

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS – CAMPUS SOROCABA**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA SUSTENTABILIDADE – CCTS**  
**DEPARTAMENTO DE FÍSICA, QUÍMICA E MATEMÁTICA – DFQM**



**TERMOCRONOLOGIA POR TRAÇOS DE FISSÃO EM MONAZITA APLICADA NO  
DOMÍNIO CEARÁ CENTRAL, BRASIL**

Vinicius de Queirós Pereira

Projeto de Dissertação apresentado ao Programa  
de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais  
como requisito parcial à obtenção do título de  
MESTRE EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS.

Orientador: Dr. Prof. Dr. Airton Natanael Coelho Dias

Agência Financiadora: (CAPES)

Sorocaba-SP

2026

Pereira, Vinicius de Queirós

Termocronologia por traços de fissão em monazita aplicada no Domínio Ceará Central, Brasil / Vinicius de Queirós Pereira -- 2026.  
123f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba  
Orientador (a): Prof. Dr. Airton Natanael Coelho Dias  
Banca Examinadora: Prof. Dr. Sandro Guedes de Oliveira, Dr. Cleber José Soares  
Bibliografia

1. Traços de Fissão em Monazita. 2. Borborema. 3. Domínio Ceará Central. I. Pereira, Vinicius de Queirós. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática  
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano -  
CRB/8 6979

---

## Folha de Aprovação

---

Defesa de Dissertação de Mestrado de Vinicius de Queirós Pereira, realizada em 03/02/2026.

### Comissão Julgadora:

Documento assinado digitalmente  
 AIRTON NATANAEL COELHO DIAS  
Data: 21/05/2026 18:40:23-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

#### Orientador

Prof. Dr. Airtton Natanael Coelho Dias  
CTS/UFSCar, campus Sorocaba

Documento assinado digitalmente  
 SANDRO GUEDES DE OLIVEIRA  
Data: 21/05/2026 18:35:50-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Sandro Guedes de Oliveira  
IFGW, Unicamp



---

Dr. Cleber José Soares  
ChronusCamp Research

TERMOCRONOLOGIA POR TRAÇOS DE FISSÃO EM MONAZITA APLICADA  
NO DOMÍNIO CEARÁ CENTRAL, BRASIL

Vinicius de Queirós Pereira

Projeto de Dissertação apresentado ao  
Programa de Pós-Graduação em Ciência dos  
Materiais como requisito parcial à obtenção  
do título de MESTRE EM CIÊNCIA DOS  
MATERIAIS

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Orientador**

Prof. Dr. Airton Natanael Coelho Dias  
Universidade Federal de São Carlos

---

**Membro da Banca**

Prof. Dr. Sandro Guedes de Oliveira  
IFGW, Unicamp

---

**Membro da Banca**

Dr. Cleber José Soares  
ChronusCamp Research

## **AGRADECIMENTOS**

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## RESUMO

A Termocronologia por Traços de Fissão (FT) constitui uma das principais ferramentas geocronológicas para a reconstrução da história térmica de rochas em baixas temperaturas, sendo crucial para o entendimento da evolução geotectônica e da dinâmica superficial do relevo. Fundamentada na contagem de traços microscópicos produzidos pela fissão espontânea do  $^{238}\text{U}$ , essa técnica registra com elevada sensibilidade eventos geológicos associados a regimes térmicos reduzidos. Nesse contexto, a monazita emerge como um termocronômetro particularmente promissor para faixas de temperatura ultrabaixa (25–45 °C), com capacidade de registrar processos sutis, como exumação rasa e erosão recente. Apesar de sua ampla ocorrência e elevado teor de urânio, a aplicação da FT em monazita permaneceu por décadas limitada por entraves metodológicos, sobretudo pela dependência de equações que requeriam o uso de reatores nucleares. Neste trabalho, a Termocronologia por Traços de Fissão em monazita (MFT) foi implementada de forma exploratória no Grupo TRACKs, a partir de uma equação de calibração interna do laboratório, aliada a um protocolo de ataque químico descrito na literatura especializada. Análises realizadas em amostras de referência internacionais provenientes do Japão e da Austrália produziram idades consistentes com dados previamente publicados, demonstrando a robustez e a viabilidade analítica do protocolo adotado. Foi construída uma curva de ataque químico relacionando a densidade superficial de traços e o comprimento de traços confinados com o tempo de ataque. A revelação dos traços durante o ataque químico mostrou-se congruente com resultados previamente reportados, sendo que pequenas variações observadas podem estar associadas ao grau de dano radiogênico acumulado. Esses resultados evidenciam a superioridade da abordagem step-etch em relação à utilização de tempos fixos de ataque químico. A aplicação da MFT em amostras brasileiras do Domínio Ceará Central resultou em idades entre  $2,10 \pm 0,25$  e  $12,15 \pm 1,40$  Ma, associadas a condições de ultrabaixa temperatura. Esse intervalo aponta para um episódio de resfriamento posterior aos eventos magmáticos mais jovens da região, ativos desde o Mioceno. As modelagens térmicas corroboram esses resultados, indicando resfriamento progressivo até o Pleistoceno, seguido por um período de estabilidade térmica. Em conjunto, os dados reforçam o potencial da MFT como uma ferramenta inovadora e robusta para investigações da evolução térmica recente da crosta continental.

**Palavras-chave:** Traços de Fissão em Monazita; Ultrabaixatemperatura; Borborema; Domínio Ceará Central; Termocronologia.

## ABSTRACT

### FISSION TRACK THERMOCHRONOLOGY IN MONAZITE APPLIED TO THE CEARÁ CENTRAL DOMAIN, BRAZIL

Fission Track Thermochronology (FT) constitutes one of the principal geochronological tools for reconstructing the low-temperature thermal history of rocks, being crucial for understanding geotectonic evolution and the surface dynamics of relief. Based on the counting of microscopic tracks produced by the spontaneous fission of  $^{238}\text{U}$ , this technique records geological events associated with low thermal regimes with high sensitivity. In this context, monazite emerges as a particularly promising thermochronometer for ultralow-temperature ranges (25–45 °C), with the capacity to record subtle processes such as shallow exhumation and recent erosion. Despite its widespread occurrence and high uranium content, the application of FT in monazite remained limited for decades by methodological constraints, mainly due to the dependence on equations requiring the use of nuclear reactors. In this work, Monazite Fission Track Thermochronology (MFT) was implemented in an exploratory manner within the TRACKs Group, based on an internal laboratory calibration equation combined with a chemical etching protocol described in the specialized literature. Analyses performed on international reference samples from Japan and Australia yielded ages consistent with previously published data, demonstrating the robustness and analytical feasibility of the adopted protocol. A chemical etching curve was constructed relating surface track density and confined track length to etching time. The revelation of tracks during chemical etching proved congruent with previously reported results, while small observed variations may be associated with the degree of accumulated radiogenic damage. These results highlight the superiority of the step-etch approach compared to the use of fixed chemical etching times. The application of MFT to Brazilian samples from the Central Ceará Domain resulted in ages ranging from  $2.10 \pm 0.25$  to  $12.15 \pm 1.40$  Ma, associated with ultralow-temperature conditions. This interval points to a cooling episode subsequent to the youngest magmatic events in the region, active since the Miocene. Thermal modeling corroborates these results, indicating progressive cooling until the Pleistocene, followed by a period of thermal stability. Taken together, the data reinforce the potential of MFT as an innovative and robust tool for investigations into the recent thermal evolution of the continental crust.

**Keywords:** Monazite Fission Tracks; Ultra-low temperature; Borborema; Ceará Central Domain; Thermochronology.

## ÍNDICE DE ASSUNTOS

|                                                                           |           |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| RESUMO .....                                                              | iii       |
| ABSTRACT .....                                                            | iv        |
| SUMÁRIO .....                                                             | v         |
| ÍNDICE DE TABELAS .....                                                   | vii       |
| ÍNDICE DE FIGURAS .....                                                   | viii      |
| SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....                                              | xi        |
| <br>                                                                      |           |
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>                                                 | <b>1</b>  |
| 1.1 Justificativa do Estudo.....                                          | 2         |
| 1.2 Objetivos.....                                                        | 6         |
| 1.2.1 Objetivo Geral .....                                                | 6         |
| 1.2.2 Objetivos Específicos .....                                         | 6         |
| <br>                                                                      |           |
| <b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                                      | <b>7</b>  |
| 2.1 Princípios da Termocronologia por Traços de Fissão (FT).....          | 7         |
| 2.1.1 Formação do traço de fissão .....                                   | 7         |
| 2.1.2 Decaimento e Annealing .....                                        | 9         |
| 2.1.3 Equações para o cálculo de Idade.....                               | 12        |
| 2.2 Histórico da FT em monazita .....                                     | 19        |
| 2.2.1 Estudos iniciais da metodologia .....                               | 22        |
| 2.2.2 Depois de Jones et al. (2019).....                                  | 26        |
| 2.3 Contexto geológico das amostras .....                                 | 40        |
| 2.3.1 Amostras internacionais .....                                       | 40        |
| 2.3.1.1 Monazitas do Japão .....                                          | 40        |
| 2.3.1.2 Monazitas da Austrália .....                                      | 44        |
| 2.3.2 Monazitas do Brasil.....                                            | 47        |
| <br>                                                                      |           |
| <b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>                                        | <b>53</b> |
| 3.1 Processamento e preparação das amostras .....                         | 54        |
| 3.2 Obtenção do conteúdo de U, datação via FT e modelagem dos dados ..... | 56        |



|          |                                                           |           |
|----------|-----------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>                            | <b>60</b> |
| 4.1      | Curva de ataque químico                                   | 60        |
| 4.2      | Idades MFT                                                | 66        |
| 4.2.1    | Amostras de Referência                                    | 67        |
| 4.2.2    | Domínio Ceará Central                                     | 70        |
| 4.2.3    | Histórias Térmicas                                        | 82        |
| 4.3      | Avaliação Composicional                                   | 87        |
| 4.4      | Desafios atuais e perspectivas futuras da MFT em monazita | 92        |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÕES</b>                                         | <b>95</b> |
| <b>6</b> | <b>DECLARAÇÃO DO USO DE IA</b>                            | <b>97</b> |
| <b>7</b> | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>                         | <b>98</b> |
|          | APÊNDICE A                                                | 104       |
|          | APÊNDICE B                                                | 105       |
|          | APÊNDICE C                                                | 114       |

## ÍNDICE DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                                                      |         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| <b>Tabela 1:</b> Trabalhos com FT em monazita desde 1970, com os respectivos locais de extração amostral e suas coordenadas geográficas.....                                                                         | 21      |
| <b>Tabela 2:</b> Amostras analisadas via FT em Monazita .....                                                                                                                                                        | 53      |
| <b>Tabela 3:</b> Idades MFT para as amostras internacionais.....                                                                                                                                                     | 67      |
| <b>Tabela 4:</b> Idades MFT para as amostras nacionais.....                                                                                                                                                          | 71      |
| <b>Tabela 5:</b> Eventos magmáticos da área de interesse.....                                                                                                                                                        | 77      |
| <br><b>Tabela A1:</b> Idades MFT obtidas em trabalhos realizados ao redor do mundo desde 1970.....                                                                                                                   | <br>104 |
| <br><b>Tabela B1:</b> Conteúdos químicos dos óxidos, expressos em porcentagem em peso (wt %), obtidos por microanálise por sonda eletrônica (EPMA) em amostras de monazita provenientes da Austrália e do Japão..... | <br>105 |
| <b>Tabela B2:</b> Conteúdos químicos dos óxidos, expressos em porcentagem em peso (wt %), obtidos por microanálise por sonda eletrônica (EPMA) em amostras de monazita provenientes do Brasil.....                   | 108     |
| <br><b>Tabela C1:</b> Idades individuais de traços de fissão em monazita (MFT), densidades superficiais de traços de fissão em monazita e conteúdo de U das amostras provenientes da Austrália e do Japão.....       | <br>114 |
| <b>Tabela C2:</b> Idades individuais de traços de fissão em monazita (MFT), densidades superficiais de traços de fissão em monazita e conteúdo de U das amostras provenientes do Brasil.....                         | 117     |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1:</b> Faixas potenciais para aplicação do TF para diferentes minerais e vidros em relação à faixa típica de seu conteúdo de U e densidade espontânea de traços de fissão (traços/cm <sup>2</sup> ) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 3  |
| <b>Figura 2:</b> Diagrama das temperaturas de fechamento dos minerais em métodos isotópicos usados para revelar histórias térmicas de rochas.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 5  |
| <b>Figura 3:</b> Processo de formação do traço latente, onde (a) ocorre a ionização dos átomos da rede cristalina devido à fissão nuclear e, (b) por repulsão Coulombiana, ocorre um afastamento desses átomos. (c) Relaxação da rede cristalina que resulta na formação do traço latente.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 7  |
| <b>Figura 4:</b> Artigos de FT reportados mundialmente desde 1970 e as coordenadas geográficas dos pontos de coleta das amostras.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 21 |
| <b>Figura 5:</b> (a) Resultados do ataque químico escalonado (step-etch) de 20 cristais de monazita do Granodiorito de Harcourt, com base na contagem de 15.178 semi-traços induzidos por <sup>252</sup> Cf, revelados em incrementos de 15 minutos até um total de 90 minutos de ataque com HCl 6 M a 90 °C. O diagrama mostra o aumento observado na densidade de traços com o tempo de ataque. Os traços tornam-se visíveis por volta dos 15 minutos, com rápida elevação da densidade até atingir um quase-platô aos ~60 minutos, após o qual há pouca variação, exceto pelo aumento contínuo no tamanho das cavidades de revelação (etch-pits). (b) Comprimentos dos semi-traços do experimento de annealing isotérmico a 90 °C em monazitas de Harcourt, realizados por períodos de 1 a 31 horas. Foram medidos 500 semi-traços em diversos grãos para cada etapa, com correção dos valores médios quanto à inclinação e ao índice de refração. O comprimento verdadeiro do semi-traço corresponde a aproximadamente metade do comprimento de um traço de fissão confinado equivalente (URE, 2010). A média do comprimento dos semi-traços de <sup>252</sup> Cf decresce de 4,96 μm na amostra controle (não submetida a annealing) para |    |

3,99  $\mu\text{m}$  após 31 horas de annealing (eixo esquerdo). O eixo direito mostra a redução percentual do comprimento dos semi-traços, normalizada em relação ao valor médio da amostra controle não tratada.....29

**Figura 6:** Localização e Geologia Simplificada da Província Borborema.....49

**Figura 7:** Micrografias ópticas obtidas sob ampliação de 150 $\times$  de grãos das amostras analisadas, utilizadas na determinação da densidade de traços de fissão pelo método semiempírico.....56

**Figura 8:**Curvas de ataque químico relacionando a densidade média de traços de fissão e o comprimento médio dos traços confinados em função do tempo de ataque para as amostras MNV-1 e MNV-2. Os pontos representados por triângulos indicam os tempos em que foram realizadas as medições das densidades superficiais e dos comprimentos dos traços nos grãos. Triângulos azuis correspondem à amostra MNV-1, enquanto os vermelhos referem-se à amostra MNV-2. Para cada ponto de ataque representado, foi obtida uma micrografia óptica, exibida nas subfiguras identificadas pelas letras a) até p) .....62

**Figura 9:** Análise comparativa das idades obtidas para cada amostra datadas via MFT.....68

**Figura 10:** Kernel densityestimates (KDE) e histogramas das amostras analisadas do Domínio Ceará Central. O inset mostra a distribuição de idade via RadialPlotter.....72

**Figura 11:**Contexto geológico maior da Província Borborema (NE-BR) com destaque para as principais ocorrências dos eventos magmáticos mesozóicos e cenozóicos. O símbolo de estrela indicam os pontos de coleta para datação MFT. Baseado em dados de Bizzi et al. (2000), Mizusaki et al. (2002), Cavalcante (2003), Dantas (2021), Pinéo (2020) e Santos et al. 2002). Idades e localização dos registros magmáticos compiladas de Souza et al. (2003), Cordani et al. (2004), Silveira (2006), Lopes et al. (2023),

Guimarães et al. (2020), Cavalcante (2006). As informações da superfície geoidal, limite do Platô da Boroborema e espessura crustal são de Oliveira (2008) e Oliveira & Medeiros (2012) .....75

**Figura 12:** Modelagem de história térmica via QTQt na amostra NCC05A. O *inset* mostra a distribuição dos comprimentos de traços confinados.....83

**Figura 13:** Modelagem de história térmica via QTQt na amostra NCC310. O *inset* mostra a distribuição dos comprimentos de traços confinados.....84

**Figura 14:** Modelagem de história térmica via QTQt na amostra NCC358A. O *inset* mostra a distribuição dos comprimentos de traços confinados.....85

**Figura 15:** Modelagem de história térmica via QTQt na amostra NCC126. O *inset* mostra a distribuição dos comprimentos de traços confinados.....86

**Figura 16:** Dispersão de idades MFT com as concentrações (wt%) de SiO<sub>2</sub>, UO<sub>2</sub>, ThO<sub>2</sub> e Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, apresentados para as amostras: a) japonesas, b) australianas e c) brasileiras.....88

## SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

**AFT:** Apatite Fission Track Thermochronology (Termocronologia por Traços de Fissão em Apatita)

**AHe:** Apatite Helium Dating (Método de datação Hélio em Apatita)

**ASTM:** American Standard for Testing of Materials

**DCC:** Domínio Ceará Central.

**EPMA:** Electron Probe Microanalysis (Microanálise por Sonda Eletrônica)

**ESR:** Electron Spin Resonance (Ressonância de Spin Eletrônico)

**FIB-SEM:** Focused Ion Beam-Scanning Electron Microscopy (Microscopia Eletrônica de Varredura com Feixe de Íons Focalizado)

**FT:** Fission Track Thermochronology (Termocronologia por Traços de Fissão)

**ISTL:** Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line (Linha Tectônica Itoigawa-Shizuoka)

**LA-ICP-MS:** Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (Espectrometria de Massas com Ablação a Laser)

**MCC:** Metamorphic Core Complex (Complexo de Núcleo Metamórfico)

**MFT:** Monazite Fission Track Thermochronology (Termocronologia por Traços de Fissão em Monazita)

**MTL:** Median Tectonic Line (Linha Tectônica Mediana)

**PAPA:** Projectile-Assisted Prompt Anneal

**REE:** Rare Earth Element (Elemento Terra Rara)

**WDS:** Wavelength Dispersive Spectroscopy (Espectroscopia de Dispersão de Comprimento de Onda)

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

**TAZ:** Annealing Zone (Zona de Annealing Total)

**ZCSP:** Zona de Cisalhamento Senador Pompeu

**ZFT:** Zircon Fission Track (Termocronologia por Traços de Fissão em Zircão)



## 1 INTRODUÇÃO

A Termocronologia por Traços de Fissão (FT) é uma metodologia geocronológica frequentemente aplicada no estudo da evolução térmica de minerais e rochas ao longo do tempo geológico. Baseia-se na análise de traços microscópicos, defeitos lineares gerados pela fissão espontânea do  $^{238}\text{U}$ , os quais se acumulam nos minerais e são gradualmente encurtados e posteriormente apagados ao serem expostos a um aumento da temperatura, processo denominado annealing (WAGNER; VAN DEN HAUTE, 1992).

Para que esses traços se tornem visíveis ao microscópio óptico, é necessário submetê-los a um ataque químico controlado, no qual o mineral é exposto à ação de um reagente em condições específicas de temperatura e tempo. Com base na densidade superficial desses traços ( $\rho$ ), é possível estimar a idade de resfriamento de minerais cristalinos, como apatita, zircão, epídoto, titanita, monazita, dentre outros, que em geral possuam concentrações em partes por milhão (ppm) de urânio (GREEN et al., 1986; CARLSON et al., 1999; DIAS et al., 2009, 2010).

A FT atua na reconstrução de histórias térmicas, ajudando a identificar eventos de aquecimento e resfriamento que tiveram impacto no desenvolvimento geológico de uma determinada região. Esse método é especialmente útil para analisar os aspectos térmicos e tectônicos de cadeias montanhosas em formação (cinturões orogênicos), áreas continentais estáveis antigas (áreas cratônicas), zonas com falhas e deslocamentos rochosos (falhas e cisalhamentos) e regiões com atividade geotérmica ativa. Além disso, essas informações podem ser fundamentais na identificação de depósitos minerais hidrotermais contendo ouro, urânio e elementos terras raras (GALLAGHER; BROWN; JOHNSON, 1998; REINERS; BRANDON, 2006).

As idades de resfriamento obtidas por essa técnica permitem a estimativa de taxas de exumação e erosão da crosta terrestre. Esses dados podem ser empregados na modelagem da denudação de cadeias montanhosas e regiões estáveis, como as observadas no Brasil. A FT, quando combinada com outros métodos termocronológicos, como (U–Th)/He e U–Pb, possibilita abordagens integradas (multimétodo) na análise da evolução geotectônica (CARTER; MOSS, 1998; DIAS et al., 2017; REINERS; BRANDON, 2006).



Em bacias sedimentares, os dados obtidos por FT são utilizados para avaliar a maturação térmica da matéria orgânica, possibilitando a elaboração de modelos de formação de hidrocarbonetos e a avaliação do potencial petrolífero de uma determinada região. Também é possível realizar uma análise de proveniência geológica, possibilitando-se a partir da obtenção de populações de idade específicas, identificar as fontes geológicas dos materiais erodidos que atuaram na formação da bacia (GALLAGHER; BROWN; JOHNSON, 1998).

Por fim, a FT tem papel central em estudos acadêmicos voltados à modelagem da evolução termomecânica da crosta e do manto superior, sendo frequentemente utilizada em pesquisas sobre tectônica ativa, processos de subsidência e episódios de soerguimento regional (GALLAGHER; BROWN; JOHNSON, 1998).

## **1.1 Justificativa do Estudo**

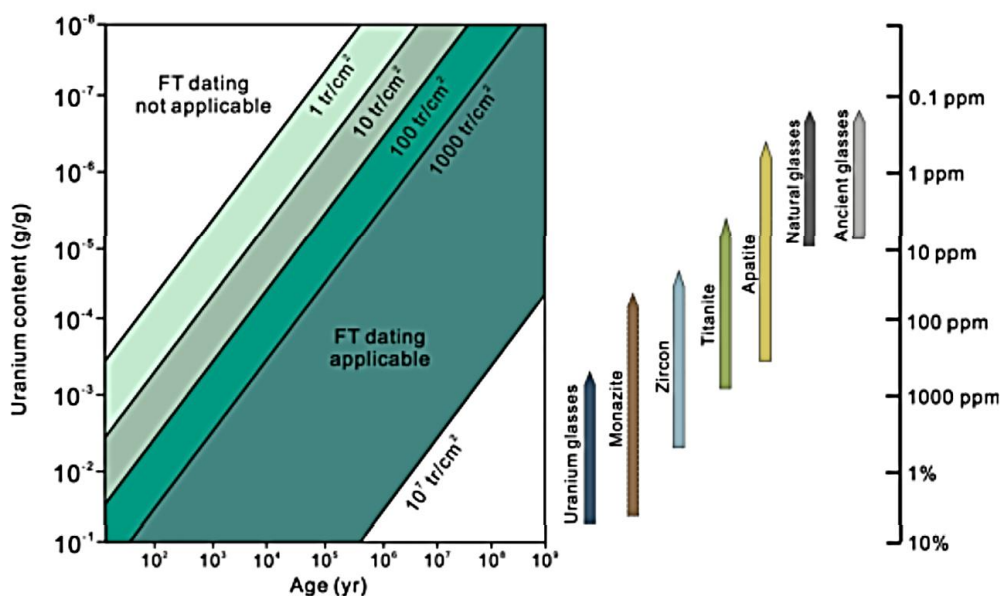
Apesar dos avanços significativos na aplicação da FT em minerais como apatita e zircão, o intervalo termal de atuação dessa técnica permanece restrito, de modo geral, à faixa de temperaturas compreendida entre aproximadamente 60 °C e 320 °C (KETCHAM et al., 2007; YAMADA et al., 1996). Essa limitação, quando considerada exclusivamente no contexto da FT, pode comprometer a resolução de padrões de resfriamento em temperaturas mais elevadas ou mais baixas, restringindo seu potencial em estudos geotermocronológicos mais abrangentes.

