135.52	2.369	0.051	0.165	0.006	0.339
C16-10	20.20	2.523	0.058	0.180	0.007	0.352
C16-11	7.62	2.374	0.052	0.182	0.006	0.452
C16-12	6.99	2.606	0.037	0.144	0.004	0.371
C16-13	30.62	2.410	0.041	0.233	0.009	0.322
C16-14	11.60	2.358	0.053	0.203	0.011	0.281
C16-15	8.72	2.624	0.034	0.129	0.002	0.370
C16-16	10.01	2.426	0.040	0.152	0.004	0.367
C16-17	22.60	2.611	0.036	0.135	0.003	0.332
C16-18	26.44	2.550	0.049	0.156	0.005	0.345
C16-19	20.99	2.478	0.044	0.166	0.005	0.337
C16-20	14.60	2.541	0.057	0.168	0.007	0.384
C16-21	16.71	2.384	0.049	0.162	0.006	0.366
C16-22	53.75	2.667	0.037	0.130	0.002	0.392
C16-23	29.59	2.492	0.050	0.161	0.005	0.265
C16-24	30.65	2.587	0.040	0.148	0.006	0.271
C16-25	24.01	2.508	0.056	0.163	0.005	0.508
C16-26	21.72	2.591	0.031	0.161	0.003	0.272
C16-27	27.79	2.307	0.040	0.189	0.006	0.434

C16-28	99.93	2.401	0.046	0.187	0.007	0.367
C16-29	12.12	2.464	0.041	0.153	0.003	0.347
C16-30	186.88	2.427	0.036	0.209	0.006	0.332
C16-31	158.17	2.443	0.041	0.153	0.004	0.388
C16-32	61.41	2.395	0.051	0.165	0.006	0.375
C16-33	23.60	2.686	0.035	0.139	0.002	0.382
C16-34	219.79	2.124	0.047	0.243	0.006	0.421
C16-35	13.75	2.362	0.044	0.231	0.010	0.243
C16-36	16.21	2.678	0.031	0.126	0.002	0.306
C16-37	172.83	2.437	0.035	0.166	0.004	0.263
C16-38	25.63	2.825	0.043	0.141	0.003	0.399
C16-39	19.44	2.333	0.038	0.207	0.007	0.300
C16-40	14.31	2.608	0.029	0.135	0.002	0.363
C16-41	43.11	2.678	0.033	0.133	0.002	0.347
C16-42	12.20	2.487	0.053	0.161	0.005	0.391
C16-43	14.06	2.517	0.044	0.165	0.006	0.227
C16-44	54.14	2.690	0.037	0.142	0.002	0.375
C18-1	2.09	2.422	0.117	0.239	0.020	0.487
C18-2	2.01	2.259	0.110	0.226	0.025	0.373
C18-3	1.56	2.050	0.099	0.214	0.020	0.371
C18-4	1.52	2.445	0.127	0.206	0.023	0.344
C18-5	1.62	2.274	0.096	0.218	0.024	0.288
C18-6	1.64	1.489	0.171	0.331	0.044	0.836
C18-7	1.70	1.136	0.039	0.423	0.022	0.383
C18-8	1.63	2.072	0.096	0.228	0.022	0.406
C18-9	1.58	2.256	0.098	0.261	0.023	0.383
C18-10	1.62	2.162	0.097	0.231	0.021	0.356
C18-11	1.41	1.939	0.076	0.253	0.022	0.229
C18-12	2.58	1.489	0.061	0.364	0.021	0.516
C18-13	2.37	0.923	0.050	0.427	0.040	0.467
C18-14	1.98	1.113	0.043	0.338	0.018	0.435
C18-15	2.05	1.429	0.053	0.365	0.018	0.511
C18-16	1.91	1.612	0.062	0.312	0.021	0.416
C18-17	2.34	1.486	0.050	0.341	0.017	0.414
C18-18	1.80	1.420	0.049	0.423	0.023	0.339
C18-19	2.22	1.081	0.043	0.408	0.027	0.454
C18-20	1.99	1.170	0.038	0.399	0.021	0.410
C18-21	2.01	1.881	0.080	0.262	0.025	0.296
C18-22	1.75	1.834	0.072	0.290	0.021	0.386
C19-1	0.05	0.079	0.012	0.463	0.044	0.146
C19-2	0.01	0.082	0.014	0.477	0.043	0.158
C19-3	0.37	0.152	0.011	0.684	0.048	0.626
C19-4	0.18	0.249	0.017	0.699	0.047	0.438
C19-5	0.34	0.429	0.025	0.679	0.047	0.354
C19-6	0.11	0.324	0.045	0.685	0.090	0.469

C19-7	92.40	3.529	0.130	0.112	0.003	0.368
C19-8	3.66	2.558	0.185	0.338	0.021	0.189
C19-9	0.43	0.588	0.034	0.695	0.045	0.229
C19-10	1.61	0.020	0.002	0.124	0.008	0.501
C19-11	0.10	0.406	0.046	0.710	0.083	0.558
C19-12	10.91	2.389	0.075	0.140	0.006	0.448
C19-13	1.80	2.631	0.233	0.281	0.027	0.362
C19-14	1.18	1.205	0.050	0.493	0.025	0.352
C19-15	154.76	3.010	0.064	0.127	0.003	0.283
C19-16	19.27	0.570	0.054	0.151	0.006	0.210
C19-17	3.48	0.434	0.019	0.177	0.007	0.307
C19-18	103.06	4.126	0.085	0.130	0.003	0.416
C19-19	50.59	2.799	0.055	0.159	0.012	0.195
C19-20	0.62	1.085	0.069	0.572	0.047	0.519
C19-21	0.92	1.029	0.056	0.547	0.031	0.582
C19-22	19.71	2.777	0.060	0.144	0.006	0.264
C19-23	49.37	2.779	0.071	0.126	0.004	0.383
C19-24	2.11	0.833	0.088	0.395	0.046	0.283
C19-25	0.12	0.279	0.026	0.744	0.063	0.330
C19-26	7.43	0.293	0.008	0.182	0.004	0.412
C19-27	0.34	0.437	0.036	0.668	0.049	0.418
C19-28	2.63	1.581	0.059	0.389	0.016	0.476

Nota: U = concentração de urânio, em ppm; $^{238}U/^{206}Pb$ e $^{207}Pb/^{206}Pb$ = razões isotópicas utilizadas na análise U–Pb; ρ= coeficiente de correlação entre os erros das razões isotópicas. Os erros são apresentados como incertezas absolutas de 1σ.

A.3 Zircão – Província Mineral de Carajás

A.3.1 Grãos atacados

Identificador	U (ppm)	$^{238}U/^{206}Pb$	Erro	$^{207}Pb/^{206}Pb$	Erro	ρ	Idade de concórdia	Erro
C16-1	71.8	1.867	0.020	0.192	0.002	0.321	2762.0	25.0
C16-2	91.4	1.766	0.020	0.192	0.002	0.457	2806.0	22.0
C16-3	80.9	1.855	0.024	0.194	0.003	0.433	2777.0	26.0
C16-4	88.0	1.839	0.027	0.190	0.003	0.363	2764.0	31.0
C16-5	86.9	1.929	0.027	0.193	0.003	0.404	2737.0	28.0
C16-6	73.4	1.753	0.023	0.196	0.002	0.384	2832.0	25.0
C16-7	81.9	1.744	0.020	0.195	0.002	0.396	2832.0	22.0
C16-8	47.6	1.903	0.016	0.193	0.002	0.432	2749.0	18.0
C16-9	58.2	1.727	0.026	0.193	0.003	0.408	2842.0	32.0
C16-10	65.1	1.789	0.025	0.190	0.003	0.426	2789.0	29.0
C16-11	94.5	1.784	0.031	0.192	0.003	0.449	2793.0	30.0
C16-12	82.2	1.865	0.024	0.191	0.002	0.448	2758.0	24.0
C16-13	81.8	1.789	0.022	0.194	0.002	0.433	2807.0	25.0
C16-14	91.3	1.911	0.020	0.189	0.002	0.387	2727.0	22.0
C16-15	96.9	1.796	0.026	0.189	0.003	0.410	2778.0	27.0
C16-16	88.0	1.849	0.025	0.189	0.003	0.392	2756.0	31.0
C16-17	122.9	1.754	0.025	0.193	0.003	0.370	2820.0	30.0
C16-18	75.7	1.781	0.024	0.194	0.002	0.287	2806.0	28.0
C16-19	87.9	1.863	0.024	0.192	0.003	0.423	2764.0	27.0
C16-20	132.9	1.766	0.023	0.194	0.003	0.390	2820.0	27.0
C16-21	92.8	1.804	0.023	0.193	0.003	0.446	2801.0	27.0
C16-22	73.0	1.759	0.022	0.192	0.002	0.507	2811.0	22.0
C16-23	87.6	1.835	0.020	0.193	0.002	0.382	2783.0	21.0
C16-24	76.2	1.802	0.017	0.194	0.002	0.353	2802.0	21.0
C16-25	82.5	1.846	0.012	0.193	0.002	0.219	2779.0	18.0
C16-26	79.0	1.845	0.013	0.193	0.002	0.424	2780.0	16.0
C16-27	89.1	1.908	0.013	0.192	0.002	0.274	2742.0	17.0
C16-28	81.6	1.839	0.018	0.193	0.002	0.430	2782.0	21.0
C16-29	78.6	1.796	0.018	0.193	0.002	0.380	2803.0	21.0
C16-30	111.3	1.737	0.018	0.194	0.002	0.480	2838.0	20.0
C16-31	116.0	1.677	0.017	0.192	0.002	0.423	2862.0	21.0
C16-32	68.3	1.800	0.020	0.194	0.002	0.452	2803.0	21.0
C16-33	105.0	1.825	0.017	0.192	0.002	0.504	2782.0	17.0
C16-34	88.7	1.827	0.018	0.194	0.002	0.389	2792.0	20.0
C16-35	95.9	1.826	0.018	0.191	0.002	0.504	2776.0	18.0
C16-36	103.0	1.894	0.017	0.192	0.002	0.449	2747.0	18.0
C16-37	91.9	1.758	0.021	0.197	0.002	0.355	2837.0	24.0
C16-38	65.7	1.840	0.027	0.191	0.003	0.440	2768.0	29.0
C16-39	88.8	1.810	0.021	0.192	0.003	0.405	2794.0	26.0
C16-40	95.5	1.762	0.023	0.193	0.003	0.447	2814.0	26.0
C16-41	99.8	1.771	0.019	0.195	0.003	0.434	2832.0	24.0
C16-42	70.2	1.791	0.024	0.195	0.003	0.474	2814.0	27.0
C16-43	98.3	1.855	0.023	0.194	0.003	0.462	2777.0	26.0