A FT baseia-se na análise de traços originados pela fissão espontânea do isótopo  $^{238}\text{U}$ . Dessa forma, minerais cristalinos com elevadas concentrações desse isótopo apresentam-se como candidatos para a aplicação da técnica. Um desses minerais é a monazita (Figura 1), um fosfato de elementos terras raras comumente enriquecido em U e Th. Presente como mineral acessório em rochas ígneas, metamórficas e sedimentares, a monazita já possui aplicação em outros métodos geocronológicos e termocronológicos, como o (U–Th)/He (temperaturas de fechamento tipicamente na faixa de ~200–280 °C; BOYCE et al., 2005; FARLEY; STOCKLI, 2002) e o U–Pb (com temperaturas de fechamento superiores a ~700 °C; PARRISH, 1990; SEYDOUX-GUILLAUME et al., 2002), configurando-se, portanto, como um mineral adequado para

abordagens geocronológicas multimétodo. No entanto, sua aplicação na FT permaneceu pouco explorada até recentemente.

Essa limitação esteve associada, em grande parte, a entraves metodológicos enfrentados até o início dos anos 2000, período em que a técnica dependia da irradiação do mineral com nêutrons térmicos em reatores nucleares. Nessa abordagem, o teor de  $^{238}\text{U}$  era estimado indiretamente a partir da formação de traços provenientes da fissão induzida do  $^{235}\text{U}$ , cujos fragmentos eram registrados em detectores externos, como lâminas de mica (procedimento que será detalhado na Seção 2.1 deste trabalho).

**Figura 1:** Faixas potenciais para aplicação da FT para diferentes minerais e vidros em relação à faixa típica de seu conteúdo de U e densidade espontânea de traços de fissão (traços/cm<sup>2</sup>)



Fonte: Kohn et al. (2024).

Entretanto, a presença significativa de gadolínio (Gd) na monazita, com teores médios da ordem de 2% em peso, representava um obstáculo crítico à aplicação desse método. Devido à sua elevada seção de choque para nêutrons térmicos, especialmente do isótopo  $^{157}\text{Gd}$ , que apresenta valores da ordem de  $\sim 2,5 \times 10^5$  barns, significativamente superiores aos do  $^{235}\text{U}$  ( $\sim 580$  barns), o Gd absorve uma parcela substancial desses nêutrons durante a irradiação. Segundo Jones et al. (2021), essa absorção pode resultar na deposição localizada de energia no mineral, potencialmente promovendo o apagamento dos traços de fissão e, em casos extremos, levando à

degradação estrutural dos grãos, o que comprometeria a viabilidade da análise termocronológica.

Nesse contexto, cabe ressaltar que a energia liberada pela captura de nêutrons térmicos pelo Gd, principalmente pelos isótopos  $^{155}\text{Gd}$  e  $^{157}\text{Gd}$ , é da ordem de 7–8 MeV. Embora essa energia seja elevada em termos nucleares, sua dissipação ocorre de forma extremamente rápida, o que inviabiliza o seu acúmulo no mineral em escala suficiente para promover aquecimento macroscópico ou derretimento sustentado, em função dos eficientes processos de difusão térmica e perda de energia. Assim, a principal limitação metodológica associada ao Gd não está relacionada diretamente a efeitos térmicos globais, mas sobretudo à dificuldade em estimar corretamente a fluência de nêutrons térmicos durante a irradiação, o que introduz incertezas significativas na determinação da idade.

Com o desenvolvimento de metodologias que dispensam a utilização de reatores nucleares e de nêutrons térmicos, como a espectrometria de massas com ablação a laser (LA-ICP-MS) e a microanálise por sonda eletrônica (EPMA), novas perspectivas passaram a ser exploradas quanto à aplicação da Termocronologia por Traços de Fissão em monazita (MFT). Durante a Goldschmidt Conference, Gleadow et al. (2005) destacaram o potencial da MFT como um termocronômetro de ultrabaixa temperatura.

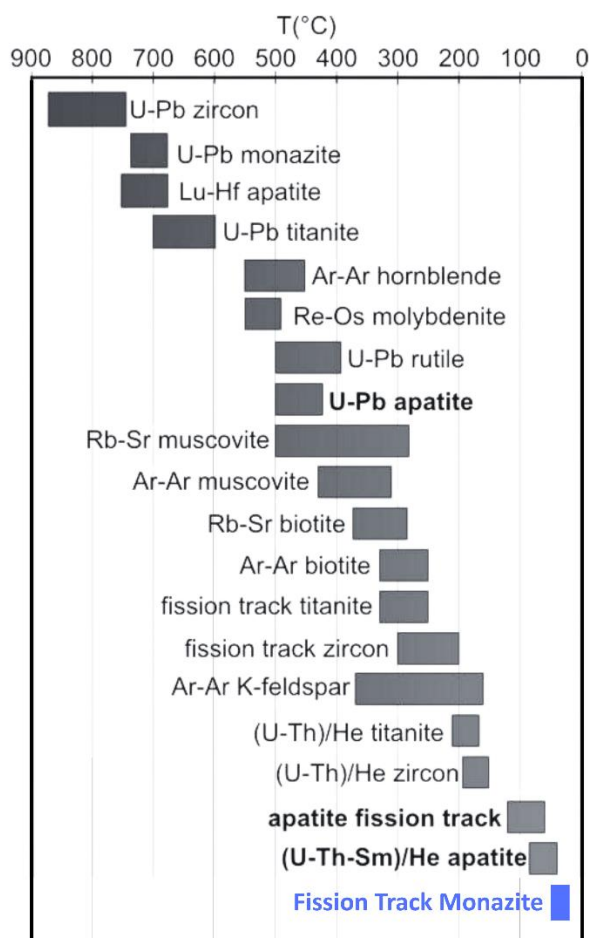
Desde então, apenas cerca de dez estudos foram publicados abordando essa técnica, contribuindo principalmente para o aprimoramento dos protocolos de ataque químico e para o entendimento da sensibilidade térmica da monazita. Nos últimos seis anos, o Dr. Sean Jones, vinculado ao *Melbourne Thermochronology Research Group, da School of Earth Sciences da University of Melbourne*, tem liderado avanços significativos nessa linha de pesquisa. Em conjunto com seu grupo, publicou diversos trabalhos que evidenciam o potencial da monazita na reconstrução de histórias térmicas de baixa temperatura em amostras geológicas.

Esses estudos indicam que a MFT apresenta uma temperatura de fechamento estimada entre aproximadamente 25 °C e 45 °C, classificando a monazita como um termocronômetro de ultrabaixa temperatura (Figura 2). Dessa forma, conforme proposto por Fayon (2008), sua aplicação pode complementar técnicas termocronológicas já consolidadas, fornecendo informações temporais adicionais sobre a evolução dinâmica de sistemas geológicos, com especial relevância para a investigação de processos de

exumação em terrenos geologicamente jovens e de processos erosivos associados à ação climática (JEPSON et al., 2025).

Diante do número ainda reduzido de estudos publicados, a Termocronologia por Traços de Fissão em monazita configura-se atualmente como uma área de fronteira dentro da Termocronologia. Essa constatação evidencia a relevância do presente trabalho para o avanço do conhecimento nesse campo específico. Observa-se que, embora existam contribuições significativas voltadas ao desenvolvimento metodológico da técnica, ainda são escassas as aplicações em contextos geológicos naturais, reforçando a necessidade de novos estudos que ampliem o uso da MFT em diferentes ambientes geológicos e contribuam para superar as limitações atuais na interpretação dos dados obtidos por essa abordagem.

**Figura 2:** Diagrama das temperaturas de fechamento dos minerais em métodos isotópicos usados para revelar histórias térmicas de rochas.



Fonte: Adaptado de Doepke (2017).

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral a implementação MFT no Grupo Tracks, coordenado pelo Prof. Dr. Airton Natanael Coelho Dias. Para isso, busca-se validar a aplicação da metodologia a partir da adaptação de um protocolo próprio e da utilização da equação de idade para FT sem uso de reator, conforme proposto por Donelick et al. (2005) e Dias et al. (2017).

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos destacam-se:

- Comparar os resultados obtidos por meio da metodologia desenvolvida no Grupo Tracks com aqueles publicados por Jones et al. (2023), a partir da análise de amostras com idades MFT conhecidas, fornecidas ao laboratório em colaboração com o Dr. Sean Jones e sua equipe de pesquisa. Pretende-se verificar a reprodutibilidade dos dados, considerando que Jones et al. (2023) utilizou a equação de idade proposta por Hasebe et al. (2004), enquanto o presente estudo adotará a equação desenvolvida por Donelick et al. (2005) e Dias et al. (2017).
- Realizar a datação de amostras com idades MFT ainda não conhecidas, provenientes do Domínio Ceará Central, localizado no nordeste brasileiro, cujas idades U–Pb já foram determinadas por Castro (2005). Essa abordagem permitirá a interpretação geológica por meio de uma análise geocronológica multimétodo.
- Testar a reprodutibilidade do método de ataque químico proposto por Jones et al. (2019), por meio da elaboração de uma curva de ataque, isto é, um gráfico que indicará a relação entre o tempo de ataque e a densidade dos traços de fissão em amostras nacionais de idade desconhecida.

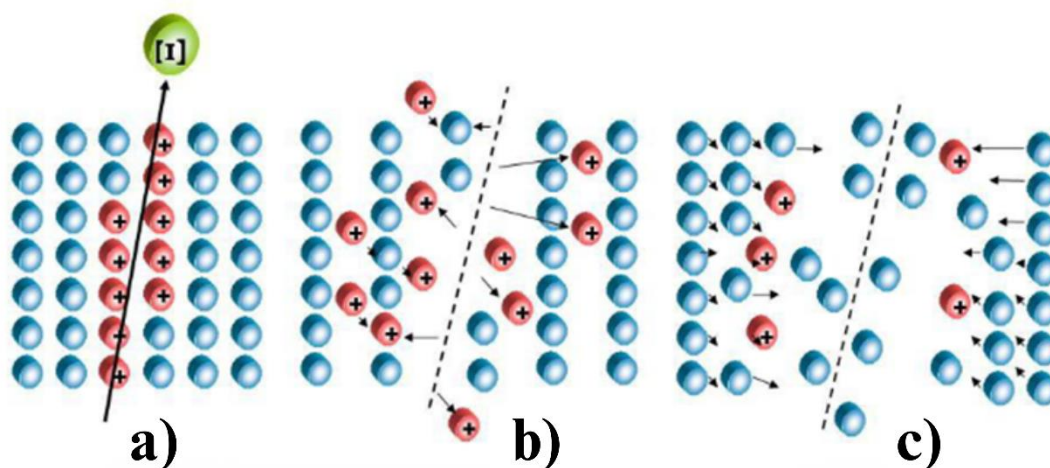
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Princípios da Termocronologia por Traços de Fissão (FT)

#### 2.1.1 Formação do traço de fissão

Um dos modelos mais tradicionais para explicar a formação dos traços de fissão é conhecido como “Ion Explosion Spike”. Nesse modelo, o traço se origina a partir da ionização intensa da rede cristalina ao longo do caminho percorrido pelos fragmentos resultantes da fissão espontânea do  $^{238}\text{U}$ . Essa ionização provoca uma repulsão coulombiana transiente entre os íons positivamente carregados, levando ao afastamento dos átomos e ao colapso local da estrutura cristalina, o que resulta na formação de um defeito linear na rede (Fleischer et al., 1965). A Figura 3 ilustra o processo de formação do traço segundo esse modelo.

**Figura 3:** processo de formação do traço latente, onde (a) ocorre a ionização dos átomos da rede cristalina devido à fissão nuclear e, (b) por repulsão Coulombiana, ocorre um afastamento desses átomos. (c) Relaxação da rede cristalina que resulta na formação do traço latente



Fonte: Dias (2012).

Após a perturbação inicial e o subsequente relaxamento estrutural ultrarrápido, ocorre a estabilização do defeito, dando origem ao chamado traço latente. O comprimento médio desses traços varia conforme o mineral hospedeiro. Na apatita, os traços apresentam comprimentos da ordem de 16  $\mu\text{m}$ , enquanto no zircão esse valor é de

aproximadamente 11  $\mu\text{m}$ . Para a monazita, embora os dados disponíveis ainda sejam escassos, os estudos existentes sugerem comprimentos médios entre 10 e 11  $\mu\text{m}$  (Weise et al., 2009; Jones et al., 2021), ressaltando a necessidade de investigações adicionais para consolidar esses valores.

Após sua formação, o traço latente apresenta uma zona radial caracterizada por dano estrutural incompleto, na qual unidades estruturais e coordenações químicas locais permanecem parcialmente preservadas, embora fortemente distorcidas. Essas regiões, termodinamicamente metastáveis, são posteriormente removidas durante o ataque químico, resultando no alargamento do traço revelado.

A principal alternativa ao modelo “Ion Explosion Spike” é o modelo conhecido como “Thermal Spike”, o qual considera a transferência de energia como um processo térmico. Nesse contexto, os traços latentes se formam a partir do resfriamento de uma região localmente fundida, gerada pela fissão espontânea do  $^{238}\text{U}$  (MOREIRA et al., 2013; KETCHAM, 2019). Esse modelo tem se mostrado particularmente eficiente para a previsão de parâmetros específicos, como o raio do traço (distância percorrida pelos fragmentos de fissão), além de fornecer suporte à interpretação de imagens obtidas por microscopia eletrônica de transmissão (TEM) em minerais como o zircão (LI et al., 2014).

Contudo, os modelos “Ion Explosion Spike” e “Thermal Spike” não são excludentes. Em Chadderton (2003) foi proposta uma abordagem combinada, denominada “CompoundSpike”, que integra os dois mecanismos para descrever de forma mais realista a formação dos traços de fissão em sólidos. Nesse modelo, o autor introduz o conceito de Projectile-Assisted Prompt Anneal (PAPA), segundo o qual a formação do traço pode ser inibida devido à ocorrência de uma recristalização epitaxial extremamente rápida, imediatamente após a deposição da energia. Esse fenômeno é observado, sobretudo, em materiais como silício e grafite.

O estudo também enfatiza que a resposta do material à radiação depende significativamente da presença de defeitos pontuais específicos, bem como da estrutura eletrônica da rede cristalina. A formação ou supressão dos traços está frequentemente associada a transições de fase locais e de curta duração, as quais dependem tanto da densidade de energia depositada quanto da cinética do processo.

Por fim, o autor argumenta que modelos clássicos, como a regra de aditividade de Bragg e o modelo térmico puro, são insuficientes para descrever adequadamente o fenômeno, pois desconsideram aspectos atomísticos fundamentais, tais como a estrutura de bandas eletrônicas, a natureza anisotrópica da rede cristalina e os mecanismos de relaxação e annealing altamente direcionais.

### 2.1.2 Decaimento e Annealing

Como discutido anteriormente, minerais com elevadas concentrações de  $^{238}\text{U}$  apresentam maior potencial para a geração e preservação de traços de fissão decorrentes da fissão espontânea desse isótopo. No entanto, além da fissão espontânea, o  $^{238}\text{U}$  também sofre decaimento por emissão alfa, integrando a série radioativa do urânio ( $^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$ ), na qual sucessivas transformações nucleares resultam na formação de  $^{206}\text{Pb}$  estável, constituindo uma das bases fundamentais da datação pelo método U–Pb (WAGNER; VAN DEN HAUTE, 1992). De forma análoga, o  $^{235}\text{U}$  e o  $^{232}\text{Th}$  também participam de séries radioativas naturais independentes, culminando na formação de  $^{207}\text{Pb}$  e  $^{208}\text{Pb}$ , respectivamente. Nesse contexto, a presença de U, Th e Pb em minerais como a monazita reflete não apenas a incorporação desses elementos durante a cristalização, mas também a evolução temporal associada aos processos de decaimento radioativo.

A desintegração radioativa provoca danos por radiação que podem causar a destruição parcial ou total da estrutura cristalina do mineral, fenômeno conhecido como metamictização. Esse processo é resultado da energia liberada durante o decaimento, do recuo do núcleo-pai e dos deslocamentos atômicos induzidos, os quais podem levar à amorfização da rede cristalina. Considerando que o decaimento alfa é aproximadamente  $10^6$  vezes mais provável do que a fissão espontânea do  $^{238}\text{U}$ , conclui-se que a metamictização decorre principalmente da emissão alfa, e não da fissão espontânea.

É comum observar, na natureza, zircões em estado metamórfico, em decorrência da intensa atividade radioativa interna. A monazita, por outro lado, não apresenta esse estado de forma significativa, o que é surpreendente, considerando que este mineral pode conter concentrações de urânio tão elevadas quanto as encontradas em zircão. Casos de monazita metamórfica são extremamente raros e, conforme demonstrado por Seydoux-Guillaume et al. (2002; 2004), mesmo quando submetida a altas doses de



radiação, os danos estruturais tendem a permanecer limitados a domínios isolados na escala de nanômetros dentro do cristal.

Segundo Montel (2011), é possível supor que, de forma semelhante ao observado na apatita, algum tipo de processo eficiente de "autocura" atue ao longo do tempo na monazita, o que explicaria a ausência de metamictização significativa mesmo sob a exposição a altas doses de radiação. Sabe-se por estudos mais recentes que esse mecanismo, na verdade, corresponde a um processo de annealing sensível a baixas temperaturas, com comportamento térmico comparável ao da apatita.

O annealing é um dos principais fenômenos da Termocronologia por Traços de Fissão (FT), caracterizando-se pelo encurtamento e apagamento progressivo dos traços de fissão devido ao aquecimento do mineral. A distribuição dos comprimentos desses traços permite reconstruir a evolução térmica das amostras com base em modelos estabelecidos (GUEDES et al., 2005; YAMADA et al., 2007; GUEDES et al., 2013).

Durante o annealing, a redução na densidade e comprimento dos traços resulta em idades aparentes inferiores à real idade de formação do mineral. Essas idades podem ser corrigidas com base na intensidade do annealing, expressa pela razão normalizada entre densidade ( $\rho/\rho_0$ ) ou comprimento ( $l/l_0$ ) dos traços, em função do tempo e da temperatura (WAGNER; VAN DEN HAUTE, 1992).

Os principais fatores candidatos a afetar a estabilidade dos traços latentes são o tempo e a temperatura (WENDT et al., 2002), sendo a temperatura, em larga escala, o mais influente (FLEISCHER et al., 1965; SCHMIDT et al., 2014). A ativação térmica promove o rearranjo da estrutura cristalina e o encurtamento dos traços.

Com o aumento da temperatura e da duração do annealing, os traços tornam-se progressivamente mais curtos e menos detectáveis, resultando em uma redução da densidade observável, podendo ser completamente apagados na chamada zona de annealing total (TAZ). A análise dos comprimentos dos traços, geralmente apresentada em histogramas com valores médios e desvios padrão, é essencial para reconstruir histórias térmicas regionais.

Cada mineral responde de forma distinta ao annealing. A apatita, por exemplo, apresenta annealing parcial entre 60 e 120 °C, faixa coincidente com a zona de maturação de hidrocarbonetos. Isso torna a FT uma ferramenta valiosa na exploração de petróleo e no estudo de eventos tectônicos, fato que favoreceu o significativo

desenvolvimento da FT em apatita nas últimas décadas (HADLER et al., 1995; HACKSPACHER et al., 2004; TELLO et al., 2005).

No caso do zircão, o annealing parcial dos traços de fissão ocorre aproximadamente no intervalo entre 180 e 320 °C (TAGAMI; SHIMADA, 1996; YAMADA et al., 1996; BERNET, 2009). Todavia, em função de sua estrutura cristalina mais rígida e dos mecanismos cinéticos de annealing mais complexos e resistentes quando comparados aos da apatita, a determinação de parâmetros relacionados ao encurtamento dos traços no zircão apresenta maiores desafios experimentais e interpretativos. Em decorrência disso, estudos de história térmica em contextos geológicos regionais são mais frequentemente conduzidos com base em dados de apatita, cuja resposta ao annealing térmico ocorre em intervalos de temperatura mais baixos e com comportamento cinético mais bem caracterizado.

Os poucos estudos existentes sobre o tema indicam que o annealing parcial da monazita ocorre em uma faixa de temperatura relativamente baixa, entre aproximadamente 25 e 45 °C (WEISE et al., 2009; JONES et al., 2021). A determinação dessa faixa térmica tem implicações geológicas relevantes, possibilitando a identificação de eventos térmicos de baixa intensidade, incluindo processos tectônicos recentes, além da estimativa de taxas de denudação e erosão associadas a eventos geológicos jovens (< 10 Ma). Ademais, essa sensibilidade térmica pode permitir a datação de processos erosivos sutis, relacionados à dinâmica de formação de relevo e a variações climáticas (JONES et al., 2023; JEPSON et al., 2025).

A diferença nas faixas de temperatura em que a FT fornece informações para cada mineral torna-os complementares, permitindo, quando utilizados de forma integrada, uma análise mais abrangente da evolução geológica em condições de baixa temperatura.

Sabe-se que tanto os danos na rede cristalina resultantes da fissão espontânea de U quanto aqueles gerados pelo decaimento alfa sofrem a ação do annealing. No entanto, ainda não está claro se esse processo ocorre da mesma forma ou na mesma faixa de temperatura para ambos os casos. Essa é uma questão de grande relevância para a Termocronologia, especialmente no contexto da datação por (U–Th)/He, embora os dados disponíveis sejam escassos e apresentem resultados inconsistentes (KETCHAM, 2019).

Adicionalmente, a influência direta da radiação no annealing ainda não está completamente compreendida. Estudos como os de Shipley e Fayon (2006), Jones et al. (2023) e Seydoux-Guillaume et al. (2018) sugerem a ocorrência de um annealing assistido pela radiação, particularmente relacionado ao decaimento alfa de U e Th na monazita. Já Li et al. (2021) observaram que, em Apatitas e Zircões submetidos a altas doses de decaimento alfa, o encurtamento dos traços pode ocorrer em temperaturas ambiente por meio do recuo alfa, sendo esse um processo não termal, distinto do annealing assistido por radiação alfa, o que reforça a complexidade envolvida na compreensão dos mecanismos de apagamento dos traços.

### 2.1.3 Equações para o cálculo de Idade

A FT fundamenta-se nos mesmos princípios das técnicas geocronológicas baseadas no decaimento radioativo, nas quais átomos-pai instáveis se transformam em produtos-filho estáveis ao longo do tempo geológico. Sua base teórica repousa na equação diferencial do decaimento radioativo, cuja integração descreve a acumulação progressiva de traços fósseis produzidos pela fissão espontânea do  $^{238}\text{U}$ . A aplicação dessa equação requer a determinação da concentração de U na amostra e a quantificação dos produtos da fissão, expressos como densidade de traços por unidade de volume, parâmetros que são acessados indiretamente por meio da contagem microscópica de traços de fissão revelados quimicamente (DIAS, 2012).

Historicamente, um dos principais desafios da aplicação da FT consistiu na estimativa do conteúdo de U na amostra. Na metodologia clássica, essa estimativa é realizada de forma indireta por meio da irradiação em reator nuclear, durante a qual o  $^{235}\text{U}$  sofre fissão induzida ao capturar nêutrons térmicos. Os fragmentos gerados por essa reação produzem traços registrados em detectores externos, geralmente lâminas de mica posicionadas em contato com a superfície polida da amostra. A densidade desses traços induzidos é proporcional à quantidade de  $^{235}\text{U}$  presente. Considerando-se que a razão isotópica natural entre  $^{238}\text{U}$  e  $^{235}\text{U}$  ( $\sim 137,88$ ) é bem conhecida e praticamente constante, torna-se possível inferir a concentração de  $^{238}\text{U}$  e calcular a idade geológica com base na razão entre os traços espontâneos e induzidos (WAGNER; VAN DEN HAUTE, 1992).

Para a determinação da idade, dois procedimentos de calibração são amplamente empregados: a calibração zeta, baseada em padrões externos de idade conhecida, e a calibração absoluta, fundamentada exclusivamente em parâmetros físicos e nucleares. A calibração absoluta dispensa o uso de amostras-padrão, uma vez que permite o cálculo direto da idade a partir da fluência de nêutrons e das seções de choque das reações de fissão. Segundo Gleadow (1981), essa abordagem constitui uma alternativa independente e autossuficiente, sendo particularmente útil em estudos que demandam maior comparabilidade entre diferentes laboratórios ou métodos analíticos.

Assim como na calibração zeta, a calibração absoluta também requer o uso de dosímetros, geralmente vidros dopados com concentrações conhecidas de U e Th, posicionados junto às amostras durante a irradiação. Esses dosímetros são acoplados a detectores externos, como lâminas de mica, que registram os traços de fissão induzida. A densidade desses traços, determinada por microscopia óptica, permite calcular a fluência de nêutrons no reator e, conseqüentemente, aplicar diretamente a equação de idade. Diferentemente da calibração zeta, no entanto, a abordagem absoluta não depende da utilização de padrões de idade para calibração, baseando-se diretamente na determinação da fluência de nêutrons. Conforme discutido por Wagner e Van den Haute (1992), essa estratégia reduz as incertezas associadas à dependência de padrões externos e contribui para tornar o método mais robusto e replicável.

A Equação 1 expressa o cálculo da idade a partir da abordagem de calibração absoluta na Termocronologia por Traços de Fissão (FT), conforme apresentado por Wagner e Van den Haute (1992, p. 62).

$$t = \frac{1}{\lambda_a} \cdot \ln \left( 1 + \left( \frac{\rho_s}{\rho_i} \right) \left( \frac{\lambda_a}{\lambda_f} \right) \cdot QGl\sigma\phi \right) \quad (1)$$

Nessa equação,  $t$  representa a idade da amostra, expressa em anos;  $\lambda_f$  é a constante de decaimento por fissão espontânea do  $^{238}\text{U}$ , com valor típico de  $8,46 \times 10^{-17} \text{ a}^{-1}$  (SPADAVECCHIA; HAHN, 1967),  $\lambda_a$  é a constante de decaimento total que é aproximadamente a constante de decaimento por emissão alfa do  $^{238}\text{U}$ , com valor aproximado de  $1,55 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$ ;  $\rho_s$  corresponde à densidade de traços espontâneos, ou seja, o número de traços por unidade de área;  $\rho_i$  é a densidade de traços induzidos,

gerados por irradiação com nêutrons térmicos;  $\sigma$  é a seção de choque para fissão induzida do  $^{235}\text{U}$ , com valor de 582 barns (sendo 1 barn =  $10^{-24} \text{ cm}^2$ );  $\phi$  representa o fluxo de nêutrons durante a irradiação (em nêutrons por centímetro quadrado);  $G$  é o fator geométrico, relacionado à orientação das superfícies analisadas, geralmente assumido como 1;  $Q$  é o fator de eficiência de revelação e observação dos traços, normalmente considerado igual a 1 sob condições ideais; e  $l$  é a razão isotópica entre  $^{235}\text{U}$  e  $^{238}\text{U}$ , com valor típico de  $7,25 \times 10^{-3}$ .

A calibração zeta, por sua vez, é um método empírico desenvolvido a fim de superar as dificuldades na medição de certos parâmetros nucleares, como  $\phi$ . Nesse procedimento, utiliza-se uma constante de calibração experimental, denominada  $\zeta$  (zeta), obtida a partir da análise de uma amostra padrão cuja idade é conhecida por outros métodos radiométricos (como Ar/Ar, Rb/Sr, U-Pb ou K-Ar). A constante zeta incorpora os parâmetros físicos e geométricos do sistema (incluindo eficiência do detector, geometria e taxa de revelação dos traços), permitindo a determinação da idade de amostras desconhecidas por meio da razão entre a densidade de traços espontâneos e a densidade de traços induzidos ( $\rho_s/\rho_i$ ), de forma prática e reprodutível, sem a necessidade de conhecer individualmente os parâmetros nucleares envolvidos (HURFORD; GREEN, 1982).

De acordo com Wagner e Van den Haute (1992, p. 72), duas equações conjuntas podem ser utilizadas para o cálculo da idade de amostras desconhecidas com base na calibração zeta:

$$\zeta = \frac{e^{\lambda_a t_s} - 1}{\lambda_a \left( \frac{\rho_s}{\rho_i} \right)_s G \cdot \rho_m} = \frac{QlB\sigma}{\lambda_f} \quad (2)$$

$$t_u = \frac{1}{\lambda_a} \cdot \ln \left( 1 + \left( \frac{\rho_s}{\rho_i} \right)_u \cdot \lambda_a \rho_m G \zeta \right) \quad (3)$$

Na equação (2), o parâmetro  $\zeta$  representa o fator de calibração zeta, expresso em anos por centímetro quadrado. O termo  $t_s$  corresponde à idade conhecida de uma amostra padrão irradiada simultaneamente com o monitor de vidro. A razão  $\left( \frac{\rho_s}{\rho_i} \right)_s$  refere-se à razão entre as densidades de traços espontâneos e induzidos observadas na amostra padrão. O parâmetro  $B$  designa uma constante de proporcionalidade associada à

fluência de nêutrons, definida pela relação  $\phi = B\rho_m$ , em que  $\rho_m$  é a densidade de traços de fissão registrados no monitor de mica ou vidro.

Na equação (3),  $t_u$  representa a idade da amostra a ser determinada, enquanto a razão  $\left(\frac{\rho_s}{\rho_i}\right)_u$  corresponde à razão entre as densidades de traços espontâneos e induzidos obtidas na própria amostra em análise. Os demais parâmetros mantêm os significados previamente apresentados. Vale destacar que  $\zeta$  corresponde a um valor médio determinado a partir de múltiplas irradiações.

O advento de tecnologias analíticas como a espectrometria de massas com ablação a laser (LA-ICP-MS) e a microanálise por sonda eletrônica (EPMA) proporcionou alternativas ao método convencional de irradiação com nêutrons para a determinação da concentração de U em minerais. Nesse contexto, Hasebe et al. (2004) desenvolveram uma metodologia de datação por traços de fissão aplicável a apatitas de idade desconhecida, utilizando o LA-ICP-MS para quantificar diretamente o teor de urânio. Para viabilizar essa abordagem, os autores introduziram um fator de calibração denominado  $\varepsilon$  (épsilon), funcionalmente análogo ao fator zeta utilizado na calibração empírica tradicional. O objetivo desse parâmetro é agrupar os efeitos de variáveis experimentais que influenciam a revelação, registro e contagem dos traços de fissão, permitindo a aplicação da equação de idade mesmo na ausência de irradiação e de traços induzidos.

As equações (4) e (5), apresentadas a seguir, correspondem às resoluções matemáticas propostas por Hasebe et al. (2004) para a formulação da equação de idade aplicável à datação por traços de fissão com uso de LA-ICP-MS:

$$\varepsilon = \frac{M\lambda_a\rho_s}{\lambda_f[^{238}\text{U}]N_A10^{-6}dKR_{sp}} \quad (4)$$

$$t = \frac{1}{\lambda_a} \cdot \ln\left(1 + \left(\frac{\rho_s}{[^{238}\text{U}]}\right) \cdot \varepsilon\right) \quad (5)$$

Dentre os novos termos introduzidos nas equações (4) e (5) propostas por Hasebe et al. (2004), destaca-se o fator  $\varepsilon$ , que representa uma constante de calibração experimental ajustada a partir de amostras de idade conhecida. A massa molar do  $^{238}\text{U}$ , indicada por  $M$ , é expressa em gramas por mol (g/mol), enquanto  $N_A$  refere-se ao número de

Avogadro, cujo valor é  $6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ . A concentração de urânio-238 na amostra é representada diretamente como  $[^{238}\text{U}]$ , com unidades em microgramas por grama ( $\mu\text{g/g}$ ). O termo  $d$  corresponde à densidade do mineral analisado. O parâmetro  $R_{sp}$  designa o fator de registro dos traços de fissão espontâneos, usualmente definido como a metade do comprimento médio dos traços observados após o ataque químico. A constante  $K$  representa um fator experimental que incorpora os efeitos das condições de revelação, observação e contagem dos traços, sendo normalmente assumido como igual a 1, conforme adotado pelos autores.

Com o objetivo de ajustar o fator de calibração e validar a aplicabilidade da equação de idade desenvolvida no estudo, Hasebe et al. (2004) utilizaram três amostras padrão de idade bem estabelecida: Durango, Fish Canyon Tuff e Mount Dromedary Complex. As idades dos grãos de apatita foram determinadas individualmente por meio de dois procedimentos: o método convencional e LA-ICP-MS. Os resultados obtidos demonstraram boa concordância entre os dois métodos, permitindo concluir que o uso do LA-ICP-MS é tecnicamente viável para a aplicação da FT em apatita. Trabalhos posteriores não apenas aprimoraram a metodologia, como também confirmaram sua aplicabilidade em outros minerais, a exemplo do zircão e da monazita (MANSOUR et al, 2021; JONES et al. 2023; JEPSON et al. 2025).

Dando continuidade à abordagem proposta por Hasebe et al. (2004), a formulação da equação de idade apresentada por Donelick et al. (2005) representa um refinamento metodológico voltado à consolidação do uso do fator zeta em conjunto com dados obtidos por LA-ICP-MS. Nesse contexto, o trabalho de Donelick et al. (2005) avança ao adotar de forma sistemática a calibração zeta como elemento central da equação, evitando a necessidade de parâmetros físicos de difícil determinação associados à calibração absoluta.

Um dos avanços mais relevantes está no tratamento das heterogeneidades intra-grão, especialmente o zoneamento de urânio. A partir da realização de análises pontuais associadas a ajustes matemáticos, torna-se possível estimar de forma mais representativa a concentração efetiva de urânio na região superficial responsável pela geração dos traços observados, reduzindo incertezas associadas à variabilidade composicional.

Adicionalmente, observa-se um aprimoramento na aplicação do fator zeta, que passa a ser determinado e ajustado de maneira mais consistente entre diferentes sessões analíticas, contribuindo para maior reprodutibilidade dos resultados. Esse procedimento também permite melhor controle das incertezas associadas tanto à quantificação de urânio quanto à contagem de traços de fissão.

Por fim, conforme destacado por Donelick et al. (2005), o método apresenta ganhos operacionais relevantes, como a eliminação da etapa de irradiação em reator nuclear e a possibilidade de obtenção simultânea de dados de idade e composição no mesmo ponto analítico. Dessa forma, o trabalho não apenas complementa a proposta anterior, mas a expande, ao aprimorar os aspectos analíticos e reduzir limitações práticas associadas à aplicação da equação de idade baseada em LA-ICP-MS.

Desde o trabalho de Donelick et al. (2005), diversos avanços metodológicos foram alcançados na datação emFT. Entre eles, destaca-se o estudo de Soares et al. (2014), que propôs uma calibração da equação de idade com base em medições por LA-ICP-MS, reduzindo significativamente a dependência de padrões de idade. Os autores incorporaram ao cálculo da idade parâmetros como o comprimento médio dos traços confinados horizontais, um fator geométrico e um fator de eficiência combinado (ataque químico e observação), estimado por meio da comparação entre distribuições teóricas e experimentais do comprimento projetado dos traços. Também introduziram um método de calibração específico, análogo ao fator  $\epsilon$  proposto por Hasebe et al. (2004). A consistência da abordagem foi validada por meio da comparação dos resultados obtidos com amostras padrão de idade conhecida, como Durango, Fish Canyon Tuff e Limberg, demonstrando a robustez, a confiabilidade e a ampla aplicabilidade do método em diferentes contextos geocronológicos.

Por sua vez, Gombosi et al. (2014) propuseram uma abordagem alternativa baseada na análise EPMA, com o desenvolvimento do método denominado Electron ProbeFission Track (EP-FT). Nessa metodologia, a concentração de urânio é determinada por espectroscopia de dispersão de comprimento de onda (WDS), dispensando a necessidade de irradiação. O método introduz um novo fator de calibração, denominado Z, calculado a partir da análise de padrões com idades previamente conhecidas. Entre as principais vantagens do EP-FT, destacam-se a redução de custos e do tempo de análise, a maior confiabilidade na quantificação do teor



de urânio em minerais com forte zonação, como zircão e monazita, e a preservação da integridade da amostra, que frequentemente é destruída durante análises por LA-ICP-MS. Como limitação, o EPMA apresenta limites de detecção mais elevados e menor sensibilidade para elementos-traço em comparação ao LA-ICP-MS, o que pode resultar em maiores incertezas na quantificação de U em baixas concentrações.

Tendo como base esses trabalhos Dias et al. (2017) introduziram uma abordagem utilizando EPMA para a determinação do conteúdo de U em zircões. Nesta metodologia foi desenvolvida a seguinte equação geral:

$$t = \frac{1}{\lambda_a} \cdot \ln \left( 1 + \frac{\lambda_a}{\lambda_f} \cdot \frac{\rho_s}{K(ppm) C_{238}} \right) \quad (6)$$

Boa parte dos termos da equação é previamente conhecida, com o acréscimo da constante  $C_{238}$ , que representa a abundância isotópica do  $^{238}\text{U}$ (0,99275), e da concentração de urânio( $ppm$ ), expressa em microgramas por grama ( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ). O termo  $K$ , por sua vez, refere-se ao fator de calibração da metodologia, que neste trabalho foi determinado especificamente para o zircão analisado por EPMA. A relação  $K(ppm)$  é obtida a partir da seguinte equação:

$$K(ppm) = N_U \varepsilon_{238} \quad (7)$$

em que  $N_U$  é o número de átomos de  $^{238}\text{U}$  por unidade de volume no mineral, e  $\varepsilon_{238}$  é a eficiência de detecção do mineral. Esta última é definida como a razão entre o número de traços de fissão espontâneos de  $^{238}\text{U}$  observados por unidade de superfície e o número total de traços espontâneos por unidade de volume no mineral, considerando fator geométrico igual a 1.

A equação (8) descreve o método para obtenção do fator de calibração. Todos os parâmetros utilizados neste cálculo já foram apresentados anteriormente. Em Dias et al. (2017)  $K$  foi obtido a partir do uso da amostra padrão de idade Fish Canyon Tuff (FCT).

$$K = \frac{\lambda_a}{\lambda_f} \cdot \frac{\rho_s}{(ppm) C_{238} \lambda_f (e^{\lambda_a t_s} - 1)} = \frac{y}{C_{238} \lambda_f (e^{\lambda_a t_s} - 1)} \quad (8)$$

Observa-se que  $y = \rho_s / (ppm)$ . Nota-se também que o termo  $(e^{\lambda_a t_s} - 1)$  é semelhante àquele utilizado no cálculo do fator zeta.

Um dos principais avanços apresentados por Dias et al. (2017) foi o desenvolvimento de um método para o cálculo da propagação das incertezas relativas, descrito nas Equações (9) e (10), no qual as contribuições individuais de cada variável envolvida no cálculo da idade são explicitamente separadas.

$$\left(\frac{\sigma t}{t}\right)^2 = \left(\frac{1}{Ns}\right)^2 + \left(\frac{\sigma \bar{y}}{\bar{y}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma(ppm)}{(ppm)}\right)^2 + \left(\frac{\sigma t_s}{t_s}\right)^2 \quad (9)$$

$$\left(\frac{\sigma \bar{K}}{\bar{K}}\right)^2 = \left(\frac{\sigma \lambda_f}{\lambda_f}\right)^2 + \left(\frac{\sigma \bar{y}}{\bar{y}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma C_{238}}{C_{238}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma t_s}{t_s}\right)^2 \quad (10)$$

Em particular, a incerteza associada ao fator de calibração  $K$ , expressa na Equação (10), permite um controle estatístico direto da calibração, com propagação explícita das incertezas relacionadas à densidade de traços, à concentração de urânio e à idade da amostra padrão. Esse tratamento contrasta com o modelo proposto por Hasebe et al. (2004), que adota uma abordagem simplificada baseada em uma incerteza fixa para a estimativa do conteúdo de U, e com o de Gombosi et al. (2014), que, embora apresente uma formulação formal de propagação de erro, utiliza um fator de calibração empírico agregado ( $Z$ ), dificultando a separação individual das fontes de incerteza. Adicionalmente, Dias et al. (2017) comparam diretamente as incertezas obtidas em amostras padrão com aquelas determinadas por Gombosi et al. (2014), evidenciando uma redução consistente e significativa. Dessa forma, a equação de idade proposta por Dias et al. (2017) apresenta maior capacidade de quantificação, controle e redução das incertezas associadas ao cálculo da idade, quando comparada aos modelos anteriores.

## 2.2 Histórico da FT em monazita

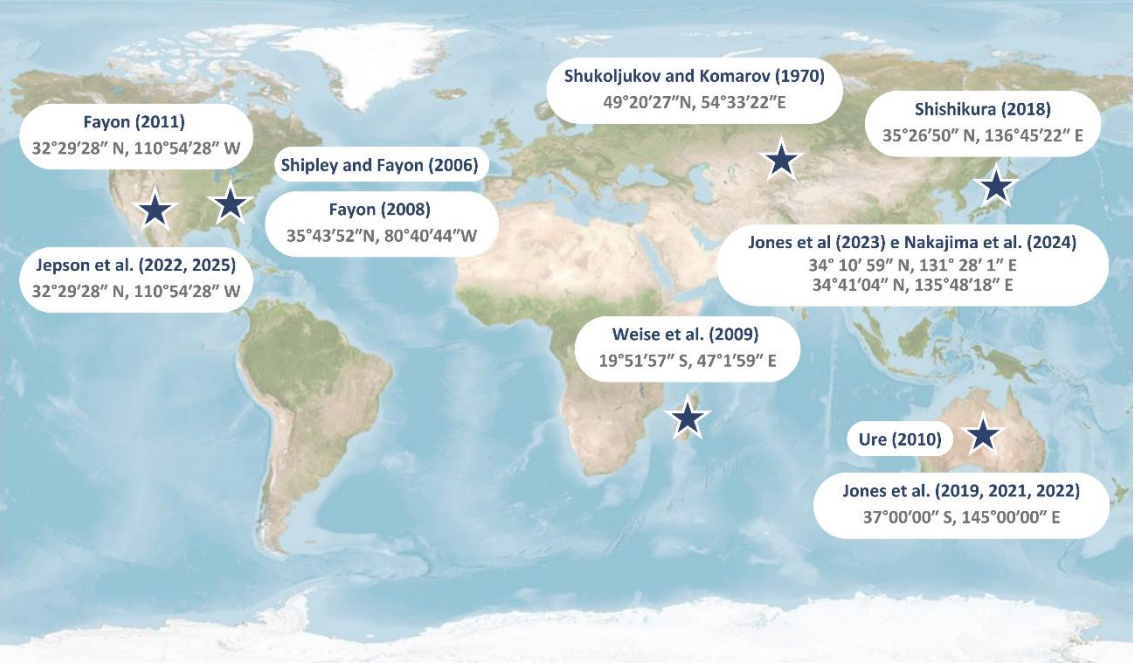
A FT aplicada à monazita (MFT) configura-se como uma metodologia promissora para o estudo de histórias térmicas de baixa temperatura, fornecendo informações registradas na faixa de aproximadamente 25 a 45 °C (JONES et al., 2021). Os dados obtidos por meio dessa técnica são particularmente úteis na análise da

evolução dinâmica de terrenos geológicos, com destaque para processos de exumação em áreas geologicamente jovens, bem como para processos erosivos relacionados a condições climáticas intensas (JEPSON et al., 2025).

Apesar do potencial reconhecido, observa-se que o desenvolvimento metodológico da FT em monazita ainda é incipiente. Até o momento, apenas 14 trabalhos foram identificados na literatura (Figura 4), dos quais quatro, Shipley e Fayon (2006), Fayon (2008), Fayon (2011) e Jepson et al. (2022), foram apresentados exclusivamente em congressos. Assim, apenas 10 estudos foram efetivamente publicados em periódicos indexados ou submetidos a processo de revisão por pares. Na Tabela 1 estão listados os trabalhos realizados com FT em monazita desde 1970, bem como os respectivos locais de extração das amostras e suas coordenadas geográficas.

Em decorrência do número reduzido de estudos, são escassas as contribuições voltadas ao aprimoramento técnico da metodologia, e mais raros ainda são os trabalhos que aplicam a FT de forma prática em contextos geológicos específicos. Apenas seis estudos se dedicaram à aplicação direta da técnica a unidades geológicas, sendo que dois deles foram também apresentados apenas em eventos científicos. Tais trabalhos fornecem dados relativos à idade de FT em monazita (idade MFT) associada a determinada configuração geológica.

**Figura 4:**Artigos de FT reportados mundialmente desde 1970 e as coordenadas geográficas dos pontos de coleta das amostras.



Fonte:Elaborado pelo autor.

**Tabela 1:**Trabalhos com FT em monazita desde 1970, com os respectivos locais de extração amostral e suas coordenadas geográficas.

| Referência                      | Região de Estudo                   | Coordenadas Geográficas     |
|---------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| Shukoljukov e Komarov (1970)    | Akshatau (Casaquistão)             | 49°20'27"N, 54°33'22"E      |
| Fayon (2008)                    | Cleveland, Carolina do Norte (EUA) | 35°43'52"N, 80°40'44"W      |
| Weise et al. (2009)             | Antsirabe, Madagascar              | 19°51'57" S,47°1'59" E      |
| Fayon (2011)                    | Catalina, Arizona (EUA)            | 32°29'28" N,110°54'28" W    |
| Shishikura (2018)               | Gifu, Japão                        | 35°26'50" N,136°45'22" E    |
| Jones et al. (2019, 2021, 2022) | Victoria, Austrália                | 37°00'00" S,145°00'00" E    |
| Jepson et al. (2022, 2025)      | Catalina, Arizona (EUA)            | 32°29'28" N,110°54'28" W    |
| Jones et al. (2023)             | Yamaguchi e Nara, Japão            | 34° 10' 59" N,131° 28' 1" E |
| Nakajima et al. (2024)          |                                    | 34°41'04" N, 135°48'18" E   |

Na Tabela A1, localizada no Apêndice A, são apresentadas as informações essenciais desses estudos, incluindo a área de ocorrência das amostras, a litologia (entendida como o conjunto de características físicas e mineralógicas da rocha fonte),

conteúdo de U obtidos por análise, bem como a densidade de traços e as respectivas idades MFT determinadas.

Por fim, esta seção tem como objetivo apresentar uma breve contextualização histórica dos trabalhos realizados com a técnica de FT em monazita, destacando suas contribuições para o desenvolvimento e consolidação metodológica da área.

### **2.2.1 Estudos iniciais da metodologia**

A monazita é reconhecida por conter elevadas concentrações de urânio. No entanto, até o início dos anos 2000, o único estudo conhecido de datação por traços de fissão nesse mineral foi conduzido por Shukoljukov e Komarov (1970). Os autores descreveram o primeiro método de revelação química aplicado à monazita, utilizando ácido clorídrico (HCl) a 37% (12M), mantido a 90 °C por 45 minutos (JONES, 2019). Com essa técnica, foram datadas amostras provenientes do Cazaquistão, cujas idades por traços de fissão, em torno de 25 Ma, mostraram-se substancialmente mais jovens do que a idade geológica esperada de aproximadamente 200 Ma da rocha hospedeira. Tal resultado era previsível, uma vez que a monazita, por ser um mineral fosfatado, apresenta baixa estabilidade térmica à annealing (WAGNER; VAN DEN HAUTE, 1992).

Shiple e Fayon (2006) realizaram um estudo comparativo sobre o processo de annealing entre apatita (utilizando amostras de Durango) e monazita. As apatitas foram reveladas com HNO<sub>3</sub> à temperatura ambiente por 20 segundos, enquanto as monazitas foram atacadas com HCl a 37% por 50 minutos, em configuração semelhante à proposta por Shukoljukov e Komarov (1970). Os resultados indicaram que as taxas de annealing dos traços de fissão variam conforme a concentração de urânio. Verificou-se, ainda, que a redução dos traços em monazita ocorreu de forma mais rápida que na apatita, sugerindo que o annealing da monazita ocorre em temperaturas inferiores às da apatita. Essa hipótese foi posteriormente corroborada por experimentos adicionais.

Fayon (2008) realizou uma série de experimentos com o objetivo de avaliar a viabilidade da monazita como termocronômetro por traços de fissão, utilizando amostras provenientes da região dos Montes Apalaches, na Carolina do Norte (Estados Unidos). Os traços latentes foram revelados por ataque químico em HCl concentrado durante 45 minutos. As concentrações de urânio, determinadas por EPMA, variaram

entre 0,3 e 0,8% em massa. Em alguns cristais foram identificadas zonas com distribuição aparentemente homogênea de urânio, a partir das quais foram calculadas as densidades iniciais de traços revelados. Ressalta-se, contudo, que no resumo do trabalho apresentado em congresso não são detalhadas informações sobre a obtenção do conteúdo de tório, nem são reportadas as incertezas associadas às idades obtidas.