Identificador	U (ppm)	$^{238}U/^{206}Pb$	Erro	$^{207}Pb/^{206}Pb$	Erro	ρ	Idade de concórdia	Erro
C16-44	95.6	1.846	0.025	0.194	0.003	0.440	2779.0	26.0
C16-45	109.0	1.825	0.026	0.190	0.003	0.489	2772.0	26.0
C20-1	41.6	1.847	0.023	0.189	0.003	0.382	2755.8	6.9
C20-2	63.0	1.863	0.026	0.190	0.003	0.437	2754.9	7.1
C20-3	42.3	1.711	0.020	0.190	0.002	0.379	2829.7	6.2
C20-4	63.1	1.890	0.021	0.191	0.002	0.396	2744.6	5.7
C20-5	63.7	1.783	0.023	0.193	0.003	0.401	2812.1	7.2
C20-6	34.1	1.877	0.017	0.192	0.002	0.481	2758.7	4.4
C20-7	73.8	1.714	0.016	0.189	0.002	0.490	2829.0	4.8
C20-8	42.9	1.798	0.019	0.189	0.002	0.443	2786.4	5.9
C20-9	75.9	1.722	0.024	0.193	0.003	0.517	2833.7	6.2
C20-10	108.1	1.843	0.020	0.190	0.002	0.409	2763.0	6.1
C20-11	75.3	1.756	0.025	0.191	0.003	0.430	2813.0	7.3
C20-12	62.5	1.861	0.027	0.194	0.003	0.422	2775.8	7.4
C20-13	38.0	1.814	0.024	0.190	0.002	0.461	2777.2	6.3
C20-14	76.6	1.846	0.024	0.191	0.002	0.368	2767.8	6.8
C20-15	163.4	1.868	0.020	0.191	0.002	0.397	2757.5	6.1
C20-16	79.1	1.773	0.014	0.193	0.002	0.387	2813.6	4.5
C20-17	68.6	1.876	0.027	0.190	0.003	0.462	2745.7	6.7
C20-18	55.0	1.850	0.030	0.191	0.002	0.444	2762.7	7.0
C20-19	97.4	1.832	0.032	0.193	0.003	0.408	2781.9	8.7
C20-20	86.0	1.744	0.025	0.187	0.003	0.422	2792.4	7.2
C20-21	43.6	1.859	0.022	0.190	0.003	0.357	2756.5	7.0
C23-1	72.7	1.863	0.018	0.191	0.002	0.445	2757.9	5.1
C23-2	37.3	1.777	0.018	0.194	0.002	0.333	2820.2	5.8
C23-3	57.1	1.842	0.019	0.190	0.002	0.406	2763.8	6.0
C23-4	49.7	1.868	0.017	0.191	0.002	0.454	2758.2	4.7
C23-5	43.4	1.707	0.015	0.187	0.002	0.423	2822.7	4.9
C23-6	86.9	1.860	0.018	0.190	0.003	0.371	2759.6	6.3
C23-7	75.6	1.843	0.018	0.189	0.002	0.397	2761.2	5.8
C23-8	80.2	1.877	0.025	0.190	0.003	0.380	2744.8	7.7
C23-9	67.4	1.887	0.027	0.191	0.003	0.362	2744.8	7.5
C23-10	67.7	1.859	0.034	0.190	0.003	0.284	2748.4	8.4
C23-11	65.5	1.920	0.023	0.194	0.003	0.434	2740.2	6.7
C23-12	51.5	1.696	0.022	0.193	0.002	0.401	2850.0	6.7
C23-13	65.5	1.671	0.022	0.193	0.002	0.395	2858.3	6.5
C23-14	107.9	1.852	0.021	0.191	0.002	0.461	2764.0	5.5
C23-15	84.3	1.844	0.020	0.192	0.002	0.351	2772.4	6.0
C23-16	74.1	1.842	0.026	0.190	0.003	0.446	2764.6	7.1
C23-17	77.4	1.872	0.021	0.192	0.002	0.367	2759.3	6.0
C23-18	59.2	1.856	0.022	0.189	0.003	0.342	2753.8	7.1
C23-19	90.7	1.688	0.025	0.195	0.003	0.369	2858.6	7.4
C23-20	76.9	1.864	0.018	0.189	0.002	0.432	2749.6	5.1

Identificador	U (ppm)	$^{238}U/^{206}Pb$	Erro	$^{207}Pb/^{206}Pb$	Erro	ρ	Idade de concórdia	Erro
C23-21	51.7	1.802	0.020	0.193	0.003	0.359	2801.6	6.5
C23-22	82.4	1.763	0.025	0.193	0.003	0.388	2813.5	7.2
C23-23	41.2	1.880	0.029	0.193	0.002	0.391	2758.6	7.1
C23-24	80.4	1.658	0.022	0.195	0.002	0.418	2867.2	6.2
C23-25	81.2	1.851	0.017	0.190	0.002	0.378	2761.1	5.2
C23-26	66.1	1.873	0.019	0.189	0.002	0.391	2746.1	5.9
C23-27	53.3	1.825	0.026	0.193	0.003	0.445	2788.7	7.4
C23-28	70.6	1.807	0.028	0.191	0.003	0.514	2785.8	7.5
C23-29	60.9	1.770	0.028	0.186	0.003	0.418	2776.2	7.9
C23-30	77.6	1.837	0.018	0.189	0.002	0.405	2761.9	5.4
C23-31	28.4	1.861	0.021	0.189	0.002	0.426	2750.1	5.9
C23-32	63.7	1.865	0.016	0.191	0.002	0.395	2758.1	4.9
C23-33	64.6	1.686	0.026	0.190	0.003	0.494	2845.4	7.6
C23-34	43.9	1.808	0.020	0.193	0.002	0.412	2797.9	6.1

Nota: U = concentração de urânio, em ppm; $^{238}U/^{206}Pb$ e $^{207}Pb/^{206}Pb$ = razões isotópicas determinadas por LA-ICP-MS; ρ= coeficiente de correlação entre os erros das razões isotópicas; a idade de concórdia corresponde à idade U–Pb calculada para cada análise. Os erros apresentados correspondem a incertezas absolutas de 1σ.

A.3.2 Grãos não atacados

Identificador	U (ppm)	$^{238}U/^{206}Pb$	Erro	$^{207}Pb/^{206}Pb$	Erro	ρ	Idade de concórdia (Ma)	Erro
C16-1	41.8	1.891	0.026	0.192	0.003	0.503	2737.0	43.0
C16-2	52.0	1.947	0.020	0.189	0.002	0.436	2727.0	43.0
C16-3	143.5	1.882	0.021	0.187	0.002	0.367	2719.0	42.0
C16-4	69.7	1.926	0.019	0.194	0.002	0.373	2748.0	42.0
C16-5	77.6	2.001	0.019	0.192	0.002	0.416	2715.0	42.0
C16-6	43.6	1.991	0.024	0.188	0.003	0.423	2695.0	44.0
C16-7	42.9	1.908	0.023	0.201	0.003	0.368	2795.0	43.0
C16-8	78.9	1.998	0.019	0.193	0.002	0.407	2708.0	42.0
C16-9	61.1	1.923	0.023	0.193	0.003	0.378	2742.0	43.0
C16-10	64.4	1.954	0.020	0.191	0.002	0.391	2729.0	43.0
C16-11	66.2	1.955	0.021	0.191	0.002	0.433	2733.0	43.0
C16-12	61.2	1.951	0.021	0.192	0.002	0.395	2741.0	43.0
C16-13	61.5	1.919	0.019	0.191	0.002	0.349	2736.0	43.0
C16-14	35.9	1.984	0.024	0.193	0.003	0.394	2737.0	45.0
C16-15	112.7	1.978	0.019	0.193	0.002	0.442	2736.0	42.0
C16-16	48.6	1.953	0.027	0.189	0.003	0.378	2710.0	44.0
C16-17	58.4	1.977	0.023	0.193	0.002	0.377	2694.0	44.0
C16-18	169.5	2.013	0.026	0.189	0.003	0.411	2738.0	42.0
C16-19	59.4	1.916	0.035	0.191	0.003	0.482	2745.0	44.0
C16-20	114.7	1.807	0.024	0.187	0.003	0.511	2729.0	43.0
C16-21	269.0	1.931	0.024	0.191	0.003	0.388	2753.0	43.0
C16-22	195.2	1.994	0.030	0.192	0.003	0.570	2726.0	42.0
C16-23	42.4	1.986	0.028	0.194	0.003	0.340	2731.0	45.0
C16-24	71.6	1.817	0.025	0.203	0.003	0.425	2850.0	44.0
C16-25	88.5	1.935	0.026	0.189	0.002	0.409	2722.0	42.0
C16-26	185.7	1.932	0.025	0.192	0.003	0.489	2740.0	43.0
C16-27	98.6	1.884	0.025	0.194	0.002	0.408	2766.0	42.0
C16-28	95.6	2.084	0.025	0.190	0.002	0.442	2677.0	43.0
C16-29	73.0	1.876	0.023	0.187	0.002	0.457	2733.0	25.0
C16-30	97.6	1.871	0.021	0.193	0.002	0.467	2764.0	23.0
C16-31	110.5	1.856	0.022	0.196	0.003	0.423	2785.0	27.0
C16-32	336.7	1.923	0.027	0.191	0.002	0.523	2730.0	24.0
C16-33	89.3	2.125	0.027	0.193	0.003	0.404	2639.0	28.0
C16-34	59.3	1.861	0.023	0.190	0.003	0.491	2754.0	25.0
C16-35	173.0	2.063	0.020	0.189	0.002	0.282	2658.0	22.0
C16-36	86.0	1.800	0.021	0.196	0.003	0.284	2817.0	27.0
C16-37	2448.5	5.719	0.071	0.171	0.002	0.468	1143.0	30.0
C16-38	179.9	1.857	0.017	0.192	0.002	0.402	2766.0	19.0
C16-39	299.4	1.853	0.019	0.190	0.002	0.459	2758.0	19.0
C16-40	117.0	1.920	0.021	0.191	0.002	0.472	2730.0	21.0
C16-41	73.2	1.882	0.019	0.187	0.002	0.384	2728.0	23.0
C16-42	80.8	1.961	0.016	0.195	0.002	0.406	2719.0	19.0

C16-43	107.5	1.916	0.012	0.189	0.002	0.412	2721.0	15.0
C16-44	51.4	1.899	0.014	0.192	0.002	0.228	2742.0	21.0
C16-45	68.1	1.884	0.016	0.189	0.002	0.337	2739.0	21.0
C16-46	56.2	1.897	0.014	0.192	0.002	0.216	2743.0	22.0
C16-47	55.1	1.882	0.023	0.201	0.003	0.378	2798.0	26.0
C16-48	61.3	2.710	0.026	0.200	0.002	0.287	2310.0	29.0
C16-49	106.6	1.742	0.016	0.218	0.002	0.353	2948.0	20.0
C16-50	70.7	2.020	0.017	0.189	0.002	0.416	2668.0	19.0
C16-51	172.4	1.966	0.014	0.188	0.001	0.399	2693.0	15.0
C16-52	94.6	1.820	0.020	0.197	0.002	0.359	2810.0	23.0
C16-53	75.6	1.851	0.018	0.193	0.002	0.437	2774.0	21.0
C16-54	507.6	1.818	0.013	0.190	0.001	0.449	2776.0	14.0
C16-55	75.2	1.996	0.016	0.193	0.002	0.402	2695.0	18.0
C16-56	70.6	1.996	0.028	0.193	0.003	0.489	2700.0	29.0
C16-57	38.7	1.911	0.036	0.185	0.004	0.413	2705.0	39.0
C16-58	47.2	2.010	0.032	0.189	0.004	0.465	2670.0	35.0
C16-59	263.4	1.927	0.029	0.190	0.003	0.521	2722.0	27.0
C16-60	64.5	1.999	0.033	0.222	0.004	0.412	2843.0	34.0
C16-61	61.0	1.935	0.030	0.196	0.003	0.525	2744.0	29.0
C16-62	122.2	2.093	0.032	0.179	0.002	0.436	2597.0	28.0
C16-63	50.5	1.924	0.028	0.198	0.003	0.476	2762.0	30.0
C16-64	56.7	1.929	0.031	0.194	0.003	0.443	2738.0	33.0
C16-65	111.6	1.916	0.027	0.193	0.003	0.433	2742.0	28.0
C16-66	126.1	1.804	0.018	0.195	0.002	0.423	2803.0	19.0
C16-67	60.9	1.822	0.033	0.191	0.003	0.403	2777.0	33.0
C16-68	111.3	2.076	0.027	0.180	0.003	0.506	2598.0	26.0
C16-69	45.3	1.768	0.015	0.203	0.002	0.251	2872.0	23.0
C16-70	75.7	1.895	0.019	0.190	0.002	0.361	2739.0	22.0
C16-71	68.2	1.940	0.021	0.194	0.003	0.387	2730.0	25.0
C16-72	50.7	1.801	0.020	0.210	0.003	0.341	2880.0	25.0
C16-73	69.0	1.983	0.025	0.189	0.003	0.416	2687.0	26.0
C16-74	176.1	1.884	0.028	0.190	0.003	0.493	2743.0	28.0
C16-75	86.0	1.939	0.027	0.191	0.003	0.427	2721.0	28.0
C16-76	76.3	1.843	0.027	0.189	0.003	0.442	2757.0	29.0
C16-77	67.2	2.067	0.032	0.190	0.003	0.463	2655.0	30.0
C16-78	101.8	1.957	0.030	0.195	0.003	0.552	2731.0	28.0
C16-79	237.5	2.025	0.031	0.176	0.002	0.509	2607.0	26.0
C16-80	59.5	1.997	0.034	0.183	0.003	0.483	2652.0	33.0
C16-81	19.2	2.656	0.047	0.179	0.004	0.430	2274.0	43.0
C16-82	80.1	2.162	0.034	0.183	0.003	0.413	2590.0	29.0
C16-83	46.6	1.902	0.040	0.194	0.004	0.321	2758.0	43.0
C16-84	54.6	1.909	0.029	0.191	0.003	0.415	2735.0	32.0
C16-85	43.7	1.927	0.037	0.194	0.003	0.404	2744.0	37.0
C16-86	171.0	1.891	0.027	0.191	0.003	0.421	2743.0	28.0
C16-87	91.7	1.881	0.027	0.191	0.003	0.486	2750.0	29.0