As idades, variando entre 1,0 e 1,5 Ma, foram calculadas com base na equação proposta por Hasebe et al. (2004) e mostraram-se significativamente mais jovens do que as idades por traços de fissão em apatita previamente determinadas para a região dos Apalaches. Esses resultados levantaram questionamentos quanto à estabilidade térmica dos traços de fissão em monazita e à viabilidade do mineral como termocronômetro de baixa temperatura.

Após a determinação das idades, os mesmos grãos foram repolidos para a completa remoção das superfícies previamente atacadas e dos traços revelados, sendo então submetidos a experimentos de annealing térmico isotérmico a 150 °C e 250 °C, em intervalos sucessivos de uma hora, totalizando oito horas de experimento. Após cada intervalo, os grãos eram novamente montados, atacados quimicamente e analisados. Dessa forma, cada etapa de observação correspondia a uma nova superfície cristalina, permitindo a avaliação da densidade de traços remanescentes no volume do cristal, e não a efeitos cumulativos do ataque químico sobre a mesma superfície.

Ao longo do experimento, observou-se uma redução sistemática na densidade de traços revelados. Ao final, registrou-se uma diminuição de aproximadamente 23% na densidade de traços a 150 °C e de cerca de 65% a 250 °C, evidenciando a elevada sensibilidade do sistema de traços de fissão em monazita às variações térmicas.

Com base na extrapolação cinética desses resultados, estimou-se que o annealing completo dos traços de fissão em monazita ocorreria após aproximadamente 35 horas a 150 °C e cerca de 15 horas a 250 °C, em concordância com os dados previamente apresentados por Shipley e Fayon (2006).

A autora concluiu que a realização de experimentos adicionais de annealing isotérmico e isocrônico seria necessária para caracterizar de forma mais detalhada a cinética de apagamento dos traços e avaliar, de maneira mais robusta, o potencial da monazita como termocronômetro por traços de fissão.

Embora os traços de fissão induzidos sejam frequentemente utilizados para a calibração de equações de annealing em modelagens de tempo–temperatura (T–t), uma abordagem alternativa consiste no uso de traços produzidos artificialmente pela implantação de íons pesados, os quais atuam como análogos experimentais do dano por fragmentos de fissão em estudos de annealing térmico.

Devido à impossibilidade prática de gerar traços de fissão induzidos em monazita, em função da elevada seção de choque de absorção de nêutrons por elementos terras-raras, em especial o Gd, Weise et al. (2009) realizaram avanços significativos no estudo da cinética de annealing desse mineral por meio de experimentos com traços de íons  $^{86}\text{Kr}$  de 300 MeV, produzidos em acelerador de íons. À semelhança do que é adotado para a apatita, o objetivo do estudo não foi estabelecer equações definitivas para descrever a cinética de annealing dos traços de fissão em monazita, mas fornecer estimativas de primeira ordem da faixa de temperaturas na qual o processo de annealing ocorre em escala geológica.

Foram utilizadas amostras de monazita provenientes de um pegmatito nas proximidades de Antsirabe, Madagascar. Inicialmente, os grãos foram aquecidos a 400 °C por 24 h com o intuito de eliminar traços fósseis e danos residuais por autoirradiação, sendo posteriormente montados em resina epóxi e polidos. Em seguida, os grãos foram irradiados com íons  $^{86}\text{Kr}$  (300 MeV) e submetidos a três sequências de annealing isocrônico, com durações de 1, 20 e 100 h.

Considerando as incertezas associadas à possibilidade de annealing térmico durante o ataque químico, especialmente em condições tradicionalmente empregadas a 90 °C (Shukoljukov e Komarov, 1970; Shipley e Fayon, 2006; Fayon, 2008), foi adotado um protocolo alternativo de ataque com HCl a 37% a 50 °C por 18 h. Essa escolha buscou reduzir os efeitos térmicos do ataque, ainda que à custa de tempos de ataque significativamente mais longos. Com base nos modelos “paralelo” e “fanning” propostos para a apatita (Laslett et al., 1987), foram realizados os cálculos necessários à construção de um diagrama de Arrhenius representativo da redução do comprimento dos traços de Kr extrapolada para escalas de tempo geológicas.

Os comprimentos médios dos traços de  $^{86}\text{Kr}$  variaram entre 17 e 19  $\mu\text{m}$ , valores que, ao considerar o déficit de comprimento associado à diferença entre traços de íons pesados e fragmentos de fissão, correspondem a comprimentos médios estimados de

traços de fissão reveláveis da ordem de 12 a 13  $\mu\text{m}$  (Weise et al., 2009). Os resultados indicam que a acumulação de traços em monazita ocorre apenas a temperaturas inferiores a aproximadamente 100 °C; que há um encurtamento médio de cerca de 2,5  $\mu\text{m}$  em condições compatíveis com a crosta superior da Terra (20–100 °C); e uma redução adicional de magnitude semelhante em temperaturas próximas ou inferiores à ambiente. Ademais, estimou-se que o comprimento inicial dos traços pode ser subestimado em menos de 1  $\mu\text{m}$  em decorrência das condições de ataque.

A principal conclusão do estudo é que a temperatura de fechamento dos traços de fissão em monazita situa-se em uma faixa estreita compreendida entre valores ligeiramente superiores à temperatura ambiente e inferiores a aproximadamente 50 °C, indicando uma estabilidade térmica reduzida quando comparada à de minerais tradicionalmente utilizados em termocronologia por traços de fissão, como a apatita.

Experimentos subsequentes de annealing térmico foram conduzidos por Ure (2010), utilizando traços induzidos por implantação de  $^{252}\text{Cf}$ . Monazitas de composição desconhecida foram montadas em duas orientações: paralela às faces pinacoidais (100) e perpendicular ao eixo cristalográfico c. Cada orientação foi submetida a tratamentos térmicos de 20 minutos e 1 hora, em diferentes temperaturas. Os resultados demonstraram que o annealing dos traços de  $^{252}\text{Cf}$  em monazita ocorre em temperaturas inferiores às observadas para a apatita de Durango em experimentos similares. Além disso, inferiu-se que a monazita apresenta propriedades anisotrópicas análogas às da apatita, uma vez que esta apresenta annealing mais acelerado quando orientada perpendicularmente ao eixo c. Apesar do potencial promissor da monazita como termocronômetro de baixíssimas temperaturas, investigações adicionais são necessárias para a quantificação precisa da cinética de annealing (JONES, 2021).

Fayon (2011) analisou grãos de monazita provenientes de depósitos com idades desde o Paleozoico até o Mioceno, com o intuito de avaliar seu potencial como termocronômetro por traços de fissão. Amostras de três regiões distintas foram montadas, polidas e atacadas com HCl a 37% por 45 minutos, conforme o protocolo de Shukoljukov e Komarov (1970). A composição química, incluindo o teor de urânio, foi determinada por EPMA.

Observou-se que uma das amostras não revelou traços. Supôs-se que variações químicas ou cristalográficas associadas a danos por radiação poderiam gerar diferenças



no comportamento de revelação. Após novo polimento e exposição prolongada ao reagente (80 minutos), traços foram revelados com sucesso.

Considerando que a amostra que exigiu maior tempo de revelação apresentou o menor teor de urânio, propôs-se que a eficiência da revelação pode estar relacionada à concentração de urânio no mineral. Assim, cristais com baixo teor de urânio requerem maior tempo de ataque químico.

Por fim, Shishikura (2018) apresentou um estudo com o objetivo de estimar a cinética de annealing de longo prazo para traços de fissão em monazita. Para isso, foram coletadas amostras de granitos a partir de profundidades de até 1000 metros, em intervalos de 100 metros, visando à análise comparativa entre profundidade (e, portanto, temperatura) e o comprimento dos traços medidos. O trabalho, no entanto, apresentou essencialmente uma proposta de investigação, não tendo sido identificados resultados posteriormente publicados, seja em anais de congressos ou em periódicos científicos. As conclusões do estudo, portanto, permanecem não esclarecidas.

### **2.2.2 Depois de Jones et al. (2019)**

Apesar do desenvolvimento de métodos de ataque químico e da eficácia do HCl a 37% na revelação de traços, a elevada corrosividade do ácido tornou-se um fator problemático. Após 45 minutos de ataque, os grãos apresentavam corrosão significativa, dificultando a observação dos traços de fissão e ocasionando perda considerável de material. Essa limitação já havia sido observada em protocolos anteriores, como os desenvolvidos por Shukoljukov e Komarov (1970) e por Weise et al. (2008). Nesse contexto, visando à otimização do processo de revelação e à redução dos efeitos de corrosão, um estudo relevante foi conduzido por Jones et al. (2019).

Cristais de monazita provenientes de Victoria, Austrália, com idade de aproximadamente 370 milhões de anos determinada por geocronologia U–Pb em zircão, foram submetidos a um pré-annealing a 400 °C com o objetivo de eliminar traços fósseis. Em seguida, os grãos foram montados em resina epóxi, polidos e irradiados com fragmentos de fissão de uma fonte de  $^{252}\text{Cf}$ . Posteriormente, os semi-traços formados foram submetidos a etapas sucessivas de ataque químico em intervalos de 15 minutos, totalizando 90 minutos, utilizando HCl 6M a 90 °C, concentração equivalente à metade da empregada em estudos anteriores. Além disso, foram conduzidos

experimentos de annealing isotérmico, nos quais os grãos foram expostos à temperatura de 90 °C por períodos de 1, 3, 7, 15 e 31 horas.

Os resultados indicaram que, após 15 minutos, não houve revelação de traços de fissão, enquanto a densidade de traços passou a aumentar significativamente a partir de aproximadamente 30 minutos, atingindo um quase platô entre 60 e 90 minutos (Figura 5a). Esse comportamento define uma janela de revelação mais adequada entre 60 e 90 minutos, reduzindo simultaneamente os efeitos de corrosão observados em protocolos anteriores.

Adicionalmente, observou-se que a taxa de ataque químico variava significativamente entre diferentes grãos, e até mesmo em regiões distintas do mesmo grão. Tais variações podem estar associadas à anisotropia de ataque em diferentes orientações cristalográficas, como relatado por Ure (2010), bem como a variações composicionais e ao acúmulo de danos por radiação. Os pesquisadores constataram que as diferenças químicas entre grãos que revelaram bem e mal os traços eram insignificantes. De modo geral, grãos com menores concentrações de U e Th tendem a requerer tempos mais longos de ataque químico, indicando que a eficiência do ataque é inversamente proporcional ao conteúdo desses elementos, em concordância com os resultados de Fayon (2011).

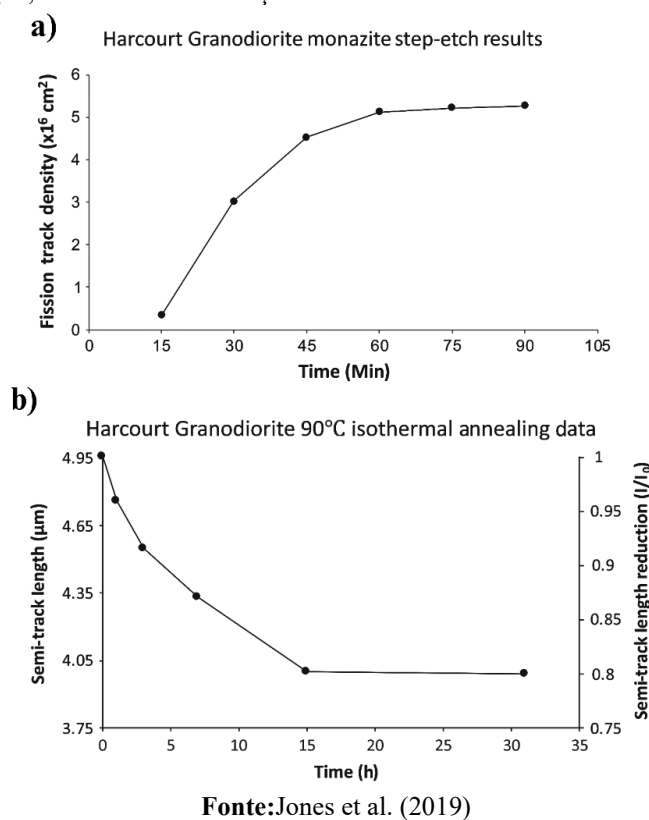
Embora a monazita nunca tenha sido observada em estado metamórfico, em função da elevada eficiência de annealing em baixas temperaturas, é provável que apresente danos residuais que não foram completamente eliminados durante o pré-annealing a 400 °C (JONES et al., 2019). Nesse contexto, levanta-se a hipótese de que elevadas concentrações de U e Th possam também influenciar os processos de cura estrutural do mineral, potencialmente afetando a cinética de annealing e, consequentemente, a eficiência de revelação dos traços (JONES et al., 2023). Investigações complementares envolvendo técnicas de caracterização estrutural, como a difração de raios X, podem fornecer informações adicionais sobre variações na estrutura cristalina e nos parâmetros da cela unitária da monazita, e sua influência nos mecanismos de recuperação estrutural associados.

O experimento de annealing conduzido por Jones et al. (2019) demonstrou uma redução rápida de aproximadamente 20% nos semi-traços, atingindo um platô após 15 horas (Figura 5b). Apesar de uma redução de cerca de 4% observada na primeira hora,

correspondente ao tempo de ataque, concluiu-se que é improvável a ocorrência de redução significativa dos traços de fissão nesse período inicial, considerando o curto tempo necessário para a penetração do reagente ao longo do comprimento dos traços reveláveis.

Jones et al. (2021) desenvolveram uma nova série de experimentos de annealing isocrônico, utilizando as mesmas amostras e a mesma configuração de implantação de semi-traços de  $^{252}\text{Cf}$  do estudo anterior. Os grãos foram posicionados em duas orientações: paralela à face pinacoidal (100) e perpendicular ao eixo cristalográfico  $c$ , conforme metodologia de Ure (2010). A configuração experimental foi extensiva, com tempos de annealing de 1, 10, 100 e 1000 horas, em temperaturas variando entre 30 °C e 400 °C. O ataque químico adotado foi HCl 6M por 75 minutos a 90 °C (JONES et al., 2019).

**Figura 5:**(a) Resultados do ataque químico escalonado (step-etch) de 20 cristais de monazita do Granodiorito de Harcourt, com base na contagem de 15.178 semi-traços induzidos por  $^{252}\text{Cf}$ , revelados em incrementos de 15 minutos até um total de 90 minutos de ataque com HCl 6 M a 90 °C. O diagrama mostra o aumento observado na densidade de traços com o tempo de ataque. Os traços tornam-se visíveis por volta dos 15 minutos, com rápida elevação da densidade até atingir um quase-platô aos ~60 minutos, após o qual há pouca variação, exceto pelo aumento contínuo no tamanho das cavidades de revelação (etch-pits).(b) Comprimentos dos semi-traços do experimento de annealing isotérmico a 90 °C em monazitas de Harcourt, realizados por períodos de 1 a 31 horas. Foram medidos 500 semi-traços em diversos grãos para cada etapa, com correção dos valores médios quanto à inclinação e ao índice de refração. O comprimento verdadeiro do semi-traço corresponde a aproximadamente metade do comprimento de um traço de fissão confinado equivalente (URE, 2010). A média do comprimento dos semi-traços de  $^{252}\text{Cf}$  decresce de 4,96  $\mu\text{m}$  na amostra controle (não submetida a annealing) para 3,99  $\mu\text{m}$  após 31 horas de annealing (eixo esquerdo). O eixo direito mostra a redução percentual do comprimento dos semi-traços, normalizada em relação ao valor médio da amostra controle não tratada.



Fonte: Jones et al. (2019)

Com base nos comprimentos medidos dos semi-traços de  $^{252}\text{Cf}$ , calcularam-se os comprimentos dos traços de fissão não submetidos ao annealing, obtendo-se uma média de 10,60  $\mu\text{m}$  para os traços confinados nas amostras-controle, valor compatível com os resultados de Weise et al. (2009).

Após os experimentos de annealing, observou-se que a redução do comprimento dos traços ocorreu de maneira levemente anisotrópica. Embora as taxas de annealing apresentem diferenças entre as duas orientações avaliadas, tais diferenças são significativamente menores do que aquelas observadas para a apatita. A partir das

equações propostas por Laslett et al. (1987), foram desenvolvidos três modelos empíricos: um modelo paralelo e dois modelos alternativos ao modelo “fanning”.

Os autores concluíram que o annealing em monazita ocorre já à temperatura ambiente ( $\sim 20^\circ\text{C}$ ), sendo que a faixa de temperatura de annealing em escalas geológicas estaria entre  $25^\circ\text{C}$  e  $45^\circ\text{C}$ , corroborando os resultados de Weise et al. (2009). A validação completa do modelo de annealing depende, no entanto, de comparações mais detalhadas com amostras naturais. Os pesquisadores destacam que os traços de fissão na monazita apresentam a menor estabilidade térmica já registrada entre os minerais analisados por essa metodologia (JONES et al., 2019).

Com o objetivo de aprofundar a análise do processo de ataque químico, Jones et al. (2022) conduziram uma nova série de experimentos utilizando semi-traços induzidos por  $^{252}\text{Cf}$ . Para caracterizar o tamanho e a morfologia dos traços de fissão espontâneos em monazita, os diâmetros dos etch pits, correspondentes às aberturas dos traços na superfície do mineral, foram medidos manualmente por meio de microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Diferentemente do traço latente, que não é diretamente observável com microscópio óptico ou MEV, essas aberturas constituem cavidades topográficas reais e são claramente visíveis em imagens de MEV. As amostras, previamente montadas e polidas, foram submetidas a ataque químico com HCl 6 M a  $90^\circ\text{C}$  por 75 minutos, conforme descrito em Jones et al. (2019, 2021)

Como resultado, verificou-se que as aberturas dos traços espontâneos bem revelados, tanto nas orientações paralelas quanto perpendiculares à face (100), apresentaram formato romboidal. Por outro lado, as aberturas observadas na face (010) exibiram morfologia alongada. A semelhança entre os etch pits nas duas primeiras orientações inviabiliza o uso dessas formas como indicadores confiáveis da superfície ou da direção do eixo cristalográfico c, ao contrário do que ocorre na apatita. Contudo, essa limitação sugere que ambas as orientações são igualmente adequadas para a contagem de traços. Conforme definido por Jones et al. (2022), Dpb corresponde à medida do etch pit paralela ao eixo cristalográfico b, enquanto Dpc corresponde à medida paralela ao eixo cristalográfico c. Os diâmetros médios dos etch pits romboidais obtidos foram  $Dpc = 0,81 \pm 0,20 \mu\text{m}$  e  $Dpb = 0,73 \pm 0,26 \mu\text{m}$  (JONES et al., 2022).

Após a realização de um experimento de ataque químico escalonado (step-etch), utilizando HCl 6 M a  $90^\circ\text{C}$  por 20, 40, 60 e 90 minutos, foi construída uma distribuição

angular a partir dos comprimentos quimicamente revelados dos traços e dos ângulos em relação ao eixo cristalográfico *c*, determinados em cada etapa. Observou-se que, nos estágios iniciais, os traços eram revelados de forma anisotrópica, com ataque mais eficiente em azimutes de 90° em relação ao eixo *c* do que em azimutes de 0°. A partir de 60 minutos, a distribuição tornou-se progressivamente mais uniforme, aproximando-se de um comportamento isotrópico aos 90 minutos.

Essa observação complementa os resultados de Jones et al. (2019), que indicaram que os traços se encontram plenamente revelados após aproximadamente 75 minutos de ataque químico. Os autores também demonstraram que a taxa de revelação varia em função das concentrações de U e Th, em concordância com os achados de Fayon (2011). Considerando a elevada abundância desses elementos na monazita, é plausível que o comportamento observado esteja, em parte, associado a efeitos de dano radiogênico.

No entanto, essa interpretação não é necessariamente única, uma vez que U e Th também influenciam a estrutura cristalina por meio de substituições químicas e geração de defeitos. Ademais, a elevada eficiência dos processos de annealing na monazita tende a promover a recuperação parcial desses danos ao longo do tempo geológico, limitando o acúmulo de defeitos estruturais. Nesse contexto, variações na taxa de ataque podem igualmente refletir efeitos estequiométricos e mudanças na estrutura local do mineral, indicando que a cinética de revelação dos traços pode ser controlada por múltiplos fatores.

Jones et al. (2022) indicam que tempos de ataque prolongados, da ordem de 75–90 minutos, podem ultrapassar o intervalo ótimo de revelação dos traços em grãos com elevadas concentrações de U e Th, resultando na degradação progressiva do defeito, em vez de sua simples ampliação. Diante dessa sensibilidade, os autores recomendam a preparação de múltiplas montagens de uma mesma amostra, submetidas a tempos de ataque distintos entre 60 e 90 minutos, a fim de identificar o intervalo ótimo de revelação e minimizar vieses associados ao ataque químico.

Duas abordagens foram empregadas para avaliar a penetração do reagente (HCl 6 M) ao longo dos semi-traços induzidos por <sup>252</sup>Cf: microscopia eletrônica de varredura associada a feixe de íons focalizado (FIB-SEM) e o experimento etch–anneal–etch. Os resultados indicaram que o reagente penetra rapidamente ao longo do núcleo danificado

do traço, alcançando praticamente todo o comprimento quimicamente acessível em poucos minutos. O encurtamento dos traços após o annealing não é observado diretamente, mas inferido de forma indireta pela redução do comprimento quimicamente revelado no segundo ataque, evidenciada pela retração da extremidade interna da abertura do traço em relação à superfície polida.

Jones et al. (2019) indicaram que aproximadamente 4% do comprimento dos traços é reduzido após 1 hora de annealing a 90 °C, enquanto para um tempo de 15 minutos essa redução é estimada em torno de 1%. Considerando que o ataque químico acessa rapidamente o núcleo danificado dos semi-traços induzidos por  $^{252}\text{Cf}$ , possivelmente em poucos minutos, a fração do defeito suscetível ao annealing durante o experimento é limitada. Nesse contexto, caso a penetração do reagente ao longo do traço ocorra de forma praticamente completa em cerca de 5 minutos, a redução esperada no comprimento quimicamente acessível durante o annealing subsequente seria ainda menor.

Jones et al. (2023) aplicaram a técnica de traços de fissão em monazita (MFT) a rochas granitoides do sudoeste do Japão, com o objetivo de investigar eventos de resfriamento em baixas temperaturas associados à evolução tectônica recente da região. As monazitas foram montadas, polidas e submetidas a ataque químico com HCl a 6 M, por períodos entre 60 e 90 minutos, a 90 °C, conforme protocolos previamente estabelecidos (Jones et al., 2019; 2021; 2022). As idades absolutas por MFT foram calculadas com base na equação proposta por Hasebe et al. (2004), adotando-se um comprimento inicial dos traços de fissão de 10,60  $\mu\text{m}$ , conforme determinado experimentalmente por Jones et al. (2021). Os cálculos assumem eficiência de revelação unitária, densidade constante da monazita e exclusão de valores discrepantes, outliers, antes da determinação das idades centrais.

As amostras da Prefeitura de Yamaguchi apresentaram idades centrais por MFT do Plio–Pleistoceno, variando entre  $2,1 \pm 0,3$  Ma e  $2,9 \pm 0,2$  Ma, associadas a comprimentos médios de traços confinados entre  $8,00 \pm 0,18$   $\mu\text{m}$  e  $8,94 \pm 0,14$   $\mu\text{m}$ . Em contraste, a amostra da Prefeitura de Nara exibiu uma idade central do Pleistoceno em torno de  $1,7 \pm 0,1$  Ma, com comprimento médio dos traços de aproximadamente  $8,73 \pm 0,12$   $\mu\text{m}$ . Jones et al. (2023) interpretam essas idades como indicativas de resfriamento superficial recente, porém enfatizam que os valores obtidos por MFT devem ser

considerados idades mínimas de resfriamento, potencialmente ligeiramente mais jovens do que os eventos térmicos responsáveis pelo resfriamento das amostras abaixo da temperatura nominal de fechamento da MFT.

Com base nessas idades mínimas e assumindo uma temperatura efetiva de fechamento ultrabaixa (entre 25 e 45 °C) para os traços de fissão em monazita, os autores estimaram taxas de denudação de primeira ordem variando entre 0,1 e 0,5 mm/ano para a região de Yamaguchi e entre 0,2 e 0,6 mm/ano para a região de Nara. Esses valores são considerados compatíveis com estimativas independentes baseadas em análises morfométricas e na dispersão altimétrica, embora os autores ressaltem as incertezas associadas às hipóteses cinéticas e ao possível comportamento de sistema aberto da MFT.