C16-88	87.9	1.970	0.030	0.191	0.003	0.415	2703.0	33.0
C16-89	70.5	1.916	0.028	0.187	0.003	0.434	2713.0	31.0
C16-90	80.7	2.115	0.031	0.197	0.003	0.404	2663.0	32.0
C16-91	220.2	2.063	0.030	0.190	0.003	0.472	2661.0	27.0
C16-92	105.6	1.995	0.035	0.191	0.003	0.487	2695.0	33.0
C16-93	58.4	1.876	0.029	0.185	0.003	0.431	2724.0	34.0
C16-94	282.6	1.803	0.024	0.191	0.003	0.482	2788.0	26.0
C16-95	64.5	1.828	0.028	0.190	0.003	0.478	2768.0	28.0
C16-96	108.9	1.831	0.030	0.193	0.003	0.417	2783.0	32.0
C16-97	186.6	1.727	0.026	0.190	0.003	0.569	2819.0	26.0
C16-98	74.9	1.953	0.028	0.191	0.003	0.491	2716.0	27.0
C16-99	55.6	2.699	0.040	0.150	0.003	0.361	2160.0	35.0
C16-100	65.9	1.852	0.027	0.188	0.003	0.349	2744.0	30.0
C16-101	55.2	1.857	0.017	0.201	0.002	0.421	2810.0	20.0
C16-102	56.8	1.877	0.015	0.189	0.002	0.349	2744.0	20.0
C20-1	30.0	1.911	0.027	0.191	0.003	0.442	2733.9	7.6
C20-2	27.5	1.913	0.023	0.186	0.002	0.331	2706.0	6.8
C20-3	91.7	1.894	0.019	0.188	0.002	0.515	2726.9	4.7
C20-4	29.6	1.935	0.027	0.189	0.003	0.398	2709.3	8.1
C20-5	44.0	1.883	0.022	0.190	0.003	0.308	2743.9	7.5
C20-6	87.2	1.922	0.018	0.187	0.002	0.392	2710.7	5.2
C20-7	149.6	1.861	0.018	0.190	0.002	0.335	2752.8	5.4
C20-8	167.0	1.877	0.016	0.189	0.002	0.392	2739.1	4.6
C20-9	24.7	1.923	0.023	0.190	0.003	0.344	2718.8	7.6
C20-10	40.0	2.236	0.031	0.183	0.003	0.401	2518.2	8.5
C20-11	31.3	1.898	0.023	0.190	0.003	0.385	2736.4	7.4
C20-12	22.2	1.921	0.023	0.192	0.003	0.337	2730.5	7.9
C20-13	620.3	1.922	0.022	0.190	0.002	0.501	2723.4	5.3
C20-14	36.5	1.947	0.024	0.190	0.003	0.384	2709.0	7.2
C20-15	48.1	1.882	0.023	0.188	0.002	0.513	2731.2	5.8
C20-16	25.5	1.883	0.024	0.187	0.003	0.305	2728.5	7.5
C20-17	39.1	1.883	0.023	0.186	0.003	0.400	2725.5	6.6
C20-18	110.6	2.020	0.017	0.203	0.002	0.281	2725.8	5.6
C20-19	43.8	2.065	0.024	0.190	0.003	0.384	2643.9	6.8
C20-20	31.8	1.909	0.021	0.188	0.002	0.364	2721.4	6.5
C20-21	34.9	2.334	0.028	0.194	0.003	0.377	2532.9	7.2
C20-22	58.0	1.924	0.024	0.192	0.002	0.342	2732.2	6.7
C20-23	34.8	1.872	0.025	0.190	0.003	0.408	2750.7	7.0
C20-24	67.0	1.882	0.018	0.184	0.002	0.357	2719.6	6.0
C20-25	46.3	1.931	0.020	0.190	0.002	0.379	2719.1	5.6
C20-26	39.0	1.999	0.020	0.189	0.002	0.381	2675.6	5.9
C23-1	42.4	1.913	0.020	0.189	0.003	0.356	2719.8	6.7
C23-2	90.3	1.950	0.018	0.191	0.002	0.366	2714.6	5.3
C23-3	63.7	1.920	0.023	0.193	0.002	0.333	2741.9	6.5
C23-4	110.8	1.946	0.023	0.192	0.002	0.461	2722.0	6.0

C23-5	70.3	1.926	0.023	0.191	0.003	0.420	2723.7	6.5
C23-6	99.7	1.915	0.021	0.190	0.002	0.474	2725.6	5.1
C23-7	33.8	1.860	0.022	0.190	0.003	0.331	2758.5	7.7
C23-8	123.8	1.956	0.016	0.191	0.002	0.386	2709.3	4.5
C23-9	41.4	1.939	0.024	0.191	0.003	0.470	2722.6	6.3
C23-10	69.2	1.929	0.022	0.189	0.002	0.390	2715.7	6.5
C23-11	57.1	1.981	0.024	0.191	0.002	0.374	2703.4	6.2
C23-12	42.3	1.968	0.024	0.187	0.003	0.458	2686.1	6.5
C23-13	40.5	1.962	0.022	0.192	0.002	0.357	2711.1	6.3
C23-14	47.4	1.906	0.022	0.204	0.002	0.492	2804.0	5.5
C23-15	147.0	1.952	0.022	0.189	0.002	0.568	2706.9	4.8
C23-16	129.1	1.937	0.021	0.189	0.002	0.362	2712.2	5.9
C23-17	122.6	1.963	0.020	0.191	0.002	0.522	2708.2	5.1
C23-18	147.6	1.917	0.018	0.187	0.002	0.372	2714.1	5.1
C23-19	39.9	1.996	0.020	0.190	0.002	0.372	2684.3	6.1
C23-20	53.0	1.977	0.023	0.187	0.002	0.280	2679.5	7.1
C23-21	72.3	1.982	0.022	0.191	0.003	0.392	2692.1	6.5
C23-22	27.3	1.870	0.022	0.189	0.003	0.289	2743.7	7.3
C23-23	30.7	1.915	0.029	0.186	0.003	0.435	2706.0	7.9
C23-24	114.4	1.907	0.019	0.189	0.002	0.440	2725.3	5.0
C23-25	124.2	1.978	0.024	0.191	0.003	0.417	2699.3	6.9
C23-26	58.6	1.972	0.027	0.189	0.003	0.495	2693.0	6.8
C23-27	60.5	2.015	0.027	0.191	0.003	0.430	2680.3	7.2
C23-28	72.9	2.000	0.023	0.192	0.003	0.335	2685.9	7.2
C23-29	40.3	1.903	0.019	0.189	0.002	0.321	2728.6	5.7
C23-30	43.1	1.913	0.021	0.190	0.002	0.318	2726.9	6.5
C23-31	57.0	1.891	0.029	0.191	0.003	0.427	2743.5	8.3
C23-32	40.3	1.908	0.028	0.190	0.003	0.335	2733.3	8.3

Nota: U = concentração de urânio, em ppm; $^{238}U/^{206}Pb$ e $^{207}Pb/^{206}Pb$ = razões isotópicas determinadas por LA-ICP-MS; ρ= coeficiente de correlação entre os erros das razões isotópicas; a idade de concórdia corresponde à idade U–Pb calculada para cada análise. Os erros apresentados correspondem a incertezas absolutas de 1σ.

B Dados analíticos de Traços de Fissão por Laser Ablation

B.1 Apatita – Domínio São José do Campestre

Grão	Ns	A	U	1σ	Age	1σ
		(10^{-5} cm^2)	(ppm)		(Ma)	
CEBP035-1	7	3422.50	8.83	0.35	44.6	33.9
CEBP035-2	32	1711.25	28.14	1.06	127.1	45.9
CEBP035-3	28	1711.25	40.1	1.51	78.3	30.2
CEBP035-4	30	1711.25	59.36	2.23	56.8	21.2
CEBP035-5	35	1711.25	62.39	2.34	63	21.8
CEBP035-6	35	1711.25	80.72	3.02	48.7	16.9
CEBP035-7	1	1089	1.351	0.062	129.9	260.1
CEBP035-8	21	1089	66.66	2.50	55.6	24.6
CEBP035-9	11	706.50	40.86	1.54	73.2	44.5
CEBP035-10	2	706.50	5.94	0.24	91.4	129.4
CEBP035-11	53	5476.00	57.02	2.14	32.7	9.3
CEBP035-12	30	616.05	156.91	5.87	59.7	22.2
CEBP035-13	8	616.05	54.27	2.04	46	32.7
CEBP035-14	14	1089	34.61	1.30	71.3	38.5
CEBP035-15	8	1089	57.06	2.14	24.8	17.6
CEBP035-16	2	1089	12.26	0.47	28.9	40.9
CEBP035-17	60	1232.1	112.19	4.20	83.3	22.4
CEBP035-18	35	2395.75	38.45	1.45	73	25.3
CEBP035-19	5	1089	50.53	1.90	17.5	15.7
CEBP035-20	35	1095.2	72.99	2.74	84	29.1
CEBP035-21	41	616.05	92.72	3.48	137.1	44.1
CEBP035-22	31	616.05	111.02	4.17	86.9	31.9
CEBP035-23	7	616.05	128.01	4.82	17.1	13
CEBP035-24	38	1095.20	155.08	5.82	43.1	14.3
CEBP035-25	3	1095.20	26.22	0.99	20.1	23.3
CEBP035-26	5	616.05	95.72	3.60	16.4	14.7
CEBP035-27	32	616.05	59.08	2.22	167.6	60.6
CEBP035-28	4	616.05	13.53	0.52	92	92.3
CEBP035-29	35	821.4	82.88	3.12	98.5	34.1
CEBP035-30	5	616.05	49.8	1.88	31.4	28.2
CEBP035-31	64	1369.00	33.19	1.26	266.4	69.6
CEBP035-32	13	1369.00	99.44	3.74	18.4	10.3
CEBP035-33	26	616.05	40.54	1.54	198	79.1
CEBP035-34	9	616.05	153.13	5.75	18.4	12.3
CEBP035-35	36	616.05	167.6	6.30	67	22.9
CEBP035-36	10	616.05	31.77	1.20	97.9	62.4
CEBP035-37	57	821.40	60.05	2.26	219.4	60.4
CEBP035-38	6	616.05	60.24	2.30	31.1	25.5
CEBP035-39	5	616.05	25.62	0.98	60.9	54.7
CEBP035-40	86	1711.25	137.2	5.16	70.3	16.1
CEBP035-41	15	616.05	70.44	2.66	66.4	34.7
CEBP035-42	92	1711.25	162.58	6.12	63.5	14.1
CEBP035-43	9	616.05	18.08	0.69	154.2	103.5