Do ponto de vista estatístico, Jones et al. (2023) observam que todas as amostras da região de Yamaguchi falharam no teste do qui-quadrado,  $P(\chi^2)$ , indicando que a dispersão das idades de grão único é maior do que a esperada apenas com base nos erros analíticos. Essa falha, no entanto, não é considerada surpreendente, dado que os comprimentos dos traços indicam a presença de diferentes estágios de annealing dentro da zona de annealing parcial da monazita, MPAZ. Além disso, os autores destacam que a elevada precisão das idades por MFT, decorrente dos altos teores de U nas monazitas e das correspondentes altas densidades de traços de fissão espontâneos, reduz significativamente os erros experimentais associados às idades individuais dos grãos, tornando mais difícil que as amostras satisfaçam o teste  $P(\chi^2)$  ao nível de confiança de 95%.

Embora a sobredispersão das idades possa, em princípio, sugerir a presença de múltiplas populações de idade, a modelagem por mistura realizada com o programa RadialPlotter (Vermeesch, 2009) indica que, para a maioria das amostras, apenas uma única população estatística pode ser reconhecida de forma robusta, com exceção da amostra EY117A. Adicionalmente, os autores reconhecem a possibilidade de existirem fontes de incerteza atualmente não quantificadas na monazita, que não são plenamente incorporadas na propagação de erros das idades por MFT.

Jones et al. (2023) associam a dispersão observada principalmente a fatores composicionais, em especial ao teor de silício, Si, para o qual foi identificada uma correlação positiva com as idades obtidas por MFT, tanto nas amostras de Yamaguchi



quanto na de Nara. Essa relação sugere um possível controle cinético composicional sobre o processo de annealing dos traços de fissão em monazita, capaz de gerar sobredispersão intra-amostra mesmo na ausência de múltiplos eventos térmicos discretos. Não foi identificada correlação sistemática entre as idades por MFT ou os comprimentos médios dos traços e os demais elementos analisados por microsonda eletrônica.

No caso específico da amostra EY117A, os autores discutem adicionalmente a presença de uma relação negativa entre idade por MFT e teor de urânio, U, sugerindo que processos induzidos por radiação possam ter exercido influência local sobre a cinética de annealing. Essa interpretação é apresentada de forma cautelosa e enquadrada no contexto de mecanismos genericamente classificados como radiation-assisted, sem que seja estabelecida uma relação causal direta ou quantitativamente definida. A possível relação entre o annealing e o conteúdo de U e Th já havia sido sugerida anteriormente por Shipley e Fayon (2006). É importante ressaltar que esse tipo de annealing assistido por radiação decorre majoritariamente do decaimento alfa, e não da fissão espontânea do urânio, visto que a frequência de emissão de partículas alfa é várias ordens de grandeza superior, como já discutido anteriormente na Seção 2.1 deste trabalho.

Além disso, Jones et al. (2023) destacam que a zona de annealing parcial da monazita ocorre em temperaturas extremamente baixas, próximas às condições de superfície, o que implica que os cristais analisados provavelmente residem dentro da MPAZ mesmo após sua exumação completa. Nessas condições, fatores climáticos, como variações de temperatura superficial ao longo do tempo geológico, tornam-se relevantes para a cinética de annealing dos traços de fissão. Os autores sugerem que, sob tais condições, o sistema MFT pode atingir um estado de equilíbrio dinâmico, no qual a produção contínua de novos traços seria parcialmente compensada pelo annealing progressivo.

No entanto, essa interpretação deve ser considerada com cautela. A produção de traços de fissão ocorre de forma contínua em escalas de tempo geológicas, enquanto as variações térmicas superficiais podem atuar de maneira cumulativa ao longo de milhões de anos. Dependendo da amplitude e persistência dessas variações, os efeitos do annealing podem não ser necessariamente sutis, podendo gerar assinaturas térmicas que,

na ausência de controle independente, podem ser interpretadas como eventos geológicos de resfriamento. Nesse contexto, a aplicabilidade da MFT pode ser mais adequada em regiões caracterizadas por condições térmicas mais estáveis e de menor amplitude, onde os efeitos de variações climáticas sobre o annealing sejam minimizados.

À luz dessas considerações, Jones et al. (2023) interpretam as idades obtidas por MFT como idades mínimas de resfriamento e reconhecem que o sistema MFT pode se comportar como um sistema aberto em escalas geológicas recentes. Esse comportamento decorre do fato de que as idades aparentes e os comprimentos dos traços de fissão não refletem exclusivamente o histórico térmico de resfriamento em profundidade, mas também um balanço cinético contínuo entre produção e modificação dos traços, controlado por fatores composicionais, estatísticos, radiativos e climáticos, violando os pressupostos de fechamento termocronológico clássico. Assim, embora a MFT se mostre promissora como ferramenta para investigar eventos de resfriamento muito recentes, sua aplicação exige cautela interpretativa e uma avaliação crítica integrada dos controles térmicos e não térmicos envolvidos.

Pesquisas recentes têm investigado os fatores que controlam a eficiência do ataque químico dos traços de fissão em monazita, com particular atenção à distinção entre efeitos composicionais e estruturais. Nesse contexto, Nakajima et al. (2024) analisaram monazitas do Cretáceo ao Quaternário provenientes do arco japonês, quantificando o grau de dano por radiação acumulado por meio de espectroscopia Raman, associada a análises composicionais por microsonda eletrônica.

O grau de dano estrutural foi estimado a partir da largura à meia altura (FWHM) do modo Raman  $\nu_1(\text{PO}_4)$ . No entanto, como o alargamento desse pico não reflete exclusivamente o dano por radiação, sendo também influenciado pela incorporação de cátions não-formulares, como Th, U, Ca e Pb, na estrutura cristalina, os autores adotaram um procedimento de correção composicional. Inicialmente, estimou-se o alargamento esperado apenas em função da composição química da monazita (FWHM<sub>calc</sub>), com base em calibrações experimentais previamente estabelecidas. Em seguida, essa contribuição composicional foi subtraída do valor de FWHM medido, resultando no parâmetro  $\Delta\text{FWHM}$ , interpretado como uma medida do dano por radiação efetivamente acumulado. Para evitar possíveis modificações induzidas pelo feixe

eletrônico, as medições por espectroscopia Raman foram realizadas antes das análises por microsonda eletrônica.

A partir dessa caracterização estrutural, os autores aplicaram inicialmente o protocolo de ataque químico amplamente utilizado em estudos anteriores, HCl 6M a 90 °C por 60–90 minutos, Jones et al. (2019), com o objetivo de avaliar a eficiência da revelação dos traços em função do estado estrutural da monazita. Como critério operacional para definir a revelação completa dos traços, adotou-se um valor médio de  $d_{par} \approx 0,8 \mu m$ , conforme observado experimentalmente por Jones et al. (2022). Quando esse valor não era atingido após o tempo padrão de ataque, procedia-se com um protocolo de ataque escalonado até que a revelação fosse considerada completa.

Os tempos totais de ataque necessários para as cinco amostras analisadas variaram de 90 a 1200 minutos. Observou-se uma forte correlação inversa entre o tempo total de ataque e o grau de dano por radiação acumulado, expresso por  $\Delta FWHM$ , indicando que monazitas mais danificadas apresentam menor resistência química ao ataque ácido. Esse comportamento é interpretado de forma análoga ao observado em zircão, no qual o tempo necessário para a revelação dos traços é controlado predominantemente pela taxa de dissolução do cristal hospedeiro, enquanto o ataque ao longo do traço ocorre de maneira relativamente rápida.

Embora diferenças composicionais existam entre as amostras analisadas, monazitas com teores médios semelhantes de cátions não-formulares, Th, U, Ca e Pb, apresentaram tempos totais de ataque substancialmente distintos. Esse resultado reforça a interpretação de que o estado estrutural da monazita, expresso pelo grau de dano por radiação acumulado, exerce controle primário sobre a eficiência do ataque químico, enquanto a composição química média desempenha papel secundário. Essas observações são consistentes com resultados anteriores, Fayon (2011), mas refinam a interpretação ao demonstrar que não é a concentração de U ou Th isoladamente que controla o ataque, e sim o dano estrutural efetivo resultante da autoirradiação.

As implicações metodológicas desses resultados são significativas, pois indicam que monazitas jovens ou termicamente reannealadas podem apresentar elevada resistência química, tornando inadequados os protocolos de ataque convencionalmente empregados. Assim, futuras aplicações da termocronologia por traços de fissão em

monazita exigirão a definição criteriosa de parâmetros de terminação do ataque e a adoção sistemática de procedimentos de ataque escalonado.

O trabalho desenvolvido por Jepson et al. (2025) teve como objetivo principal avaliar o potencial da monazite fission-track (MFT) como ferramenta para detectar episódios de resfriamento de baixa magnitude ( $<50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) na crosta superior, com ênfase na identificação de eventos erosivos recentes e de curta duração, os quais tradicionalmente escapam à resolução dos métodos clássicos de termocronologia de baixa temperatura. Nesse contexto, a proposta do estudo consiste em explorar a sensibilidade da MFT a processos térmicos rasos, posicionando esse sistema como um possível elo entre registros geomorfológicos, métodos cosmogênicos e termocronômetros convencionais.

O estudo foi conduzido no Complexo Núcleo Metamórfico Catalina–Rincon (Catalina–Rincon Metamorphic Core Complex – MCC), localizado no sul do Arizona (EUA), uma região amplamente investigada e com histórico tectônico bem documentado. Trabalhos anteriores baseados em traços de fissão em apatita (AFT) e datações (U–Th)/He em apatita e zircão indicam exumação associada à tectônica de núcleo metamórfico entre aproximadamente 30 e 20 Ma, seguida por extensão relacionada à província Bacia e Cordilheira entre 15 e 12 Ma (Jepson et al., 2022; Jepson et al., 2025). Esse arcabouço torna a área particularmente adequada para a comparação direta entre diferentes sistemas termocronológicos.

Os resultados obtidos com a MFT revelaram idades significativamente mais jovens em relação às registradas pelos sistemas AFT e (U–Th)/He. No perfil leste, as idades MFT variaram entre 7,7 e 4,5 Ma, enquanto no perfil noroeste variaram entre 2,8 e 0,9 Ma. No perfil leste, observou-se uma correlação entre idade e elevação, interpretada pelos autores como indicativa de uma história térmica em dois estágios: um primeiro episódio associado ao soerguimento do bloco inferior da falha entre aproximadamente 7,5 e 5,1 Ma, seguido por um segundo estágio atribuído à intensificação da erosão superficial no final do Plioceno, entre 4,0 e 3,0 Ma. No perfil noroeste, por sua vez, os dados foram interpretados como reflexo de um único episódio de resfriamento rápido ocorrido entre 2,8 e 1,0 Ma.

Com base no modelo atual de annealing da monazita, os autores argumentam que a MFT seria sensível a temperaturas inferiores a  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , o que implicaria o registro

de processos ocorrendo a profundidades rasas da crosta, estimadas em aproximadamente 1–2 km. No entanto, essa estimativa deve ser interpretada com cautela, uma vez que a cinética de annealing da monazita ainda não foi validada de forma independente em condições naturais. A maior parte das inferências sobre a sensibilidade térmica da MFT deriva de experimentos laboratoriais de curta duração, realizados sob condições simplificadas, que não reproduzem plenamente os efeitos da dose acumulada de radiação ao longo de escalas de tempo geológico.

A integração dos dados MFT com AFT, AHe e ZHe foi realizada por meio de modelagem térmica utilizando o software QTQt. Contudo, os modelos que incorporaram simultaneamente todos os termocronômetros não conseguiram gerar soluções térmicas consistentes. Esse desajuste evidencia limitações fundamentais nos modelos atuais de annealing da monazita e sugere que o comportamento da MFT não pode ser descrito adequadamente apenas como função do tempo e da temperatura. A incompatibilidade entre MFT e os demais sistemas indica que processos adicionais, ainda não plenamente incorporados nos modelos cinéticos, desempenham papel relevante no apagamento dos traços de fissão na monazita.

Diversos fatores físicos podem contribuir para esse comportamento, incluindo altas concentrações de U e Th, zonas de crescimento mineral, heterogeneidades composicionais internas e variações na taxa de produção de dano por radiação (Jones et al., 2023). Esses fatores introduzem uma ambiguidade fundamental na interpretação das idades MFT, uma vez que padrões de encurtamento ou apagamento de traços podem refletir não apenas efeitos térmicos, mas também processos associados à recuperação induzida por radiação. Dessa forma, o sinal registrado pela MFT pode representar uma combinação complexa de efeitos térmicos e não térmicos, afastando esse sistema do comportamento clássico de um termocronômetro fechado.

Nesse contexto, Jepson et al. (2025) também investigam possíveis controles geoquímicos sobre a dispersão das idades MFT, observando uma correlação negativa entre as idades de grãos individuais e o conteúdo de ítrio (Y), na qual concentrações mais elevadas de Y estão associadas a idades MFT mais jovens. Essa relação é interpretada pelos autores como um indício de que a geoquímica da monazita pode influenciar a cinética de annealing, uma vez que o  $Y^{3+}$  pode substituir terras raras trivalentes ( $REE^{3+}$ ) na estrutura cristalina, refletindo variações nos mecanismos de

substituição cristalográfica e, potencialmente, na estabilidade dos defeitos estruturais associados aos traços de fissão.

No entanto, o estudo não deixa explícito se essa correlação foi avaliada predominantemente em escala intra-amostrai, isto é, entre grãos de uma mesma amostra, ou em escala inter-amostrai, envolvendo comparações entre diferentes amostras ao longo dos perfis analisados. Essa distinção é conceitualmente importante, pois correlações inter-amostrais podem refletir diferenças regionais ou variações entre populações distintas de monazita, enquanto correlações intra-amostrais forneceriam evidências mais diretas de um controle cristalino-químico sobre a cinética de annealing. Assim, embora a associação entre Y e idades MFT represente um indício relevante da influência composicional no sistema, sua interpretação permanece ambígua e requer investigações adicionais com foco explícito na variabilidade intra-amostra e na caracterização detalhada da geoquímica dos grãos analisados.

Adicionalmente, embora padrões idade–elevação sejam observados em alguns perfis, sua robustez estatística deve ser avaliada com cautela. Em análises de MFT, o número de grãos por amostra é frequentemente limitado e a dispersão intra-amostra pode ser elevada, em parte devido a efeitos composicionais. Assim, correlações idade–elevação em MFT não possuem necessariamente o mesmo peso estatístico ou significado físico que aquelas observadas em sistemas mais bem calibrados, como o AFT.

Apesar dessas limitações, Jepson et al. (2025) interpretam as idades MFT como indicativas de um episódio de resfriamento superficial associado ao aumento da erosão climática durante o Plioceno–Pleistoceno, período que coincide com o desenvolvimento da Monção Norte-Americana, caracterizada por um incremento significativo na precipitação no sudoeste dos Estados Unidos (Herman et al., 2013; Jepson et al., 2025). Segundo essa interpretação, o aumento da disponibilidade hídrica teria intensificado a incisão de vales e promovido o rebaixamento da superfície topográfica, resultando em resfriamento das rochas na crosta superior. Embora essa hipótese seja compatível com o contexto regional e com evidências geomorfológicas independentes, ela não pode ser considerada demonstrada de forma inequívoca apenas com base nos dados MFT, dada a ambiguidade entre sinais térmicos e efeitos associados à radiação.

Em síntese, o estudo de Jepson et al. (2025) não apenas explora o potencial da MFT para registrar processos de resfriamento rasos e recentes, mas também evidencia de forma clara as limitações conceituais e metodológicas atuais desse sistema. Mais do que validar a MFT como um termocronômetro clássico de baixa temperatura, o trabalho contribui para delimitar seu espaço de aplicabilidade, destacando a necessidade de aprimoramento dos modelos de annealing da monazita e de uma compreensão mais aprofundada dos efeitos composicionais e radioativos. Nesse sentido, a MFT emerge como uma ferramenta promissora, porém ainda conceitualmente imatura, cujo uso interpretativo deve ser acompanhado de cautela e de integração crítica com métodos independentes.

## **2.3 Contexto geológico das amostras**

### **2.3.1 Amostras internacionais**

#### **2.3.1.1 Monazitas do Japão**

As amostras analisadas são provenientes de duas regiões principais: Yamaguchi, localizada no extremo oeste da ilha de Honshu, e Nara, situada aproximadamente 400 km a leste. Ambas as regiões estão inseridas no arcabouço geológico do Cinturão Metamórfico Ryoke.

O Cinturão Ryoke constitui uma importante faixa geológica do sudoeste do Japão, com cerca de 700 km de extensão e largura variando entre 30 e 50 km. Ele representa uma porção da crosta continental que foi intensamente modificada por processos térmicos e estruturais associados a eventos tectônicos de grande escala. Essa unidade encontra-se posicionada ao norte da Linha Tectônica Mediana, uma das principais estruturas tectônicas do arquipélago japonês, que separa o Cinturão Ryoke do cinturão metamórfico vizinho Sanbagawa (JONES et al., 2023).

Do ponto de vista litológico, o Cinturão Ryoke é composto principalmente por dois grandes grupos de rochas: granitos e rochas metamórficas. Os granitos se formaram a partir da cristalização de magmas durante o período Cretáceo, entre aproximadamente 100 e 70 Ma, enquanto as rochas metamórficas resultam da transformação de

protólitos sedimentares e ígneos submetidos a condições elevadas de temperatura e pressão na crosta terrestre. Parte significativa dessas rochas metamórficas, estimada entre 20% e 30% dos afloramentos estudados, registra condições de metamorfismo de baixa pressão e alta temperatura. Essas condições favoreceram a formação de minerais como andalusita, sillimanita e biotita, típicos de ambientes metamórficos associados principalmente à fácies anfibolito e a campos metamórficos de alto grau. A presença desses minerais indica que as rochas foram enterradas a profundidades intermediárias e submetidas a gradientes geotérmicos elevados, compatíveis com o ambiente termotectônico ativo durante o Cretáceo (NAKAJIMA, 1994; JONES et al., 2023).

As rochas metamórficas do Ryoke apresentam uma transição gradual para unidades mais antigas conhecidas como complexos de acreção, cuja formação ocorreu entre o Jurássico Médio e o Jurássico Final, aproximadamente entre 170 e 140 Ma. Esses complexos representam a acumulação tectonicamente desorganizada de materiais em ambientes de subducção, incluindo sedimentos finos compactados, arenitos, greenstones, calcários e blocos isolados de rochas ainda mais antigas, com idades variando do Carbonífero ao Triássico (cerca de 360 a 200 Ma). Essas características indicam que uma parcela significativa dos materiais que compõem o Cinturão Ryoke teve origem em antigos ambientes marinhos profundos, posteriormente incorporados à crosta continental e retrabalhados durante processos de convergência e colisão de placas tectônicas (JONES et al., 2023).

A evolução dessas unidades geológicas está diretamente relacionada à subducção, processo no qual uma placa tectônica oceânica se desloca e afunda sob outra placa, geralmente continental, em direção ao interior da Terra. Esse mecanismo ocorre em zonas de convergência entre placas e está associado a intenso aquecimento, deformação e espessamento da crosta, além de promover a geração de magmas e metamorfismo regional.

Durante o período Cretáceo (145–66 Ma), a subducção da antiga placa Izanagi sob a margem leste do continente asiático provocou intensa atividade magmática e metamórfica na região que atualmente corresponde ao arquipélago japonês. Esse processo contribuiu para o aumento das temperaturas na crosta inferior, favorecendo a geração e a colocação dos granitos do Cinturão Ryoke, seguida por um resfriamento relativamente rápido em termos geológicos. Posteriormente, a dinâmica tectônica da



região continuou a ser influenciada pela subducção das placas do Pacífico e, a partir do Mioceno Médio (~15 Ma), da Placa do Mar das Filipinas, resultando em novos episódios de compressão crustal, soerguimento e remodelamento topográfico (JONES et al., 2023).

Outro fator relevante nesse contexto geodinâmico é a subducção de uma crista oceânica, que corresponde a uma elevação no fundo oceânico onde ocorre a formação contínua de nova crosta por atividade vulcânica. A subducção da crista Kula–Pacífico sob o continente asiático representou um evento incomum, capaz de gerar anomalias térmicas significativas na crosta continental. Esse processo aumentou de forma anômala o fluxo de calor, favorecendo o derretimento parcial das rochas em níveis profundos da crosta e contribuindo para a geração dos magmas graníticos do Ryoke. Estudos indicam que esses granitos foram emplacados a profundidades entre aproximadamente 10 e 14 km e posteriormente exumados, isto é, trazidos a níveis crustais mais rasos por processos tectônicos e erosivos, em um intervalo de tempo relativamente curto (NAKAJIMA, 1994; JONES et al., 2023).

Na região de Yamaguchi, situada na porção ocidental do Cinturão Ryoke, afloram extensos corpos graníticos, tanto maciços quanto parcialmente deformados, incluindo os granitos de Shimokuhara, Namera e Kibe. Essas rochas registram eventos magmáticos associados ao Cretáceo Médio, com idades determinadas por métodos U–Pb em zircão e monazita variando entre  $106 \pm 5$  Ma e  $86 \pm 1,6$  Ma (SUZUKI et al., 1996; SKRZYPEK et al., 2020). Esse intervalo de idades indica uma fase prolongada de atividade magmática, seguida por resfriamento em profundidade, compatível com o regime tectônico associado à subducção ativa durante o Mesozoico (JONES et al., 2023).

Na região de Nara, destaca-se o granito Sagawa, caracterizado como um plutão foliado. Trata-se de um corpo granítico que, após sua intrusão, foi deformado por esforços tectônicos, desenvolvendo uma foliação magmática ou tectônica definida pelo alinhamento preferencial dos minerais durante ou após a cristalização. O alojamento do granito ocorre de forma aproximadamente paralela à foliação das rochas encaixantes, o que sugere uma relação sintectônica com a deformação regional. A mineralogia do granito Sagawa, composta por granada, biotita e outros minerais indicativos de altas

temperaturas, reforça sua cristalização em níveis intermediários da crosta. As idades U–Pb obtidas em zircão indicam cristalização em torno de  $105 \pm 8,4$  Ma, enquanto idades Rb–Sr em biotita alcançam valores de até  $113 \pm 9,0$  Ma. Essa diferença reflete as distintas temperaturas de fechamento e comportamentos isotópicos dos métodos empregados, não implicando necessariamente em múltiplos eventos magmáticos, sendo compatível com as idades dos granitos da região de Yamaguchi (ISHAZAKA, 1966; SKRZYPEK et al., 2016).

Os resultados obtidos por Jones et al. (2023) a partir da aplicação da termocronologia por traços de fissão em monazita (MFT) fornecem importantes subsídios para a compreensão da história térmica recente do Cinturão Ryoke. As idades MFT concentram-se no intervalo Plio–Pleistocênico, indicando que as amostras analisadas cruzaram a zona de annealing parcial (PAZ) da monazita em tempos geologicamente muito recentes, quando atingiram temperaturas suficientemente baixas para a preservação estável dos traços de fissão.

Essa interpretação sugere que os granitos estudados foram submetidos a um episódio de resfriamento raso e tardio, em baixas profundidades crustais, compatível com eventos tectônicos neotectônicos associados à subducção contínua da Placa do Mar das Filipinas desde o Mioceno Médio. Adicionalmente, esse resfriamento está relacionado à reorganização tectônica e à colisão entre os blocos crustais do nordeste e sudoeste do Japão, registrada ao longo da Linha Tectônica Itoigawa–Shizuoka (ISTL) durante o Quaternário (JONES et al., 2023).

As idades MFT são interpretadas como idades mínimas de resfriamento, pois representam o momento mais recente a partir do qual os traços de fissão passaram a ser preservados de forma estável na monazita. Caso as amostras tenham permanecido por períodos prolongados dentro da PAZ antes de continuar o resfriamento, as idades registradas refletem um estágio tardio da história térmica, posterior ao principal evento de resfriamento em profundidade. Dessa forma, as idades MFT não indicam necessariamente o início do resfriamento crustal, mas sim um limite temporal mínimo para a exumação a baixas temperaturas.