Grão	Ns	A	U	1σ	Age	1σ
		(10^{-5} cm^2)	(ppm)		(Ma)	
CEBP035-44	38	1711.25	67.26	2.54	63.4	21.1
CEBP035-45	4	616.05	66.84	2.53	18.7	18.8
CEBP035-46	66	1095.20	210.29	7.93	55.1	14.2
CEBP035-47	33	616.05	140.93	5.32	73	26
CEBP035-48	4	616.05	115.29	4.36	10.9	10.9
CEBP035-49	25	616.05	135.48	5.12	57.6	23.4
CEBP035-50	13	616.05	71.13	2.69	57	31.9
CEBP035-51	52	1369.00	152.62	5.77	47.9	13.8
CEBP035-52	95	1711.25	163.36	6.17	65.3	14.3
CEBP035-53	6	616.05	34.48	1.31	54.3	44.5
CEBP035-54	7	616.05	15.93	0.61	136.3	103.5
CEBP035-55	161	3696.3	151.46	5.73	55.3	9.7
CEBP035-56	57	1711.25	74.98	2.85	85.2	23.5
CEBP035-57	75	1711.25	185.48	7.02	45.5	11
CEBP035-58	27	616.05	63.02	2.39	132.9	52.1
CEBP035-59	17	616.05	60.13	2.29	88	43.2
CEBP035-60	63	1711.25	142.33	5.39	49.8	13.1
CEBP035-61	8	616.05	94.16	3.57	26.6	18.9
CEBP035-62	48	1095.2	77.77	2.95	107.9	32.2
CEBP035-63	28	1026.75	77.73	2.95	67.4	26
CEBP035-64	6	1026.75	41.07	1.57	27.4	22.5
CEBP035-65	5	616.05	16.23	0.63	95.8	86.1
CEBP035-66	61	1711.25	177.67	6.76	38.6	10.3
CEBP035-67	58	1711.25	118.61	4.51	54.9	15
CEBP035-68	58	1369	201.43	7.66	40.5	11.1
CEBP035-69	32	1711.25	28.81	1.11	124.1	44.9
CEBP035-70	30	1711.25	29.25	1.12	114.7	42.8
CEBP035-71	31	1711.25	35.25	1.35	98.5	36.2
CEBP035-72	5	1711.25	12.07	0.47	46.6	41.8
CEBP035-73	24	1711.25	36.32	1.39	74.1	30.8
CEBP035-74	34	616.05	219.72	8.37	48.3	17
CEBP035-75	7	616.05	27.28	1.05	79.9	60.7
CEBP035-76	21	616.05	70.47	2.7	92.7	41.1
CEBP035-77	26	616.05	87.55	3.35	92.4	36.9
CEBP035-78	4	616.05	11.44	0.45	108.7	109
CEBP035-79	4	616.05	1.331	0.061	879.2	882.9
CEBP035-80	21	616.05	58.36	2.24	111.8	49.5
CEBP035-81	11	616.05	49.52	1.9	69.3	42.1
CEBP035-82	36	576	134.5	5.15	89.1	30.5
CEBP035-83	32	576	206.9	7.92	51.6	18.7
CEBP035-84	5	616.05	19.37	0.75	80.4	72.2
CEBP035-85	4	1711.25	16.53	0.65	27.2	27.3
CEBP035-86	16	1711.25	121.77	4.7	14.8	7.5

Grão	Ns	A	U	1σ	Age	1σ
		(10^{-5} cm^2)	(ppm)		(Ma)	
CEBP035-87	4	616.05	30.34	1.18	41.2	41.3
CEBP035-88	29	616.05	115.59	4.45	78.2	29.6
CEBP035-89	3	616.05	6.53	0.26	142.4	164.8
CEBP035-90	29	616.05	115.66	4.45	78.1	29.6
CEBP035-91	82	1711.25	146.66	5.65	62.8	14.7
CEBP035-92	42	1711.25	80.35	3.1	58.7	18.7
CEBP035-93	43	1711.25	97.63	3.76	49.5	15.6
CEBP035-94	6	616.05	23.73	0.93	78.8	64.6
CEBP035-95	71	1711.25	192.13	7.41	41.6	10.4
CEBP035-96	17	1711.25	115.45	4.46	16.6	8.2
CEBP035-97	14	1711.25	58.94	2.28	26.7	14.4
CEBP035-98	26	1711.25	232	8.95	12.6	5.1
CEBP035-99	75	1711.25	215.96	8.34	39.1	9.5
CEBP035-100	10	1711.25	42.03	1.63	26.8	17.1
CEBP035-101	54	1369	110.58	4.28	68.5	19.4
CEBP035-102	10	1711.25	25.38	0.99	44.3	28.2
CEBP035-103	75	1711.25	143.73	5.57	58.6	14.3
CEBP035-104	9	1711.25	59.54	2.33	17	11.4
CEBP035-105	11	616.05	22.7	0.89	150.1	91.3
CEBP035-106	21	616.05	59.17	2.31	110.3	48.9
CEBP035-107	12	1711.25	7.43	0.3	179.7	104.8
BJ19C-1	26	1711.25	30.03	1.1	97	39
BJ19C-2	57	1711.25	63.99	2.33	100	27
BJ19C-3	42	1711.25	30.69	1.13	153	48
BJ19C-4	63	1711.25	54.36	1.98	129	34
BJ19C-5	42	1095.20	64.69	2.36	113	36
BJ19C-6	47	1711.25	38.82	1.42	135	41
BJ19C-7	15	616.05	29.96	1.1	155	81
BJ19C-8	51	1711.25	34.3	1.26	166	48
BJ19C-9	22	616.05	33.71	1.27	201	87
BJ19C-10	22	616.05	20.67	0.76	325	141
BJ19C-11	104	2464.20	49.31	1.8	163	34
BJ19C-12	59	1711.25	55.03	2.01	120	32
BJ19C-13	60	1711.25	63.45	2.32	106	28
BJ19C-14	41	1711.25	33.84	1.24	135	43
BJ19C-15	42	1711.25	31.65	1.16	148	47
BJ19C-16	81	2395.75	30.65	1.12	210	49
BJ19C-17	30	1095.20	36.6	1.34	143	53
BJ19C-18	45	1711.25	55.25	2.02	91	28
BJ19C-19	209	6845.00	47.27	1.73	124	19
BJ19C-20	136	6845.00	31.51	1.16	121	23
BJ19C-21	64	1711.25	56.66	2.07	126	33
BJ19C-22	26	1711.25	28.83	1.06	101	40

Grão	Ns	A	U	1σ	Age	1σ
		(10^{-5} cm^2)	(ppm)		(Ma)	
BJ19C-23	80	1711.25	54.11	1.98	165	39
BJ19C-24	37	1711.25	89.98	3.29	46	16
BJ19C-25	39	1711.25	44.45	1.63	98	32
BJ19C-26	38	1711.25	49.18	1.8	87	29
BJ19C-27	22	1095.20	57.85	2.12	67	29
BJ19C-28	60	1711.25	67.43	2.47	100	27
BJ19C-29	48	1711.25	95.27	3.48	57	17
BJ19C-30	38	1711.25	29.64	1.09	143	48
BJ19C-31	49	1711.25	72.95	2.67	75	22
BJ19C-32	75	1711.25	65.54	2.4	128	31
BJ19C-33	57	1711.25	69.64	2.55	92	25
BJ19C-34	31	1095.20	55.26	2.03	98	36
BJ19C-35	29	1026.75	35.93	1.32	150	57
BJ19C-36	41	1711.25	36.34	1.34	126	40
BJ19C-37	27	1711.25	36.64	1.35	83	32
BJ19C-38	27	1095.20	42.09	1.55	112	44
BJ19C-39	60	1711.25	51.9	1.91	129	35
BJ19C-40	82	1711.25	74.39	2.73	123	29
BJ19C-41	35	1711.25	65.04	2.39	60	21
BJ19C-42	32	1711.25	33.8	1.25	106	38
BJ19C-43	49	1711.25	77.85	2.85	71	21
BJ19C-44	110	1711.25	152.07	5.56	81	17
BJ19C-45	60	1711.25	57.17	2.1	117	32
BJ19C-46	82	1711.25	124.23	4.55	74	17
BJ19C-47	67	1711.25	57.37	2.11	130	33
BJ19C-48	42	1711.25	40.56	1.5	116	37
BJ19C-49	80	1711.25	25.46	0.94	345	81
BJ19C-50	49	1711.25	51.76	1.91	106	31
BJ19C-51	41	1711.25	39.51	1.46	116	37
BJ19C-52	39	1711.25	30.53	1.13	143	47
BJ19C-53	48	1711.25	44.89	1.66	120	36
BJ19C-54	34	1711.25	31.35	1.16	121	43
CEBP321-1	12	1711.25	18.44	0.73	73	43
CEBP321-2	17	1711.25	14.47	0.57	131	64
CEBP321-3	23	1711.25	12.27	0.49	208	88
CEBP321-4	10	616.05	9.87	0.4	310	198
CEBP321-5	13	616.05	45.46	1.78	89	50
CEBP321-6	14	1711.25	18.88	0.75	83	45
CEBP321-7	15	1711.25	9.9	0.4	169	88
CEBP321-8	4	205.35	15.94	0.63	232	232
CEBP321-9	10	1095.20	12.08	0.48	144	92
CEBP321-10	19	2738.00	14.97	0.6	89	41
CEBP321-11	4	1711.25	9.46	0.38	48	48