Ainda assim, essas idades fornecem informações relevantes sobre o tempo relativo e a intensidade da exumação entre diferentes setores do cinturão. Com base nas profundidades estimadas de formação dos granitos e no intervalo térmico associado à

PAZ da monazita, Jones et al. (2023) calcularam taxas máximas de exumação variando entre 0,1 e 0,4 mm/ano para a região de Yamaguchi, e entre 0,2 e 0,6 mm/ano para a região de Nara. Esse contraste sugere que a área de Nara experimentou um soerguimento mais intenso e/ou mais recente, coerente com sua proximidade às zonas tectonicamente ativas do Japão central, refletindo diferenças significativas no regime tectônico e na dinâmica de elevação e erosão da crosta superior.

Em conjunto, essas evidências demonstram o elevado potencial da técnica MFT para registrar eventos térmicos de muito baixa temperatura que frequentemente escapam à resolução de outros métodos termocronológicos convencionais, como AHe, AFT e ZHe. Dessa forma, a aplicação da MFT complementa esses métodos e contribui de maneira decisiva para a reconstrução da evolução térmica e tectônica recente da crosta no Japão meridional (JONES et al., 2023).

### **2.3.1.2 Monazitas da Austrália**

As amostras de monazita analisadas neste estudo foram obtidas em duas regiões do estado de Victoria, no sudeste da Austrália. A primeira fonte corresponde ao Granodiorito Harcourt, uma rocha ígnea intrusiva formada pelo resfriamento lento de magmas na crosta continental durante o Devoniano Tardio, há aproximadamente 370 Ma. Essas rochas apresentam afinidade cálcio-alcalina de alto K, típica de ambientes orogênicos associados a subducção e espessamento crustal, bem como a regimes pós-orogênicos de relaxamento tectônico, como é o caso do Cinturão Dobrado Lachlan (CLEMENS, 2018).

A segunda fonte é composta por monazitas aluviais provenientes da região de Beechworth, também em Victoria. Trata-se de cristais transportados e depositados por sistemas fluviais, extraídos de sedimentos aluviais ricos em ouro no leito do Reedy Creek. Essas monazitas foram recuperadas durante uma operação histórica de mineração hidráulica conduzida pela draga Cocks Eldorado, que esteve em atividade entre os anos de 1940 e 1942 (SULLIVAN, 1947).

Ambos os conjuntos de amostras foram utilizados nos estudos metodológicos desenvolvidos por Jones et al. entre 2019 e 2022, com foco na compreensão do comportamento das monazitas frente ao ataque químico e ao processo de annealing. No entanto, apesar do amplo uso dessas amostras, não foram publicados cálculos de idade

por traços de fissão em monazita (MFT). As investigações concentraram-se principalmente na análise experimental do ataque químico e da cinética de annealing de semitraços induzidos por  $^{252}\text{Cf}$ . Em Jones et al. (2022), os traços fósseis presentes nessas monazitas foram analisados apenas em uma etapa inicial, com o objetivo de caracterizar a morfologia das cavidades de ataque químico (etch pits). Não foram reportados dados de densidade de traços nem interpretações geocronológicas baseadas em idades MFT para essas amostras.

O Batólito Harcourt localiza-se na região central do estado de Victoria, inserido na Zona de Bendigo, uma subdivisão estrutural do Cinturão Dobrado Lachlan. Sua formação é atribuída ao Devoniano Tardio, em torno de 370 Ma, conforme indicado por múltiplos métodos geocronológicos (CLEMENS, 2018). O batólito é composto principalmente pelos plutões Mount Alexander e Baringhup, que correspondem a grandes corpos ígneos intrusivos de cristalização lenta, responsáveis pela formação de minerais bem desenvolvidos e de granulação média a grossa.

Do ponto de vista litológico, o Batólito Harcourt é constituído predominantemente por monzogranitos, caracterizados por proporções aproximadamente equivalentes de feldspato potássico e plagioclásio, além de quartzo e minerais máficos, principalmente biotita. Embora tradicionalmente classificado como um granito do tipo I, o batólito apresenta caráter peraluminoso e assinaturas geoquímicas e isotópicas que indicam uma natureza transicional entre os tipos I e S. Evidências isotópicas e modelagens de equilíbrio de fases sugerem que os magmas que deram origem ao batólito foram derivados majoritariamente de fontes metassedimentares da crosta continental, possivelmente metagrauwaques quimicamente imaturas, em vez de uma simples mistura mecânica entre componentes ígneos e sedimentares (CLEMENS, 2018).

Análises geoquímicas e isotópicas corroboram essa interpretação. As razões isotópicas iniciais de estrôncio ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  entre 0,708 e 0,714) e os valores negativos de  $\epsilon\text{Nd}$  (entre  $-5,6$  e  $-4,3$ ) indicam contribuição significativa de fontes crustais radiogênicas, refletindo uma evolução magmática complexa e a heterogeneidade das rochas fonte. Dados de datação U–Pb em zircão indicam idades de cristalização entre  $374 \pm 4$  Ma e  $367 \pm 2$  Ma, enquanto idades obtidas por  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  em biotita,

concentradas em torno de 370 Ma, sugerem um resfriamento relativamente rápido após a cristalização magmática (CLEMENS, 2018).

O contexto tectônico associado à formação do Batólito Harcourt está relacionado a um regime de relaxamento pós-orogênico, posterior à Orogênese Tabberabberana. Esse ambiente favoreceu o aquecimento da crosta espessada e a geração de grandes volumes de magma granítico, culminando na intrusão de extensos corpos plutônicos no interior da crosta continental.

As monazitas provenientes do Granodiorito Harcourt, utilizadas nos estudos de Jones et al., cristalizaram nesse contexto magmático peraluminoso, rico em elementos incompatíveis como Th e U. Essa característica torna esses cristais particularmente adequados para investigações metodológicas envolvendo traços de fissão, especialmente no que se refere ao comportamento frente ao ataque químico e aos processos de annealing em baixas temperaturas.

Gleadow e Lovering (1978) investigaram a história térmica de rochas graníticas do oeste do estado de Victoria utilizando datação por traços de fissão em titanita e apatita. As idades obtidas em titanita variaram entre  $470 \pm 28$  Ma e  $355 \pm 19$  Ma, refletindo o resfriamento das rochas até temperaturas da ordem de  $260 \pm 20$  °C. As idades em apatita, sistematicamente mais jovens, indicam o resfriamento subsequente até aproximadamente  $80 \pm 10$  °C.

Um padrão espacial significativo identificado nesse estudo é a diminuição progressiva das idades de oeste para leste, sugerindo um deslocamento temporal do magmatismo granítico nessa direção, a uma velocidade média estimada em cerca de 2,6 km/Ma. As taxas de resfriamento entre 260 °C e 80 °C variaram entre 0,8 e 5,3 °C/Ma, indicando um processo dominado principalmente por soerguimento crustal e erosão da cobertura superficial, com taxas de exumação entre 0,03 e 0,18 km/Ma. Abaixo de 80 °C, o resfriamento médio foi da ordem de  $\sim 1$  °C/Ma (GLEADOW; LOVERING, 1978).

De acordo com esses autores, os granitos mais antigos da região, como os de Wando Vale e Dergholm, apresentam idades comparáveis às dos granitos do sudeste da Austrália Meridional, sugerindo que esses corpos pertencem a uma mesma província geológica associada à Orogênese Delameriana. Em contraste, os granitos da região de Ballarat são mais jovens e se agrupam em dois conjuntos principais: um formado entre o Devoniano Inferior e Médio (419–382 Ma) e outro entre o final do Devoniano e o

início do Carbonífero (~382–359 Ma). O resfriamento completo dessas rochas ocorreu predominantemente entre o Carbonífero e o Permiano, com exceção do granito de Lismore, cuja idade em apatita é ainda mais jovem, possivelmente refletindo a influência de eventos térmicos mesozoicos.

Em síntese, os dados indicam que os granitos do oeste de Victoria experimentaram um resfriamento lento e prolongado, controlado por processos de erosão, soerguimento crustal e reativações tectônicas. Esses resultados reforçam a existência de um cinturão orogênico paleozoico contínuo, conectando a Austrália Meridional à Antártica, ativo ao longo do Paleozoico.

### **2.3.2 Monazitas do Brasil**

As amostras de monazita utilizadas neste estudo são originárias do Domínio Ceará Central (DCC) e foram previamente datadas pelo método U–Pb por Castro (2005). A seleção dessas amostras está diretamente relacionada à complexa história tectono-metamórfica desse domínio, caracterizada por múltiplos eventos de deformação, metamorfismo e magmatismo, associados principalmente ao Ciclo Brasileiro, no Neoproterozoico. Essa evolução polifásica torna o DCC particularmente adequado para investigações geocronológicas e termocronológicas, uma vez que diferentes minerais e sistemas isotópicos podem registrar distintos estágios da evolução térmica e estrutural da crosta ao longo do tempo geológico.

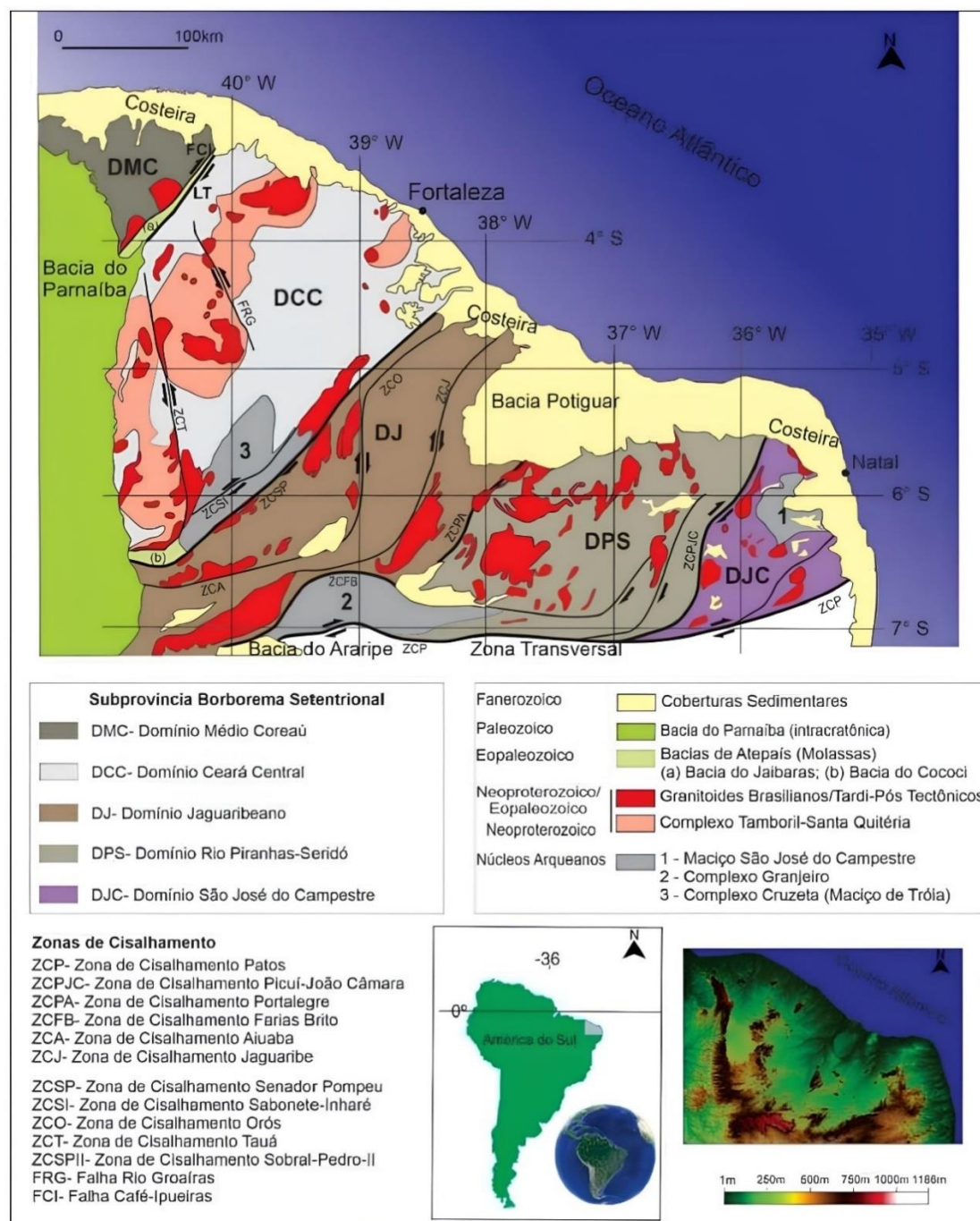
O Domínio Ceará Central constitui um dos principais compartimentos crustais da porção setentrional da Província Borborema, no Nordeste do Brasil. A evolução dessa província está relacionada aos processos de colagem continental que culminaram na formação do Gondwana Ocidental durante a Orogênese Brasileira–Pan-Africana, no Neoproterozoico tardio (650–540 Ma) (ALMEIDA et al., 2000; VAN SCHMUS et al., 2011). Na Subprovíncia Setentrional da Província Borborema, reconhece-se tradicionalmente a subdivisão em três grandes domínios tectônicos, o Domínio Médio Coreá, o Domínio Ceará Central e o Domínio Rio Grande do Norte. O Domínio Médio Coreá é limitado a sudeste pelo Lineamento Transbrasiliano, enquanto o Domínio Ceará Central está situado entre o Lineamento Transbrasiliano, a noroeste, e a Zona de Cisalhamento Senador Pompeu, a sudeste. Ao sul desta última estende-se o Domínio Rio Grande do Norte, limitado meridionalmente pelo Lineamento Patos e subdividido

nos subdomínios Jaguaribeano, Piranhas–Seridó e São José do Campestre, conforme proposto por Arthaud et al. (2008, 2015) e consolidado nos mapeamentos da CPRM (BRASIL, 2015).

Do ponto de vista estrutural, o Domínio Ceará Central corresponde a um segmento crustal alongado e intensamente deformado, cuja arquitetura é fortemente controlada por grandes zonas de cisalhamento transcorrentes de direção preferencial NE–SW (CASTRO, 2005; ARTHAUD et al., 2015). Essas estruturas atuam como descontinuidades crustais de primeira ordem, isto é, zonas de deformação de grande escala que atravessam extensas porções da crosta e condicionam a organização estrutural, a distribuição das unidades geológicas e a evolução tectônica do domínio (DANTAS et al., 2004). Destacam-se, nesse contexto, o Lineamento Sobral–Pedro II, ao norte, a Zona de Cisalhamento Senador Pompeu, ao sul, além de zonas associadas aos sistemas Orós–Jaguaribe e ao contato com o Domínio Médio Coreaú.

Essas zonas de cisalhamento desempenharam papel fundamental na compartimentação do embasamento, promovendo a subdivisão da crosta em blocos estruturalmente distintos e a justaposição de unidades litoestruturais de diferentes idades e origens (DANTAS et al., 2004). Além disso, controlaram a colocação e a acomodação de corpos magmáticos, a exumação diferencial de porções da crosta, isto é, o soerguimento e a erosão seletiva de determinados blocos, e a circulação de fluidos durante o metamorfismo, influenciando de forma significativa a evolução mineralógica e térmica das rochas (ARTHAUD et al., 2015). A atuação prolongada e recorrente dessas estruturas conferiu ao domínio uma história tectono-térmica complexa, com registros de reativação tanto no Neoproterozoico (1,0–0,54 Ga) quanto no Fanerozoico, desde 541 Ma (DANTAS et al., 2004; MOJZESZOWICZ, 2009).

**Figura 6:**Localização e Geologia Simplificada da Província Borborema



Fonte: Santos et al. (2022).

O embasamento cristalino do Domínio Ceará Central (DCC) é constituído predominantemente por complexos gnáissico-migmatíticos de idade paleoproterozoica, compreendida entre 2,5 e 1,6 Ga, com preservação local de núcleos arqueanos (ALMEIDA et al., 2000; VAN SCHMUS et al., 2011; DANTAS et al., 2004; ARTHAUD et al., 2015). Entre as porções mais antigas do domínio destaca-se o



Maciço Tróia–Pedra Branca, que apresenta idades U–Pb entre 2,86 e 2,68 Ga, correspondentes ao Arqueano tardio, sendo interpretado como fragmentos de crosta arqueana formados nos estágios iniciais da história da Terra e posteriormente incorporados ao arcabouço continental, onde foram intensamente retrabalhados por eventos tectono-metamórficos mais jovens (CASTRO, 2005).

A maior parte do embasamento paleoproterozoico é representada por unidades como o Complexo Madalena–Algodões–Choró, cujas idades U–Pb em zircão concentram-se em torno de 2,1 Ga. Essas rochas são compostas predominantemente por ortognaisses de composição tonalítica a quartzo-diorítica, localmente granodiorítica, frequentemente bandadas em decorrência da deformação dúctil e com evidências de migmatização, processo que reflete a fusão parcial da crosta sob condições de alta temperatura (CASTRO, 2005; DANTAS et al., 2004; ARTHAUD et al., 2015). Essas unidades são interpretadas como produtos de magmatismo juvenil paleoproterozoico, no qual novos magmas derivados diretamente do manto contribuíram para o crescimento da crosta continental por meio de processos de acreção continental (CASTRO, 2005).

Dados geoquímicos e isotópicos, em especial do sistema Sm–Nd, indicam que essas unidades paleoproterozoicas derivam majoritariamente de fontes mantélicas empobrecidas, compatíveis com a geração de crosta predominantemente juvenil, isto é, crosta recém-formada a partir de material do manto, com participação inicial limitada de crosta mais antiga. Observa-se, entretanto, contribuição subordinada de material crustal pré-existente, possivelmente de idade neoarqueana, entre 2,8 e 2,5 Ga, indicando que porções de crosta mais antiga foram parcialmente recicladas durante esses processos. Em conjunto, esses dados sugerem que a crosta paleoproterozoica do Domínio Ceará Central foi construída essencialmente por acreção magmática, com participação secundária de componentes crustais mais antigos (VAN SCHMUS et al., 2011; CASTRO, 2005).

Sobre esse embasamento desenvolveram-se extensas sequências supracrustaisneoproterozoicas, com idades entre 1,0 e 0,54 Ga, representadas principalmente pelo Grupo Ceará e pela Sequência Rio Curu–Itaia–Independência. Essas unidades são compostas por metapelitos, metassempelitos, metagreywackes, quartzitos, mármore, rochas cálcio-silicáticas, anfibolitos e rochas metavulcânicas máficas e félsicas, organizadas em grandes faixas contínuas no interior

do domínio (DANTAS et al., 2004; ARTHAUD et al., 2015). Dados geocronológicos indicam que a sedimentação e o vulcanismo associados tiveram início por volta de 0,77 Ga, durante o Neoproterozoico médio, em um contexto geodinâmico compatível com ambientes tectonicamente ativos. As assinaturas isotópicas sugerem que a principal área-fonte desses sedimentos correspondeu ao embasamento paleoproterozoico do próprio DCC, com contribuição adicional de material juvenil neoproterozoico (CASTRO, 2005).

Durante a Orogênese Brasiliana, entre 650 e 540 Ma, essas sequências supracrustais foram intensamente deformadas e metamorfizadas, desenvolvendo xistosidade penetrativa, tecidos gnáissicos bem definidos e migmatização local a regional (DANTAS et al., 2004; ARTHAUD et al., 2015). O metamorfismo atingiu predominantemente condições de fácies anfibolito, correspondentes a temperaturas e pressões típicas de níveis crustais médios, embora ocorram transições locais para condições de maior grau metamórfico em setores específicos (CASTRO, 2005).

No Neoproterozoico tardio, entre 650 e 540 Ma, o Domínio Ceará Central foi palco de volumosa atividade magmática associada ao desenvolvimento de um arco magmático continental, representado principalmente pelo Complexo Tamboril–Santa Quitéria, com idades U–Pb em zircão entre 620 e 600 Ma. Esse magmatismo é interpretado como resultado da subducção e colisão continental durante o clímax da Orogênese Brasiliana (CASTRO, 2005; ARTHAUD et al., 2015).

A estruturação tectônica neoproterozoica do Domínio Ceará Central é marcada pelo desenvolvimento de um sistema de nappes, caracterizado por grandes pacotes de rochas empurrados tectonicamente uns sobre os outros ao longo de superfícies de baixo ângulo, afetando o embasamento paleoproterozoico, as sequências supracrustais e os granitoides associados, refletindo um regime compressivo intenso durante a colisão continental (DANTAS et al., 2004; ARTHAUD et al., 2015). Idades obtidas em monazita, concentradas em torno de 0,60 Ga, são interpretadas como representativas do clímax térmico-deformacional regional (CASTRO, 2005).

Eventos deformacionais tardios, em torno de 0,56 Ga, estão associados ao desenvolvimento de zonas de cisalhamento dúcteis a rúptil-dúcteis, nas quais as rochas registram deformação sob temperaturas progressivamente mais baixas. Essas estruturas foram responsáveis pela compartimentação final do domínio e pela reativação

localizada de unidades mais antigas, com o resfriamento regional se consolidando por volta de 0,55 Ga (DANTAS et al., 2004; ARTHAUD et al., 2015; CASTRO, 2005).

Durante o Fanerozoico, desde 541 Ma, o Domínio Ceará Central foi novamente afetado por reativações tectônicas relacionadas à fragmentação do Gondwana e à abertura do Atlântico Equatorial. Estudos termocronológicos indicam a ocorrência de episódios de resfriamento acelerado e exumação do embasamento cristalino durante o Cretáceo, associados a pulsos de soerguimento tectônico e à reativação de estruturas brasileiras herdadas, em especial o Lineamento Sobral–Pedro II (DANTAS et al., 2004; ARTHAUD et al., 2015; MOJZESZOWICZ, 2009; AZEVEDO, 2023).

Eventos posteriores, a partir do Paleoceno, associam-se a novos pulsos de soerguimento crustal e à reorganização do relevo regional, culminando no desenvolvimento de extensas superfícies de aplainamento, como a Superfície Jaguaribe (PEULVAST; CLAUDINO SALES, 2004; CLAUDINO SALES; PEULVAST, 2007).

Dessa forma, o Domínio Ceará Central configura-se como um segmento crustal de evolução polifásica, no qual se sobrepõem registros arqueanos e paleoproterozoicos intensamente retrabalhados durante a Orogênese Brasileira, além de evidências claras de reativações fanerozoicas controladas por estruturas herdadas (DANTAS et al., 2004; ARTHAUD et al., 2015). Essa complexa história tectono-térmica justifica a seleção das amostras de monazita provenientes desse domínio e reforça sua relevância para estudos geocronológicos e termocronológicos voltados à compreensão dos processos de construção, retrabalhamento, resfriamento e exumação da crosta continental no Nordeste brasileiro.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Ao todo, foram analisadas oito amostras, sendo quatro provenientes do Brasil, duas da Austrália e duas do Japão, totalizando 372 grãos analisados. As amostras internacionais, identificadas neste trabalho como MJV-1 a MJV-4, correspondem às amostras HAR2019 (Harcourt), ELDORADO, NR24B e NY135A, provenientes da Austrália e do Japão, e foram cedidas pelo Dr. Sean Jones, da Universidade de Melbourne. Dentre essas amostras, apenas NR24B e NY135A possuem idades de traços de fissão em monazita (MFT) previamente publicadas (Jones et al., 2023), sendo, portanto, utilizadas neste estudo como referência de idade MFT, com o objetivo de comparar os protocolos analíticos e a equação de idade empregados.

As amostras brasileiras, identificadas como MNV-1 a MNV-4, correspondem às amostras NCC-05A, NCC-310, NCC-358A e NCC-126, as quais foram cedidas pelo Dr. Neivaldo Araújo de Castro. Para essas amostras não existem idades MFT publicadas, estando disponíveis apenas idades U–Pb, conforme reportado em Castro (2005). A Tabela 2 apresenta a correspondência entre as amostras analisadas, suas nomenclaturas originais conforme os trabalhos de referência e a quantidade de grãos analisados em cada caso.