Grão	Ns	A	U	1σ	Age	1σ
		(10^{-5} cm^2)	(ppm)		(Ma)	
CEBP321-12	10	616.05	20.65	0.82	150	96
CEBP321-13	4	616.05	14.82	0.59	84	84
CEBP321-14	7	1095.2	8.99	0.36	136	103
CEBP321-15	52	1711.25	42.13	1.67	138	40
CEBP321-16	11	1711.25	13.29	0.53	93	56
CEBP321-17	4	616.05	12.52	0.51	99	100
CEBP321-18	4	616.05	11.06	0.45	112	113
CEBP321-19	5	616.05	10.88	0.44	142	128
CEBP321-20	11	616.05	13.13	0.53	257	157
CEBP321-21	6	616.05	6.61	0.27	278	228
CEBP321-22	13	1711.25	18.92	0.76	77	43
CEBP321-23	14	1711.25	10.42	0.42	150	81
CEBP321-24	5	616.05	20.32	0.81	77	69
CEBP321-25	3	1095.20	9.89	0.4	53	62
CEBP321-26	21	1095.20	19.48	0.78	187	83
CEBP321-27	12	1026.75	12.73	0.52	175	102
CEBP321-28	6	616.05	9.34	0.39	198	163
CEBP321-29	2	616.05	11.59	0.47	54	76
CEBP321-30	16	1095.20	16.03	0.65	174	88
CEBP321-31	7	1095.20	12.04	0.49	102	77
CEBP321-32	3	616.05	7.03	0.29	132	153
CEBP321-33	4	616.05	5.35	0.22	230	231
CEBP321-34	4	616.05	12.57	0.52	99	99
CEBP321-35	3	616.05	6.1	0.26	152	176
CEBP321-36	27	1095.20	22.41	0.91	209	82
CEBP321-37	2	616.05	13.21	0.54	47	67
CEBP321-38	4	616.05	21.9	0.89	57	57
CEBP321-39	19	1369.00	16.19	0.66	163	76
CEBP321-40	3	1369.00	13.25	0.54	32	37
CEBP321-41	26	616.05	31.22	1.26	256	102
CEBP321-42	7	1711.25	11.26	0.46	70	53
CEBP321-43	9	1711.25	11.07	0.46	91	61
CEBP321-44	8	616.05	15.52	0.63	160	114
CEBP321-45	21	1711.25	17.76	0.72	132	59
CEBP321-46	16	1711.25	14.05	0.58	127	64
CEBP321-47	15	1711.25	16.74	0.68	100	52
CEBP321-48	6	1095.20	8.99	0.38	117	96
CEBP321-49	25	1095.20	31.88	1.29	137	56
CEBP321-50	20	1095.20	28.83	1.17	121	55
CEBP321-51	4	616.05	20.33	0.83	61	62
CEBP321-52	13	616.05	22.02	0.9	182	102
CEBP321-53	10	616.05	17.92	0.74	173	110
CEBP321-54	26	1026.75	47.75	1.94	102	41

Grão	Ns	A	U	1σ	Age	1σ
		(10^{-5} cm^2)	(ppm)		(Ma)	
CEBP321-55	7	616.05	10.49	0.44	206	157
CEBP321-56	14	1711.25	25.35	1.04	62	34
CEBP321-57	22	1711.25	27.18	1.12	91	39
CEBP321-58	7	616.05	12.34	0.51	175	133
CEBP321-59	6	1095.20	9.96	0.42	105	86
CEBP321-60	3	1095.2	31.11	1.28	17	20
CEBP321-61	1	1095.2	16.96	0.7	10	21
CEBP321-62	3	616.05	12.44	0.52	75	87
CEBP321-63	2	616.05	8.86	0.37	70	100
CEBP321-64	23	1711.25	22.87	0.95	112	48
CEBP321-65	9	1711.25	10.39	0.44	97	65
CEBP321-66	15	1711.25	13.66	0.57	123	64
CEBP321-67	23	1711.25	27.34	1.13	94	40
CEBP321-68	9	1095.2	14.88	0.62	106	71
CEBP321-69	17	616.05	121.19	4.98	44	22
CEBP321-70	7	616.05	24.66	1.02	88	67
CEBP321-71	13	1711.25	18.57	0.77	79	44
CEBP321-72	18	1711.25	16.78	0.7	120	57
CEBP321-73	7	1095.2	13.26	0.56	92	70
CEBP321-74	14	616.05	17.35	0.72	248	134
CEBP321-75	6	616.05	12.41	0.52	150	123
CEBP321-76	6	616.05	15.41	0.65	121	99
CEBP321-77	11	1711.25	17.74	0.74	70	42
CEBP321-78	6	1711.25	10.92	0.46	62	51
CEBP321-79	15	1711.25	32.08	1.33	53	27
CEBP321-80	23	1711.25	22.25	0.93	116	49
CEBP321-81	15	1711.25	22.36	0.93	75	39

Nota: Ns = número de traços de fissão espontâneos contados; A = área analisada, expressa em 10^{-5} cm^2; U = concentração de urânio, em ppm; 1σ= incerteza associada à concentração de U ou à idade, conforme a coluna correspondente; Age = idade TFLA individual do grão, em Ma.

B.2 Apatita – Província Mineral de Carajás

Grão	Ns	A	U	1σ	Age	1σ
		(10^{-5} cm^2)	(ppm)		(Ma)	
C01-1	45	1711.25	7.07	3.13	680.9	318.2
C01-2	53	1711.25	99.06	10.28	60.1	10.3
C01-3	8	1711.25	7.42	0.60	120.6	43.7
C01-4	10	1711.25	2.18	0.18	497.8	162.8
C01-5	22	1095.2	13.91	1.14	272.9	62.3
C01-6	60	1711.25	51.88	19.89	129.2	52.3
C01-7	33	1711.25	1.44	0.12	2172.1	419.3
C01-8	35	1711.25	24.22	2.00	161.1	30.3
C01-9	20	1711.25	10.83	1.31	205.1	52.2
C01-10	43	1711.25	16.15	1.31	293.6	50.7
C01-11	30	1711.25	22.68	1.84	147.6	29.5
C01-12	35	1711.25	21.86	1.77	178.2	33.4
C01-13	24	1711.25	638.16	283.33	4.2	2.1
C01-14	38	1711.25	36.83	5.11	115.4	24.6
C01-15	22	1711.25	5.24	0.43	457.6	104.4
C01-16	30	1711.25	51.78	16.46	65	23.8
C01-17	7	1711.25	1.47	0.12	515.5	199.6
C01-18	20	1711.25	37.96	3.07	59.2	14.1
C01-19	57	1711.25	83.48	6.82	76.6	11.9
C01-20	8	1711.25	8.37	0.88	107	39.5
C01-21	50	1095.2	1.72	0.15	3774.7	629.8
C01-22	46	1711.25	7.02	0.59	700.4	118.9
C01-23	47	1711.25	66.30	5.45	79.5	13.3
C01-24	59	1711.25	9.47	0.81	667.5	103.9
C01-25	5	616.05	3.05	0.30	494.9	226.6
C01-26	37	1711.25	32.12	2.87	128.7	24.1
C01-27	15	1711.25	13.50	1.10	124.1	33.6
C01-28	56	1711.25	17.41	1.58	353.1	57.1
C01-29	60	1711.25	59.92	6.09	112	18.4
C01-30	28	1711.25	31.61	2.55	99.2	20.4
C01-31	30	1711.25	28.68	2.38	117	23.4
C01-32	35	1711.25	5.30	0.54	705.4	139.2
C01-33	25	1711.25	0.84	0.07	2714.1	593.4
C01-34	34	1711.25	8.50	0.76	436	84.3
C01-35	55	1711.25	3.91	0.67	1419.2	309.3
C01-36	46	1095.2	98.54	7.95	81.8	13.7
C01-37	46	1711.25	25.07	2.12	203.8	34.6
C01-38	48	1711.25	25.58	5.11	208.4	51.3
C01-39	33	1711.25	6.06	0.49	586.6	112.7
C01-40	26	1369	19.76	1.67	183	39.1
C01-41	62	1711.25	7.26	0.93	897.5	161.9
C01-42	35	1711.25	16.63	1.43	233.3	44.2
C01-43	57	1711.25	9.35	0.76	653.7	101.6