**Tabela 2:** Amostras analisadas via FT em Monazita

| <b>Amostra</b> | <b>Nomenclatura Original</b> | <b>Número de Grãos</b> | <b>Trabalho de Referência</b>          |
|----------------|------------------------------|------------------------|----------------------------------------|
| <b>MJV-1</b>   | <b>HAR2019</b>               | <b>49</b>              | <b>Jones et al. (2019; 2021; 2022)</b> |
| <b>MJV-2</b>   | <b>ELDORADO</b>              | <b>34</b>              |                                        |
| <b>MJV-3</b>   | <b>NR24B</b>                 | <b>16</b>              |                                        |
| <b>MJV-4</b>   | <b>EY135A</b>                | <b>22</b>              | <b>Jones et al. (2023)</b>             |
| <b>MNV-1</b>   | <b>NCC-05A</b>               | <b>79</b>              | <b>Castro (2005)</b>                   |
| <b>MNV-2</b>   | <b>NCC-310</b>               | <b>23</b>              |                                        |
| <b>MNV-3</b>   | <b>NCC-358A</b>              | <b>73</b>              |                                        |
| <b>MNV-4</b>   | <b>NCC-126</b>               | <b>76</b>              |                                        |

### 3.1 Processamento e preparação das amostras

As amostras analisadas neste estudo foram processadas segundo os procedimentos convencionais descritos em Castro (2005) e Jones et al. (2019, 2023). A metodologia padronizada adotada pelo grupo TRACKs envolve as etapas de britagem, peneiramento e concentração gravitacional, por meio de bateia ou mesa vibratória, para a separação mineral inicial. Posteriormente, realiza-se a separação magnética utilizando o separador isodinâmico Frantz, seguida pela separação por densidade com o uso de bromofórmio, podendo-se empregar diodometano em casos específicos.

Os grãos selecionados são então montados em diferentes materiais, conforme o mineral-alvo: apatita e monazita são incluídas em resina epóxi, enquanto zircão é montado em Teflon PFA. Informações complementares sobre esse procedimento podem ser consultadas em Pereira (2022). Ressalta-se que o protocolo de separação mineral aplicado à monazita é similar àquele utilizado para apatita e zircão, diferenciando-se principalmente pela amperagem aplicada durante a separação magnética, conforme especificado em Castro (2005).

Concluída a etapa de separação mineral, as monazitas foram montadas em resina epóxi transparente, polidas e submetidas ao ataque químico. A montagem em resina tem como objetivo garantir a estabilidade dos grãos durante as etapas subsequentes de preparação. O lixamento é realizado com a finalidade de expor seções transversais dos minerais, possibilitando a visualização dos traços de fissão localizados no interior dos cristais. Em seguida, o polimento busca otimizar a passagem de luz, favorecendo a observação em microscopia óptica.

O processo de lixamento foi conduzido em duas etapas: inicialmente, com lixa de granulação 2400, aplicada manualmente por 4 minutos; posteriormente, com lixa de granulação 4000, durante 6 minutos, a 60 rpm, utilizando politriz modelo Aropol-VV. Ressalta-se que essa etapa demanda extrema cautela, dado o elevado risco de perda de grãos de monazita. Finalizado o lixamento, a amostra foi submetida ao polimento com pasta de diamante de granulometria 1 e  $\frac{1}{4}$   $\mu\text{m}$ , por 4 e 6 minutos, respectivamente, sendo então encaminhada para o ataque químico.

O ataque químico tem como finalidade aumentar a espessura dos traços de fissão, tornando-os visíveis em microscopia óptica. Esse processo baseia-se na maior

reatividade do agente corrosivo, um ácido, no caso da monazita, com as imperfeições da estrutura cristalina, correspondentes aos traços de fissão.

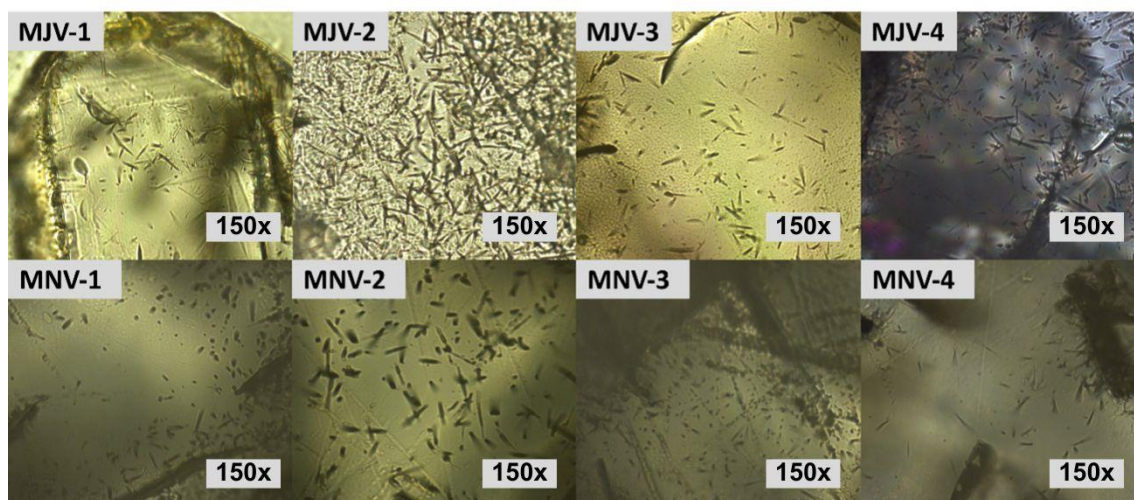
O protocolo de ataque químico adotado neste trabalho segue o procedimento descrito por Jones et al. (2019), já validado em estudos subsequentes (JONES et al., 2023; JEPSON et al., 2025). Nesse método, as amostras de monazita são submetidas a uma solução de HCl 6M, a 90 °C, em um processo denominado “step-etch”, no qual as amostras são retiradas da solução em intervalos regulares, neste caso, a cada 15 minutos, e inspecionadas em microscópio óptico, com o objetivo de identificar o ponto ideal de revelação dos traços, assegurando simultaneamente a integridade dos grãos.

Neste trabalho, foi desenvolvida uma curva de ataque baseada na relação entre densidade de traços revelados e tempo de exposição. Essa curva foi elaborada com o propósito de comparação com os resultados obtidos por Jones et al. (2019), sendo aplicada às amostras brasileiras MNV-1 e MNV-2. Para cada uma delas, foram analisados 15 grãos, e a densidade média de traços revelados serviu como base para a construção da curva.

A contagem dos traços de fissão espontânea foi realizada com o objetivo de determinar a densidade de traços ( $\rho_s$ ). Para isso, foram selecionados campos de contagem distribuídos aleatoriamente na região central de cada grão analisado, de modo a minimizar efeitos de borda e possíveis heterogeneidades texturais. As contagens foram efetuadas por observação direta em microscópio óptico, seguindo critérios estabelecidos para a identificação de traços devidamente revelados.

A densidade de traços constitui o parâmetro fundamental para o cálculo da idade por traços de fissão, uma vez que é proporcional ao número de eventos de fissão espontânea acumulados ao longo do tempo no mineral. A densidade de traços foi obtida por contagem direta em microscópio óptico, sob ampliação de 150 $\times$  (Figura 7). Assim, assumidas condições adequadas de revelação, preservação e ausência de perda significativa de traços por annealing, a densidade registrada reflete a idade determinada pela metodologia de traços de fissão, bem como a evolução térmica experimentada pela amostra.

**Figura 7:** Micrografias ópticas obtidas sob ampliação de 150× de grãos das amostras analisadas, utilizadas na determinação da densidade de traços de fissão pelo método semiempírico.



**Fonte:**Elaborado pelo autor

O comprimento dos traços foi medido em traços de fissão confinados, paralelos à superfície de observação. Essa análise fornece dados essenciais para a modelagem e interpretação da evolução térmica da área de estudo. As distribuições de comprimento dos traços de fissão espontânea confinados em monazita podem refletir a história térmica da região de origem da amostra.

Traços mais antigos submetidos a longos períodos em temperaturas elevadas tendem a apresentar maior encurtamento em relação àqueles mais recentes, formados em condições térmicas menos intensas. Como os traços de fissão se acumulam continuamente ao longo da história geológica, a distribuição de seus comprimentos pode revelar o histórico térmico ao qual o mineral foi submetido.

### **3.2 Obtenção do conteúdo de U, datação via FT e modelagem dos dados**

Inicialmente, foram conduzidas análises químicas dos grãos de monazita por microsonda eletrônica (EPMA), realizadas na Universidade de Brasília (UnB). Essa técnica, amplamente empregada na caracterização química de minerais acessórios, baseia-se na emissão de raios X gerados por um feixe de elétrons focalizado, permitindo a quantificação precisa e localizada de elementos em microvolumes (MONTEL et al., 1996).

A EPMA mostrou-se particularmente eficaz na análise de monazitas, apresentando vantagens em relação ao LA-ICP-MS, como menor custo operacional,

tempo reduzido de análise e preservação da integridade dos grãos, por se tratar de uma técnica não destrutiva. Além disso, possibilitou a análise de regiões específicas dos cristais, minimizando interferências decorrentes de zonamentos composicionais, frequentemente observados nesse mineral.

A caracterização química incluiu a determinação dos teores de  $\text{UO}_2$ ,  $\text{ThO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Y}_2\text{O}_3$ . A associação entre composição química e morfologia dos grãos, viabilizada pela EPMA, revelou-se fundamental para a interpretação geocronológica e termocronológica dos dados, contribuindo para uma avaliação mais consistente dos parâmetros utilizados em modelos térmicos (MONTEL et al., 1996).

Entre os parâmetros investigados, o conteúdo de  $\text{SiO}_2$  recebeu atenção especial. À luz dos resultados apresentados por Jones et al. (2023), foi avaliada a possível influência do Si no comportamento do annealing dos traços de fissão em monazita. Esses autores demonstraram que concentrações mais elevadas de Si estão associadas a uma maior resistência ao processo de annealing, indicando que variações composicionais exercem um controle significativo sobre a cinética de recuperação dos traços.

As idades MFT foram calculadas, incorporando as estimativas de incerteza conforme a equação (9), ambas apresentadas na Seção 2.1.3 deste trabalho. O tratamento estatístico inicial dos dados foi realizado com o auxílio dos softwares Radialplotter (GALBRAITH, 1990; VERMEESCH, 2009) e Isoplot (LUDWIG, 2009).

O Radialplotter (VERMEESCH, 2009) foi utilizado para a construção de parcelas radiais, permitindo a identificação de possíveis populações de idades a partir de uma modelagem estatística poissoniana. Essa representação gráfica possibilitou a visualização de agrupamentos e a avaliação preliminar da dispersão das idades individuais, embora o software não realize reduções ou interpretações estatísticas diretas dos dados.

De forma complementar, o Isoplot (LUDWIG, 2009) foi empregado na construção de histogramas de frequência e distribuições gaussianas cumulativas. Essa abordagem permitiu uma avaliação mais robusta da dispersão das idades individuais, assumindo independência estatística entre os grãos, e auxiliou na identificação de possíveis heterogeneidades termocronológicas dentro das amostras analisadas.



Com o objetivo de investigar a influência da composição química sobre as idades MFT, foram construídos gráficos de dispersão relacionando Idade MFT versus  $\text{SiO}_2$ , Idade MFT versus  $\text{UO}_2$ , Idade MFT versus  $\text{ThO}_2$  e Idade MFT versus  $\text{Y}_2\text{O}_3$ . Esses gráficos permitiram avaliar a existência de correlações positivas ou negativas entre a composição dos grãos e as idades obtidas, testando a hipótese de que variações composicionais possam afetar o sistema MFT.

Essas possíveis influências foram interpretadas à luz de dois mecanismos principais: (i) o acúmulo de dano de radiação alfa, predominantemente associado ao decaimento de U e Th, e (ii) substituições químicas na estrutura cristalina da monazita, que podem alterar a estabilidade dos traços e a cinética de annealing. A análise conjunta desses fatores permitiu uma avaliação do papel da composição química na variabilidade das idades MFT.

Por fim, a interpretação da evolução térmica do Domínio Ceará Central foi realizada por meio da modelagem de histórias térmicas tempo–temperatura (T–t), utilizando o software QtQt, uma ferramenta bayesiana amplamente empregada na reconstrução de trajetórias térmicas a partir de dados termocronológicos (GALLAGHER, 2012). A modelagem adotou o modelo de annealing fanning proposto por Jones (2021) para a construção das curvas de annealing dos traços de fissão em monazita, permitindo a incorporação de parâmetros cinéticos específicos desse sistema mineral. O uso desse modelo possibilitou uma representação probabilística consistente da evolução térmica regional, com integração estatisticamente robusta de múltiplos sistemas de baixa temperatura e a obtenção de intervalos de confiança para os modelos térmicos gerados.

Na elaboração dos modelos térmicos, além das idades de traços de fissão em monazita (MFT) determinadas neste trabalho, foram incorporadas idades previamente publicadas para a região, obtidas por outros métodos termocronológicos, incluindo (U–Th)/He em apatita e traços de fissão em apatita e zircão. A seleção desses dados baseou-se em critérios de qualidade analítica, representatividade espacial das amostras e compatibilidade geológica com as áreas investigadas.

A abordagem metodológica adotada segue a estratégia aplicada por Jepson et al. (2025), que utilizaram o QtQt para modelar histórias térmicas do Complexo Catalina, no estado do Arizona (EUA), integrando dados MFT a outros sistemas

termocronológicos em contextos geológicos complexos. Neste trabalho, a aplicação conjunta dos dados MFT e das idades disponíveis para o Domínio Ceará Central permitiu avaliar padrões coerentes de resfriamento e interpretar possíveis eventos de soerguimento, erosão e denudação ocorridos durante o Neógeno e o Quaternário.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Curva de ataque químico

O primeiro procedimento metodológico realizado consistiu na elaboração de uma curva de ataque químico para as amostras MNV-1 (NCC-05A) e MNV-2 (NCC-310), ambas de proveniência brasileira. Para isso, 15 grãos de cada amostra foram submetidos ao protocolo proposto por Jones et al. (2019), o qual utiliza uma solução de HCl 6M aquecida a 90 °C. A densidade superficial dos traços foi medida em intervalos de 15 minutos, permitindo acompanhar a progressão do ataque químico.

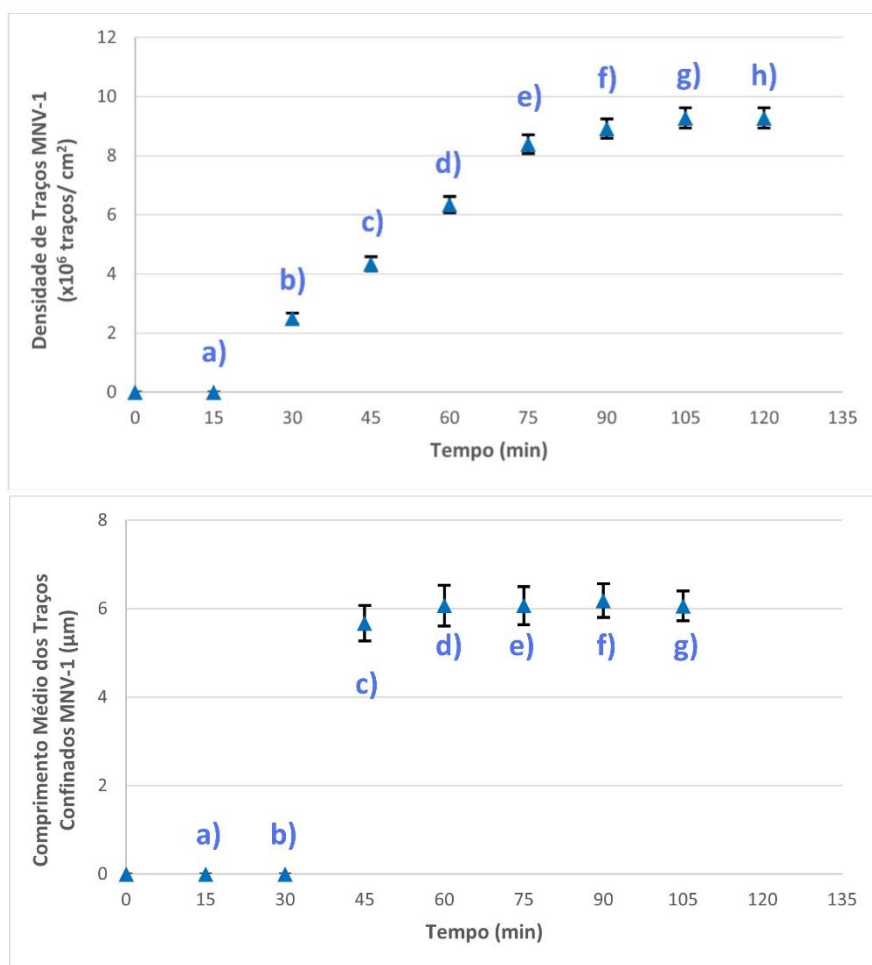
Como resultado, foi gerada uma curva específica para cada amostra (Figura 8), relacionando a densidade média dos traços revelados ao tempo de ataque. O objetivo dessa etapa foi avaliar a eficiência e a taxa de revelação dos traços em cada amostra, além de identificar o ponto ótimo de ataque, aquele em que os traços são completamente revelados, mas a integridade física do grão ainda é preservada.

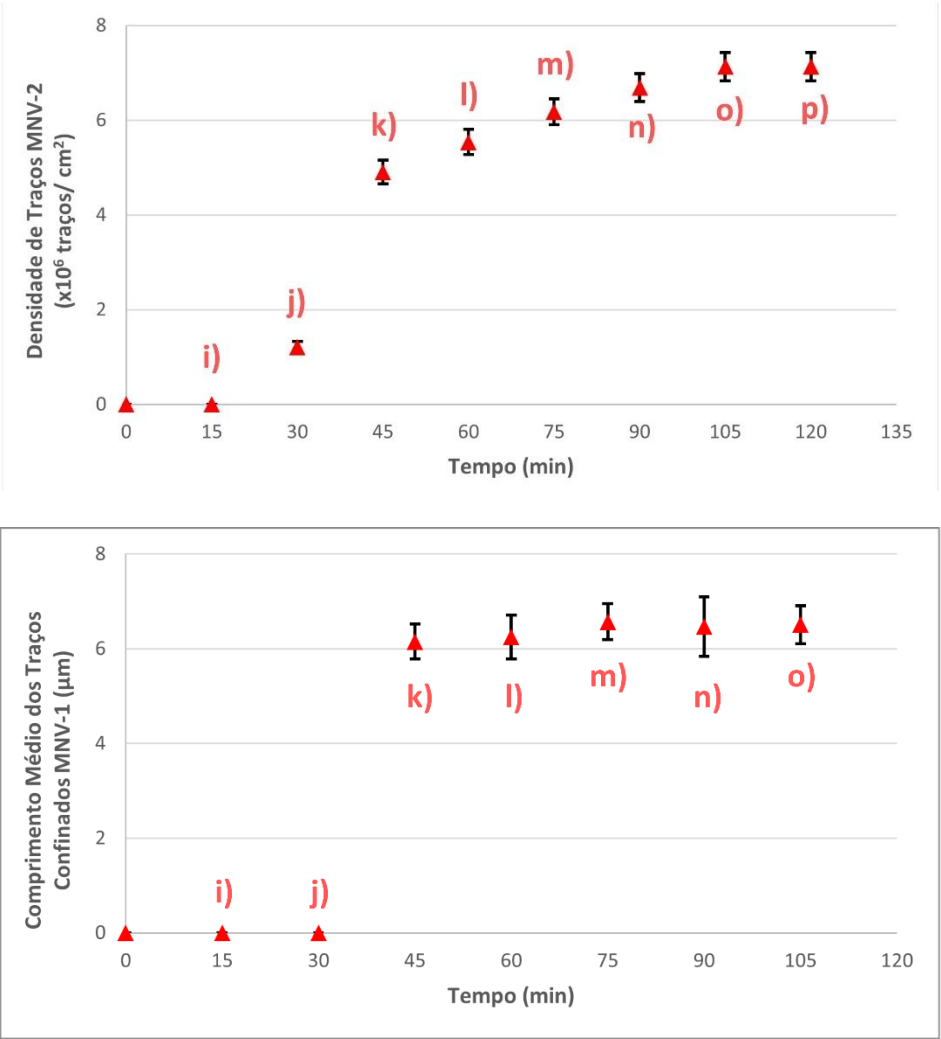
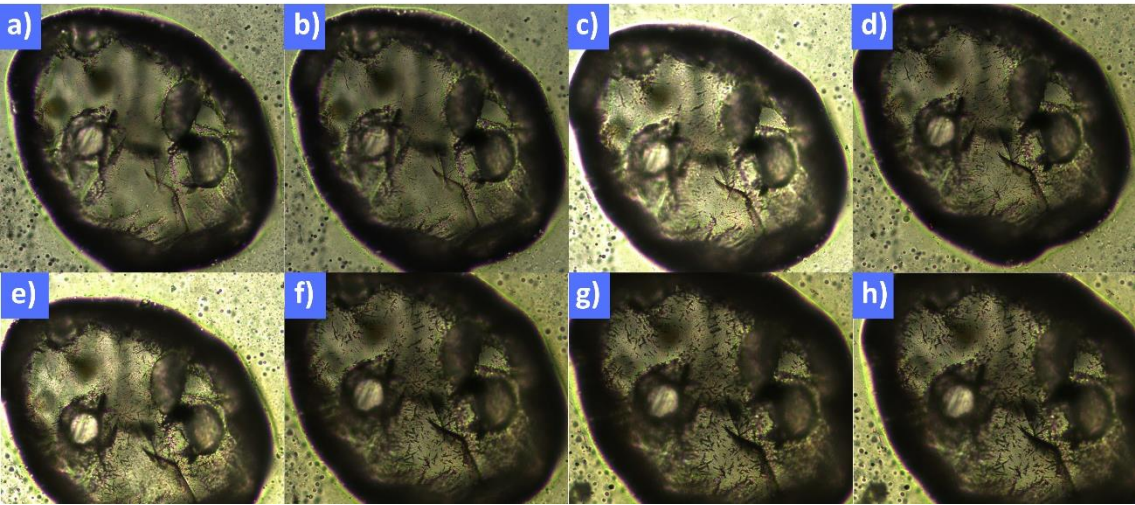
Ao comparar especificamente as curvas de ataque químico das amostras MNV-1 e MNV-2, observa-se que a revelação dos traços de fissão ocorre de forma relativamente gradual em ambas. Na amostra MNV-1, os traços tornam-se significativamente visíveis apenas após cerca de 75 min de ataque, atingindo um ponto ótimo de revelação por volta de 105 min. A amostra MNV-2 apresenta comportamento semelhante, com variações sutis no tempo necessário para alcançar a condição ideal de revelação. Adicionalmente, ao analisar as curvas de comprimento médio dos traços confinados em função do tempo de ataque químico, observa-se o estabelecimento de um platô entre aproximadamente 45 e 75 minutos, indicando que, a partir desse intervalo, não há aumento significativo nos comprimentos medidos.

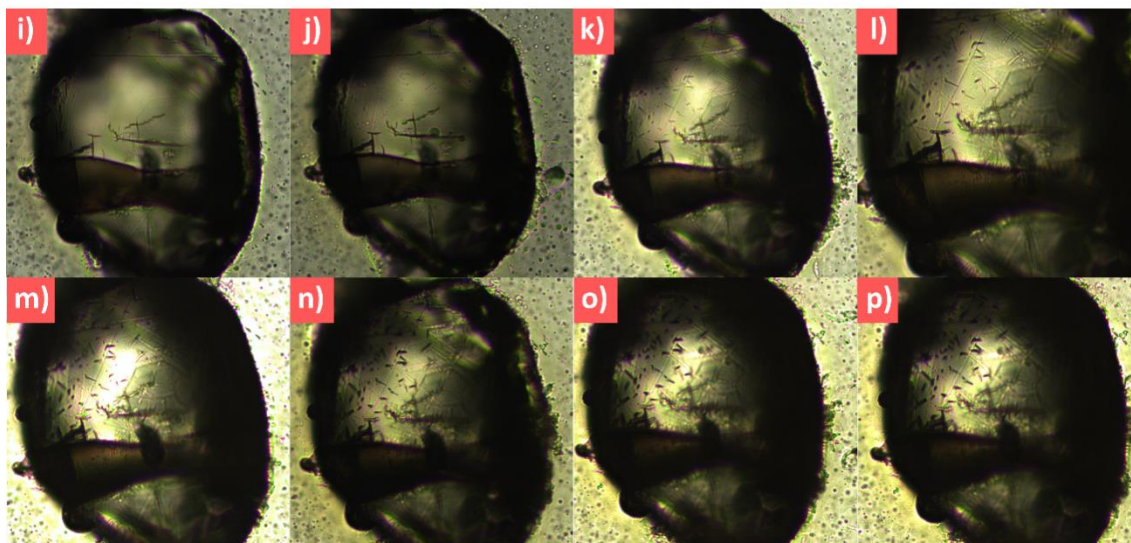
Esse padrão é compatível com os resultados apresentados por Jones et al. (2022), que indicam que, após aproximadamente 60 a 90 min de ataque, os traços superficiais passam a ser revelados de forma mais homogênea, independentemente do azimute em relação ao eixo cristalográfico *c*. Esse comportamento é interpretado como uma redução da anisotropia do ataque químico, indicando que, a partir desse intervalo, o reagente passa a atuar de maneira mais uniforme sobre a rede cristalina, favorecendo uma revelação mais equilibrada dos traços de fissão.