Grão	Ns	A	U	1σ	Age	1σ
		(10^{-5} cm^2)	(ppm)		(Ma)	
C01-44	26	1711.25	10.89	0.96	264	56.8
C01-45	27	1711.25	15.78	1.29	190.2	39.8
C01-46	75	1711.25	5.25	0.44	1438.2	205.6
C01-47	54	1711.25	87.67	8.19	69.1	11.4
C01-48	62	1711.25	31.35	6.96	219.4	56.1
C01-49	50	1711.25	8.15	0.71	657.4	109.3
C01-50	32	1711.25	4.34	0.56	782.5	171.1
C01-51	56	1711.25	13.83	1.16	441.5	69.7
C01-52	79	1711.25	14.82	1.28	574.9	81.6
C01-53	41	1711.25	32.66	2.65	140.1	24.7
C01-54	42	1711.25	14.21	1.23	325.1	57.6
C01-55	35	1711.25	49.55	4.09	79.2	14.9
C01-56	44	1711.25	59.48	4.91	82.9	14.3
C01-57	24	616.05	7.70	0.65	909.5	201
C01-58	45	1711.25	14.66	1.19	337.3	57.3
C01-59	36	1711.25	8.17	0.67	479	89
C01-60	101	1711.25	8.72	0.71	1190.4	152.8
C01-61	28	1711.25	29.36	2.38	106.7	21.9
C01-62	62	1711.25	25.96	2.20	264	40.3
C01-63	29	1711.25	2.22	0.19	1330	271.8
C01-64	48	1711.25	28.51	2.31	187.2	31
C01-65	18	1711.25	12.31	1.08	162.9	41
C01-66	48	1711.25	5.33	0.50	944.2	162.5
C01-67	14	1711.25	15.61	1.53	100.4	28.6
C01-68	47	1711.25	67.19	5.51	78.4	13.1
C02-1	8	1711.25	5.00	0.41	178	65
C02-2	18	1711.25	2.15	0.18	882	220
C02-3	20	1711.25	21.92	1.79	102	24
C02-4	10	1711.25	11.58	0.95	97	32
C02-5	7	1711.25	2.94	0.25	263	102
C02-6	18	1095.2	5.04	0.88	601	176
C02-7	51	1711.25	66.23	5.36	86	14
C02-8	42	1711.25	7.88	0.66	575	101
C02-9	30	1711.25	36.37	2.93	92	18
C02-10	42	1711.25	44.34	3.62	106	19
C02-11	49	1711.25	60.64	4.92	91	15
C02-12	22	1711.25	7.89	0.65	307	70
C02-13	34	1711.25	26.30	2.17	144	27
C02-14	32	1711.25	26.78	2.24	133	26
C02-15	40	1711.25	1.07	0.09	3254	584
C02-16	31	1711.25	20.08	1.64	172	34
C02-17	38	1711.25	23.44	1.89	180	33
C02-18	31	1711.25	30.04	2.42	115	23

Grão	Ns	A	U	1σ	Age	1σ
		(10^{-5} cm^2)	(ppm)		(Ma)	
C02-19	35	1711.25	41.13	3.32	95	18
C02-20	28	1711.25	15.99	1.30	195	40
C02-21	31	1711.25	12.85	1.19	267	54
C02-22	34	1711.25	8.14	0.67	455	87
C02-23	36	1711.25	1.14	0.10	2828	535
C02-24	36	1711.25	20.47	1.65	195	36
C02-25	30	1711.25	18.63	1.51	179	36
C02-26	36	1711.25	20.96	1.69	191	35
C02-27	16	1711.25	4.26	0.35	411	108
C16-1	45	2464.2	56.55	4.56	62.1	10.5
C16-2	42	6845	26.99	2.23	43.8	7.7
C16-3	46	6845	18.07	1.47	71.4	12
C16-4	42	1711.25	306.33	25.02	15.5	2.7
C16-5	70	1711.25	20.94	1.71	366.6	53.1
C16-6	68	6845	15.04	1.22	126.3	18.4
C16-7	105	2464.2	135.52	11.02	60.4	7.7
C16-8	15	1711.25	7.62	0.62	218.4	59.1
C16-9	65	6845	30.62	2.52	59.6	8.9
C16-10	16	1711.25	11.60	0.97	153.8	40.5
C16-11	12	1711.25	8.72	0.73	153.4	46.1
C16-12	17	1711.25	10.01	0.83	188.8	48.4
C16-13	43	1711.25	22.60	1.89	211.2	36.7
C16-14	35	1711.25	26.44	2.14	147.7	27.7
C16-15	55	6845	20.99	3.40	73.5	15.5
C16-16	15	1711.25	16.71	1.36	100.5	27.2
C16-17	46	2464.2	53.75	4.41	66.7	11.3
C16-18	52	2464.2	29.59	2.39	136.2	21.9
C16-19	30	1711.25	30.65	2.49	109.5	21.9
C16-20	21	1711.25	24.01	1.94	98	22.8
C16-21	21	1711.25	21.72	1.78	108.2	25.2
C16-22	12	1711.25	27.79	2.34	48.5	14.6
C16-23	33	1711.25	99.93	8.18	37.2	7.1
C16-24	53	1711.25	186.88	18.52	31.9	5.4
C16-25	53	1711.25	158.17	14.25	37.7	6.2
C16-26	6	1095.2	61.41	5.16	17.2	7.2
C16-27	9	1711.25	23.60	1.94	42.9	14.7
C16-28	59	1711.25	219.79	18.27	30.2	4.7
C16-29	5	1711.25	13.75	1.12	40.9	18.6
C16-30	14	1711.25	16.21	1.37	96.7	27.1
C16-31	46	1711.25	172.83	13.97	30	5
C16-32	18	1711.25	25.63	2.10	78.8	19.7
C16-33	11	1711.25	19.44	1.62	63.5	19.9
C16-34	6	1711.25	14.31	1.16	47.1	19.6

Grão	Ns	A	U	1σ	Age	1σ
		(10^{-5} cm^2)	(ppm)		(Ma)	
C16-35	25	1711.25	43.11	3.54	65.1	14.1
C16-36	6	1711.25	12.20	0.99	55.3	23
C16-37	5	1711.25	14.06	1.14	40	18.2
C16-38	43	1711.25	54.14	4.37	89	15.4

Nota: Ns = número de traços de fissão espontâneos contados; A = área analisada, expressa em 10^{-5} cm^2; U = concentração de urânio, em ppm; 1σ= incerteza associada à concentração de U ou à idade, conforme a coluna correspondente; Age = idade TFLA individual do grão, em Ma.

B.3 Zircão – Província Mineral de Carajás

Grão	Ns	A	U	1σ	Age	1σ
		(10^{-5} cm^2)	(ppm)		(Ma)	
E01-1	154	400	193.2	16.0	364	42
E01-2	132	400	230.0	18.8	264	32
E01-3	156	400	184.4	15.5	386	45
E01-4	169	400	220.6	18.3	350	40
E01-5	162	400	205.2	17.3	361	42
E01-6	141	400	171.9	14.1	375	44
E01-7	173	400	181.0	15.5	434	50
E01-8	202	400	209.9	17.9	437	48
E01-9	166	400	153.5	14.8	489	61
E01-10	148	400	199.1	16.8	340	40
E01-11	79	263	135.6	12.4	404	59
E01-12	177	400	226.2	18.8	358	40
E01-13	175	400	187.1	16.1	425	49
E01-14	145	400	163.2	14.0	405	48
E01-15	202	400	201.5	17.3	455	50
E01-16	163	400	193.2	16.8	385	45
E01-17	157	400	156.4	13.1	455	53
E01-18	172	400	160.5	13.5	485	55
E01-19	184	400	162.6	13.8	511	57
E01-20	159	400	140.2	12.8	512	62
E01-21	145	400	127.1	10.5	515	60
E01-22	174	400	193.4	16.6	410	47
E01-23	151	400	123.4	10.5	551	65
E01-24	201	400	214.9	17.6	425	46
E01-25	137	506	122.6	10.0	403	48
E01-26	191	400	214.3	18.3	406	45
E01-27	204	400	160.9	15.5	570	68
E01-28	154	400	138.0	12.4	504	61
E01-29	189	400	231.4	19.1	373	41
E01-30	147	400	119.9	9.7	552	64
E01-31	190	400	200.4	17.1	431	48
E01-32	179	400	92.7	8.1	849	98
E01-33	195	400	238.9	20.0	373	41
E01-34	163	400	132.3	12.3	555	67
E01-35	176	400	182.7	15.0	438	49
E01-36	176	400	181.2	14.9	441	49
E01-37	134	400	148.9	12.3	410	49
E01-38	37	100	95.9	7.8	688	126
E01-39	176	400	174.5	14.6	457	51
E01-40	190	400	181.5	15.2	474	52
E01-41	113	250	84.8	7.1	931	117
E01-42	177	400	176.3	17.7	455	57
E01-43	137	400	108.8	10.0	566	71
E01-44	164	400	250.9	26.7	300	40
E01-45	174	400	191.3	16.1	414	47
E01-46	153	400	280.8	27.5	251	32
E01-47	178	400	132.0	11.0	604	68

Grão	Ns	A	U	1σ	Age	1σ
		(10^{-5} cm^2)	(ppm)		(Ma)	
E06-1	236	525	162.9	16.5	499	60
E06-2	136	400	131.2	11.2	470	57
E06-3	237	525	272.0	23.7	305	33
E06-4	146	400	239.3	19.9	281	33
E06-5	162	400	241.1	25.2	308	40
E06-6	138	400	103.4	8.7	599	71
E06-7	198	400	159.4	14.3	559	64
E06-8	172	400	139.2	11.9	556	64
E06-9	172	400	151.5	13.2	513	59
E06-10	179	400	110.3	10.1	721	85
E06-11	168	400	119.3	12.8	630	83
E06-12	143	400	143.9	12.3	451	54
E06-13	139	400	104.5	9.0	597	72
E06-14	237	525	110.5	10.0	726	81
E06-15	227	525	130.2	11.4	596	66
E06-16	162	400	133.8	12.8	545	68
E06-17	161	400	128.3	11.4	564	67
E06-18	147	400	193.3	16.6	348	41
E06-19	202	400	139.7	11.9	646	71
E06-20	161	400	130.0	10.9	557	64
E06-21	178	400	155.1	13.4	518	59
E06-22	156	400	172.6	14.4	412	48
E06-23	220	525	152.9	12.9	496	53
E06-24	172	400	98.8	8.9	770	91
E06-25	140	400	253.4	24.3	255	33
E06-26	162	400	84.5	7.3	844	98
E06-27	86	300	159.1	13.0	330	45
E06-28	165	400	211.8	17.2	356	40
E06-29	159	400	138.1	11.7	520	60
E06-30	140	400	147.9	12.3	430	51
E06-31	168	400	118.6	9.7	634	71
E06-32	150	400	154.4	14.2	441	54
E06-33	169	400	115.9	10.0	651	75
E06-34	166	400	112.6	9.3	658	75
E06-35	138	400	143.6	13.1	437	55
E06-36	143	400	240.4	20.1	274	32
E06-37	144	400	97.7	8.2	658	78
E06-38	159	400	210.6	18.5	346	41
E06-39	179	400	117.8	10.1	678	77
E06-40	190	400	181.5	15.2	474	52
E06-41	113	250	84.8	7.1	931	117
E06-42	177	400	176.3	17.7	455	57
E06-43	137	400	108.8	10.0	566	71
E06-44	164	400	250.9	26.7	300	40
E06-45	174	400	191.3	16.1	414	47
E06-46	153	400	280.8	27.5	251	32
E06-47	178	400	132.0	11.0	604	68

Grão	Ns	A	U	1σ	Age	1σ
		(10^{-5} cm^2)	(ppm)		(Ma)	
C11-1	171	400	183.0	15.1	425	48
C11-2	190	340	114.8	9.4	856	93
C11-3	152	300	200.9	17.4	458	54
C11-4	139	425	104.8	8.5	561	66
C11-5	207	525	106.6	8.6	661	70
C11-6	167	400	152.2	12.5	496	56
C11-7	151	400	122.1	10.0	557	64
C11-8	200	400	140.3	11.6	638	69
C15-1	274	650	77.4	6.4	950	97
C15-2	87	200	106.3	8.7	727	98
C15-3	110	250.037428	78.8	6.7	972	124
C15-4	191	425	90.8	7.9	869	98
C15-5	195	525	57.7	4.7	1110	121
C15-6	158	400	72.6	6.0	950	109
C15-7	158	400	79.4	6.6	873	100
C15-8	153	400	79.4	6.5	847	97
C15-9	118	400	98.5	8.5	540	68
C15-10	238	625	89.9	7.5	751	79
C15-11	180	400	92.4	7.6	856	95
C15-12	140	400	84.8	6.9	733	86
C15-13	118	300	79.7	6.6	867	107
C15-14	85	413.82	53.1	4.4	689	94
C16-1	210	400	71.8	6.1	1246	136
C16-2	57	400	91.4	7.4	287	44
C16-3	115	400	80.9	6.6	636	79
C16-4	149	400	88.0	7.2	751	87
C16-5	98	400	86.9	7.2	509	67
C16-6	104	400	73.4	6.1	634	81
C16-7	184	400	65.1	5.6	1208	137
C16-8	44	100	58.2	4.8	1285	221
C16-9	184	400	47.6	4.3	1601	187
C16-10	181	400	81.9	7.1	963	110
C16-11	127	400	94.5	7.7	602	73
C16-12	166	400	82.2	7.9	886	109
C16-13	190	400	81.8	7.1	1008	114
C16-14	165	400	96.9	8.0	754	85
C16-15	146	400	91.3	7.5	711	83
C16-16	104	400	75.7	6.3	616	79
C16-17	117	400	122.9	10.3	433	54
C16-18	88	400	88.0	7.9	454	63
C16-19	213	400	87.9	8.1	1049	120
C16-20	124	400	132.9	11.0	424	52
C16-21	67	100	92.8	7.7	1232	182
C16-22	141	400	73.0	6.6	849	105
C16-23	175	400	87.6	7.7	877	101
C16-24	108	400	76.2	6.5	634	81
C16-25	121	400	82.5	7.1	655	82

Grão	Ns	A	U	1σ	Age	1σ
		(10^{-5} cm^2)	(ppm)		(Ma)	
C16-26	203	400	79.0	6.5	1108	120
C16-27	165	400	89.1	7.3	816	92
C16-28	137	400	81.6	6.8	744	89
C16-29	133	400	78.6	7.4	750	96
C16-30	99	400	111.3	9.2	405	53
C16-31	128	400	116.0	10.5	499	63
C16-32	133	400	91.9	7.8	647	79
C16-33	44	100	68.3	6.3	1109	196
C16-34	46	100	88.7	7.5	908	155
C16-35	48	100	95.9	8.0	878	146
C16-36	165	400	103.0	8.8	712	83
C16-37	165	400	99.8	8.2	734	83
C16-38	82	200	98.3	8.7	740	105
C16-39	125	200	95.6	8.0	1125	137
C16-40	59	100	88.8	7.6	1142	178
C16-41	133	400	95.5	8.0	624	75
C16-42	42	100	70.2	6.3	1037	185
C16-43	120	400	109.0	8.9	498	61
C20-1	46	100	63.0	5.8	1244	217
C20-2	164	400	42.3	4.2	1605	202
C20-3	42	100	63.1	5.4	1144	202
C20-4	56	100	73.8	6.3	1289	205
C20-5	132	400	42.9	3.7	1305	159
C20-6	61	100	75.9	6.3	1357	207
C20-7	117	400	41.6	3.7	1201	154
C20-8	117	400	63.7	5.3	810	101
C20-9	133	400	34.1	3.0	1615	199
C20-10	253	400	163.4	14.3	690	74
C20-11	196	400	62.5	6.9	1328	175
C20-12	192	400	76.6	8.3	1083	141
C20-13	145	400	108.1	9.4	601	72
C20-14	219	400	38.0	3.3	2264	250
C20-15	118	400	79.1	8.2	666	92
C20-16	204	400	86.0	7.8	1028	117
C20-17	62	100	68.6	7.5	1509	253
C20-18	46	100	55.0	5.3	1407	247
C20-19	172	400	43.6	4.9	1629	220
C20-20	159	400	97.4	9.0	725	88
C23-1	136	400	72.7	5.9	824	97
C23-2	154	400	37.3	3.4	1695	206
C23-3	162	400	57.1	4.8	1212	140
C23-4	151	400	49.7	4.3	1291	154
C23-5	111	400	86.9	7.6	574	74
C23-6	156	400	75.6	6.2	904	103
C23-7	123	400	80.2	6.9	684	85
C23-8	37	100	67.7	5.7	953	176
C23-9	45	100	67.4	5.6	1148	196

Grão	Ns	A	U	1σ	Age	1σ
		(10^{-5} cm^2)	(ppm)		(Ma)	
C23-10	85	400	65.5	5.4	583	80
C23-11	116	400	43.4	3.7	1148	144
C23-12	52	100	51.5	4.6	1664	274
C23-13	48	100	65.5	5.6	1250	210
C23-14	26	100	107.9	9.0	438	93
C23-15	30	100	90.7	7.4	594	119
C23-16	40	100	80.4	6.7	874	156
C23-17	213	400	41.2	3.9	2062	243
C23-18	235	400	51.7	4.4	1845	197
C23-19	150	400	77.4	6.5	852	100
C23-20	135	400	74.1	6.6	804	100
C23-21	38	100	84.3	7.0	796	145
C23-22	125	400	59.2	5.2	924	116
C23-23	115	400	76.9	6.3	667	83
C23-24	39	100	82.4	7.0	834	151
C23-25	54	100	64.6	5.6	1408	227
C23-26	273	400	43.9	3.8	2412	257
C23-27	245	400	63.7	6.2	1593	184
C23-28	122	400	66.1	5.4	814	99
C23-29	120	400	81.2	6.9	660	82
C23-30	120	400	70.6	5.9	753	93
C23-31	158	400	53.3	4.6	1261	148
C23-32	117	400	60.9	6.5	846	119
C23-33	128	400	77.6	6.4	732	89
C23-34	71	400	28.4	2.5	1079	160

Nota: Ns = número de traços de fissão espontâneos contados; A = área analisada, expressa em 10^{-5} cm^2; U = concentração de urânio, em ppm; 1σ= incerteza associada à concentração de U ou à idade, conforme a coluna correspondente; Age = idade TFLA individual do grão, em Ma.