Adicionalmente, essa homogeneização observada pode não refletir necessariamente uma atuação anisotrópica do reagente na rede cristalina, mas sim a diminuição do contraste entre a dissolução da matriz e a dos traços ao longo do tempo de ataque. Enquanto a matriz tende a apresentar baixa dependência com a orientação cristalográfica, a revelação dos traços permanece sensível à sua orientação em relação ao eixo c. Com o avanço do ataque, a progressiva remoção da superfície reduz essas diferenças, resultando em uma aparência mais homogênea na distribuição dos traços revelados.

**Figura 8:** Curvas de ataque químico relacionando a densidade média de traços de fissão e o comprimento médio dos traços confinados em função do tempo de ataque para as amostras MNV-1 e MNV-2. Os pontos representados por triângulos indicam os tempos em que foram realizadas as medições das densidades superficiais e dos comprimentos dos traços nos grãos. Triângulos azuis correspondem à amostra MNV-1, enquanto os vermelhos referem-se à amostra MNV-2. Para cada ponto de ataque representado, foi obtida uma micrografia óptica, exibida nas subfiguras identificadas pelas letras a) até p).







Fonte:Elaborado pelo autor

Quando comparados aos dados apresentados por Jones et al. (2019), observa-se uma diferença relevante nos tempos de revelação dos traços. Enquanto, neste trabalho, as curvas das amostras brasileiras atingem densidades próximas do ideal apenas após cerca de 75 min, com ponto ótimo em torno de 105 min, no estudo de Jones et al. (2019) os traços já se encontravam amplamente revelados em aproximadamente 60 min, atingindo o ponto ótimo por volta de 90 min (Figura 5).

Essa discrepância pode ser interpretada a partir do grau de dano acumulado na rede cristalina da monazita. Conforme discutido por Nakajima et al. (2024), o nível de destruição estrutural induzido por radiação alfa depende diretamente das concentrações de U e Th, bem como da história térmica do mineral, que controla a eficiência dos processos naturais de annealing. Além disso, deve-se considerar a ocorrência do fenômeno de radiation-assisted annealing, no qual os processos de dano radiogênico e recuperação estrutural ocorrem simultaneamente e de forma interdependente, conforme proposto por Jones et al. (2023), tornando a resposta do mineral ao ataque químico mais complexa.

A análise dos dados de composição química obtidos por EPMA, expressos em wt%, apresentados nas Tabelas B1 e B2 do Apêndice B, fornece elementos adicionais para a interpretação das diferenças observadas nas curvas de ataque. A amostra MJV-1 (Harcourt), utilizada por Jones et al. (2019) para a construção da curva de ataque, apresenta conteúdo médio de  $\text{UO}_2$  de 0,014 wt%. Em contraste, as amostras MNV-1

(NCC-05A) e MNV-2 (NCC-310), analisadas neste trabalho, apresentam concentrações médias significativamente mais elevadas de  $\text{UO}_2$ , da ordem de 0,230 e 0,158 wt%, respectivamente. À primeira vista, esses valores sugeririam que as amostras brasileiras deveriam atingir o ponto ótimo de ataque em tempos menores, em oposição ao observado experimentalmente.

Entretanto, ao considerar os conteúdos médios de  $\text{ThO}_2$ , observa-se um comportamento distinto. As amostras MJV-1, MNV-1 e MNV-2 apresentam concentrações médias de  $\text{ThO}_2$  de 5,644, 4,468 e 4,118 wt%, respectivamente, indicando que a amostra australiana possui maior teor de tório em relação às amostras brasileiras. Embora a cadeia de decaimento do  $\text{Th-232}$  seja mais curta que a do  $\text{U-238}$ , os conteúdos de Th na monazita são tipicamente mais elevados do que os de U, de modo que o tório pode contribuir de forma significativa para a acumulação de dano alfa no mineral. Nesse contexto, o maior teor de  $\text{ThO}_2$  na amostra australiana pode estar associado a um grau mais elevado de dano radiogênico da rede cristalina, favorecendo uma resposta mais rápida ao ataque químico e contribuindo para que sua curva de ataque atinja o ponto ótimo em torno de 90 min, enquanto as amostras brasileiras requerem tempos mais longos, da ordem de 105 a 120 min, apesar de apresentarem maiores teores de  $\text{UO}_2$ .

Contudo, essa interpretação deve ser considerada como uma hipótese, uma vez que a relação entre composição química e cinética de ataque químico pode ser influenciada por outros fatores. Em particular, processos de annealing sensíveis a baixas temperaturas podem promover a recuperação parcial de defeitos na rede cristalina ao longo do tempo geológico, reduzindo o grau efetivo de dano acumulado independentemente do conteúdo total de elementos radioativos. Dessa forma, o estado estrutural atual do mineral pode não refletir diretamente sua história de irradiação.

Nesse sentido, análises complementares da estrutura cristalina mostram-se relevantes para uma avaliação mais robusta dessa hipótese. Técnicas como a difração de raios X podem ser empregadas para investigar variações nos parâmetros da cela unitária e na organização estrutural da monazita, enquanto medidas por espectroscopia Raman, preferencialmente realizadas de forma comparativa em amostras naturais e após tratamentos de annealing controlado, podem fornecer evidências mais diretas sobre modificações na estrutura local associadas ao dano por radiação. Tais abordagens

permitiriam discriminar, de forma mais consistente, os efeitos estruturais acumulados daqueles associados a variações composicionais ou estequiométricas no controle da resposta ao ataque químico.

Outro fator potencialmente relevante diz respeito à natureza dos traços analisados. No estudo de Jones et al. (2019), as curvas de ataque foram obtidas a partir de traços induzidos por fissão de  $^{252}\text{Cf}$ , enquanto, no presente trabalho, a análise concentrou-se em traços fósseis. Traços fósseis e induzidos diferem não apenas em sua origem, mas também no estado termodinâmico e estrutural da rede cristalina na qual estão inseridos. Traços fósseis resultam de eventos de fissão espontânea acumulados ao longo de escalas de tempo geológicas e encontram-se inseridos em uma rede cristalina que pode ter experimentado episódios prolongados de annealing térmico, levando à parcial recuperação estrutural, relaxação de defeitos e maior estabilidade termodinâmica.

Em contraste, traços induzidos por  $^{252}\text{Cf}$  são formados de maneira praticamente instantânea. Esses traços são caracterizados por zonas de dano estrutural mais recentes, com maior densidade de defeitos pontuais e desordem local, que ainda não foram submetidas a processos significativos de recuperação. Como consequência, essas regiões apresentam maior reatividade química, podendo resultar em taxas de ataque químico mais elevadas e em tempos menores para atingir a revelação ideal.

Apesar dessas diferenças, neste trabalho foram analisadas as mesmas amostras utilizadas por Jones et al. (2019), agora considerando traços fósseis. Embora essas amostras não tenham sido incorporadas à construção da curva de ataque por limitações de tempo, verificou-se que, após 90 min de ataque, a revelação dos traços já era satisfatória, em concordância com os resultados anteriormente publicados. Esses resultados indicam que, para o conjunto de amostras analisadas neste estudo, o efeito da natureza dos traços, fósseis ou induzidos, é secundário quando comparado ao controle exercido pelo grau total de dano radiogênico e pela composição química da monazita, sem excluir, contudo, a possibilidade de que esse efeito se torne mais significativo em outros contextos composicionais ou térmicos.

Por fim, os resultados indicam que o tempo ótimo de ataque químico em monazita não deve ser tratado como um parâmetro fixo, mas como uma variável dependente da composição química, do grau de dano radiogênico acumulado e da



história térmica do mineral. Nesse contexto, a adoção de uma metodologia do tipo “step etch”, com incrementos sucessivos de ataque, por exemplo intervalos de 15 min ou menores, mostra-se mais adequada do que a definição prévia de um tempo fixo de ataque. Essa abordagem é particularmente relevante considerando que diferentes amostras, e mesmo diferentes grãos dentro de uma mesma amostra, podem atingir o ponto ótimo de revelação em tempos significativamente menores, da ordem de 60 min ou menos, ou maiores, ultrapassando 120 min.

Adicionalmente, a elevada variabilidade nas concentrações de U e Th entre grãos individuais representa um desafio para a definição de um único tempo ótimo de ataque. Tempos excessivamente longos podem resultar na destruição de grãos com alto conteúdo radioativo, enquanto tempos muito curtos podem levar à revelação incompleta dos traços em grãos pobres em U e Th. Dessa forma, recomenda-se a realização de mais de uma montagem da mesma amostra, de modo a mitigar os efeitos da heterogeneidade composicional e aumentar a robustez na determinação do ponto ótimo de ataque químico.

## **4.2 Idades MFT**

Os resultados de idades MFT são apresentados separadamente para amostras de referência (Austrália e Japão) e para amostras do Domínio Ceará Central. Essa organização permite, inicialmente, avaliar a consistência do método e das equações de idade empregadas a partir de amostras com idades previamente estabelecidas e, em seguida, aplicar a metodologia a um contexto geológico de interesse, no qual as idades obtidas fornecem novas restrições à evolução térmica regional. As idades foram calculadas utilizando as equações propostas por Dias et al. (2017) e Donelick et al. (2005). Os resultados de EPMA encontram-se no Apêndice B, enquanto o Apêndice C reúne os parâmetros utilizados no cálculo das idades, incluindo os conteúdos de U, as densidades de traços, as idades obtidas e o valor de zeta adotado. O fator zeta foi calculado utilizando a apatita Durango como padrão de idade, já empregada em estudos anteriores de MFT, sendo o valor obtido também apresentado no Apêndice C.

Os conteúdos de U apresentados no Apêndice C foram obtidos em ppm a partir da normalização do conteúdo de  $\text{UO}_2$ , considerando a estequiometria mineral com base

nos teores de P e, quando aplicável, Si. A determinação do conteúdo de U é um parâmetro fundamental para o cálculo das idades por traços de fissão em monazita (MFT), uma vez que está diretamente relacionada à produção de traços de fissão no mineral.

#### **4.2.1 Amostras de Referência**

São apresentados os resultados da aplicação da técnica MFT, em quatro amostras (Tabela 3 e Figura 9), com o objetivo de implementar no Grupo TRACKs o protocolo de datação por MFT. Duas dessas amostras, provenientes do Japão, NR24B e EY135A, já possuíam idades previamente publicadas (JONES et al., 2023). Os resultados obtidos neste estudo mostraram-se concordantes com os dados reportados na literatura, indicando consistência metodológica.

As outras duas amostras, provenientes da Austrália, HAR2019 e ELDORADO, foram utilizadas por Jones et al. (2019, 2021, 2022) em estudos relacionados a ataque químico e processos de annealing, porém não apresentavam idades publicadas. Para a amostra HAR2019, foi obtida, por meio de comunicação pessoal com Andrew Gleadow, líder do grupo de Jones na Universidade de Melbourne, Austrália, uma idade determinada em 2003, a qual não foi publicada. Para a amostra ELDORADO, não havia quaisquer informações prévias de idade. Os resultados obtidos neste trabalho para ambas as amostras mostraram-se consistentes com as informações disponíveis, reforçando a confiabilidade da metodologia aplicada.

Além do apresentado na Tabela 3, detalhes analíticos completos da análise EPMA e datação MFT podem ser obtidos nos apêndices B e C respectivamente.

**Tabela 3:** Idades MFT para as amostras internacionais.

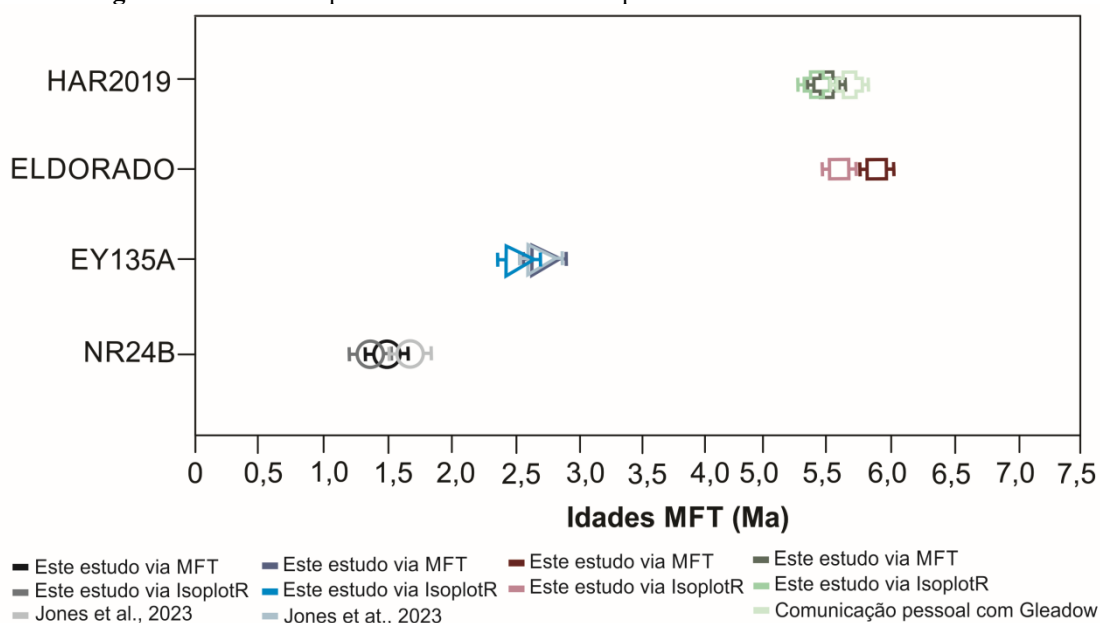
| Amostras        | U<br>(ppm) | n  | Ns   | $\rho_s$<br>( $\times 10^6$ )<br>(traços/cm <sup>2</sup> ) | Idades MTF (Ma)                   |                                                 |                                        |
|-----------------|------------|----|------|------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------|
|                 |            |    |      |                                                            | Idade<br>Central*<br>$\pm \sigma$ | Idade<br>Central<br>Isoplot<br>R** $\pm \sigma$ | Idade de<br>Referência<br>$\pm \sigma$ |
| <b>HAR2019</b>  | 121        | 49 | 668  | 2,098                                                      | 5,63 $\pm$ 0,92                   | 7,09 $\pm$ 0,74                                 | 5,53 $\pm$ 0,41 <sup>1</sup>           |
| <b>ELDORADO</b> | 197        | 34 | 731  | 3,547                                                      | 5,98 $\pm$ 0,79                   | 5,66 $\pm$ 0,41                                 | -                                      |
| <b>EY135A</b>   | 929        | 22 | 1083 | 7,117                                                      | 2,72 $\pm$ 0,20                   | 2,55 $\pm$ 0,37                                 | 2,72 $\pm$ 0,16 <sup>2</sup>           |
| <b>NR24A</b>    | 1237       | 16 | 584  | 5,411                                                      | 1,48 $\pm$ 0,13                   | 1,36 $\pm$ 0,13                                 | 1,71 $\pm$ 0,13 <sup>3</sup>           |

U, concentração de <sup>238</sup>U obtido via LA-ICP-MS; n, número de grãos analisados; Ns, número de traços contados;  $\rho_s$ , densidade superficial de traços; \*Idade Central via MFT; \*\* Idade Central via IsoplotR (Vermesch, 2018); <sup>1</sup> Comunicação pessoal com Andrew Gleadow; <sup>2,3</sup> Jones et al., 2023.

Para as amostras NR24B e EY135A, as idades centrais obtidas foram de 1,48  $\pm$  0,13 Ma e 2,72  $\pm$  0,20 Ma, respectivamente, valores consistentes, dentro do intervalo de 2 $\sigma$ , com as idades publicadas de 1,71  $\pm$  0,13 Ma e 2,72  $\pm$  0,16 Ma (JONES et al., 2023). Para as amostras australianas HAR2019 e ELDORADO, as idades determinadas foram de 5,63  $\pm$  0,92 Ma e 5,98  $\pm$  0,79 Ma, respectivamente. Ressalta-se que, para a amostra ELDORADO, estavam disponíveis apenas dados relacionados ao ataque químico e ao comprimento médio de traços, MTL, utilizados em estudos de annealing, sem informações prévias de idade. Para a amostra HAR2019, a idade previamente determinada foi de 5,53  $\pm$  0,41 Ma, conforme informações fornecidas pela Universidade de Melbourne.

De forma objetiva, os resultados obtidos evidenciam que a técnica MFT apresenta elevada reprodutibilidade metodológica dentro do escopo do protocolo adotado, com todas as idades determinadas em concordância com as idades de referência publicadas ou previamente determinadas por outras abordagens. As incertezas foram calculadas de acordo com a calibração proposta por Dias et al. (2017). A Figura 9 apresenta a comparação entre as idades obtidas neste trabalho por meio da técnica MFT, os resultados processados no software IsoplotR (VERMEESCH, 2018) e as idades de referência.

**Figura 9:** Análise comparativa das idades obtidas para cada amostra datadas via MFT.



**Fonte:**Elaborado pelo autor

A análise dos resultados apresentados na Tabela 3 indica que os erros associados às idades centrais tendem a ser superiores àqueles observados nas amostras de referência. Esse comportamento pode ser influenciado por diferentes fatores, entre eles o número de grãos utilizados na determinação das idades centrais, o que limita comparações diretas baseadas exclusivamente nesse parâmetro. A incerteza final associada às idades centrais permanece sensível à estatística do conjunto de dados analisado. Dessa forma, para uma avaliação mais adequada da precisão analítica, torna-se mais apropriado considerar os erros individuais das idades dos grãos e, consequentemente, o erro médio associado.

Com base nos erros apresentados na Tabela C1 (Apêndice C), foram calculados erros médios para as idades dos grãos das amostras NR24B e EY135A de  $\pm 0,13$  Ma e  $\pm 0,20$  Ma, respectivamente. Para essas mesmas amostras, os dados suplementares disponibilizados por Jones et al. (2023) indicam erros médios de  $\pm 0,18$  Ma e  $\pm 0,25$  Ma. Essa diferença sugere que, para o conjunto de dados analisado, a equação de idade proposta por Dias et al. (2017) resulta em incertezas ligeiramente menores quando comparada à equação de Hasebe et al. (2004), adaptada para monazita, embora tais valores também reflitam a influência dos procedimentos analíticos adotados e das características do conjunto amostral considerado.

Com o intuito de validar a MFT como uma técnica adequada para a qualificação e quantificação de eventos em condições de ultra-baixa temperatura, a metodologia foi aplicada a amostras do Domínio Ceará Central. Os resultados correspondentes são apresentados na Seção 4.2.2.

#### **4.2.2 Domínio Ceará Central**

São apresentados os resultados obtidos para quatro amostras de monazita selecionadas no Domínio Ceará Central (Tabela 4 e Figura 10). Na Tabela 4 são reportadas as idades centrais determinadas para cada amostra, bem como os principais picos de idade identificados a partir das distribuições Kernel Density Estimation (KDE), conforme ilustrado nos respectivos gráficos. Os detalhes analíticos completos encontram-se descritos nos Apêndices B e C.

A amostra NCC05A apresenta idades distribuídas entre 2,32 e 10,85 Ma, com idade central de  $5,11 \pm 0,92$  Ma. A amostra NCC126 apresenta idades variando entre 2,10 e 10,46 Ma, com idade central de  $3,57 \pm 0,46$  Ma. Para a amostra NCC310, as idades variam entre 2,41 e 12,15 Ma, com idade central de  $6,73 \pm 0,77$  Ma. Por fim, a amostra NCC358A apresenta idades entre 2,45 e 9,99 Ma, com idade central de  $4,57 \pm 0,51$  Ma.

Embora as idades centrais sejam apresentadas como um parâmetro estatístico representativo, a interpretação geológica dos resultados deve considerar, de forma prioritária, a distribuição completa das idades individuais.

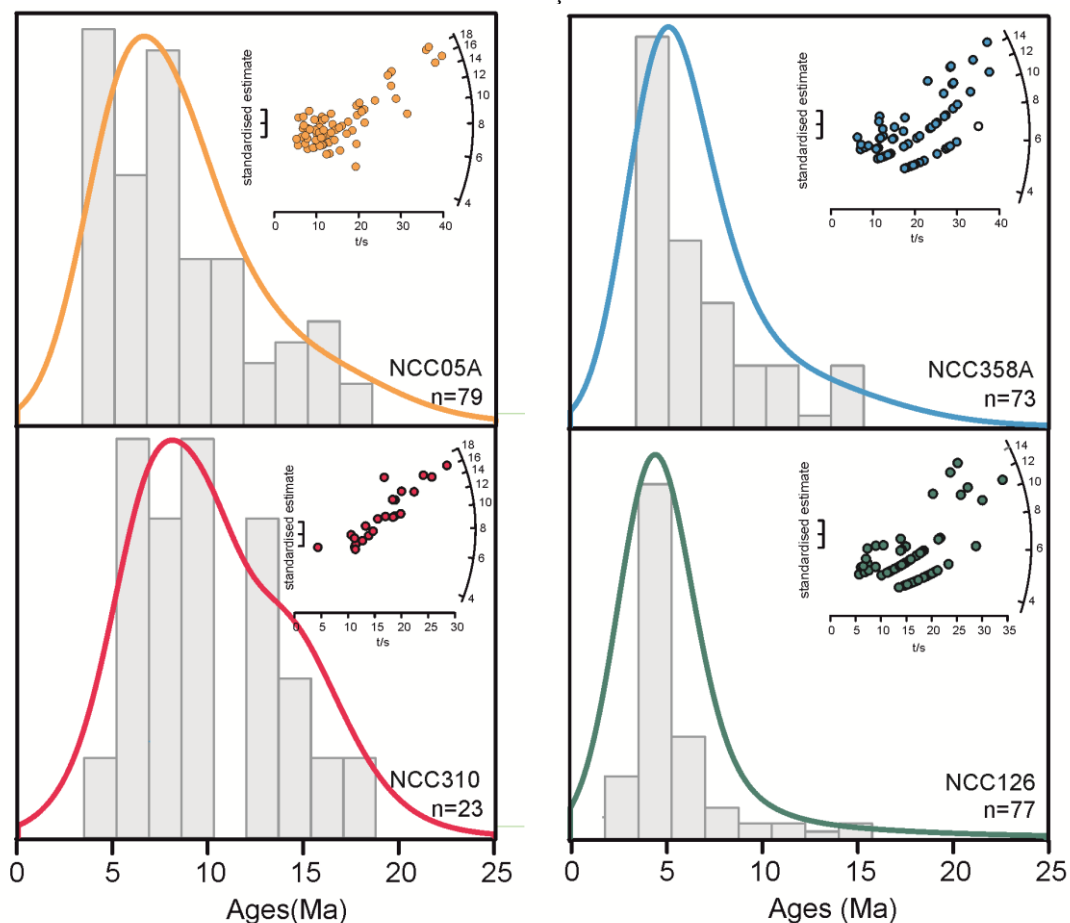
**Tabela 4:**Idades MFT para as amostras nacionais.

| Amostras       | U<br>(ppm) | n  | Ns   | ps( $\times 10^7$ )<br>(traços/cm <sup>2</sup> ) | Idades MTF (Ma)                  |                       |                        |                        | MTL<br>( $\mu$ m) |
|----------------|------------|----|------|--------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|-------------------|
|                |            |    |      |                                                  | Idade<br>Central<br>$\pm \sigma$ | P1* $\pm \sigma$      | P2* $\pm \sigma$       | P3* $\pm \sigma$       |                   |
| <b>NCC05A</b>  | 1714       | 79 | 1551 | 2,46                                             | 5,11 $\pm$ 0,92                  | 3,29 $\pm$ 0,31 (43%) | 5,90 $\pm$ 0,37 (44%)  | 9,45 $\pm$ 0,55 (13%)  | 8,39 $\pm$ 0,06   |
| <b>NCC126</b>  | 2388       | 77 | 1457 | 2,33                                             | 3,57 $\pm$ 0,46                  | -                     | -                      | -                      | 10,02 $\pm$ 0,08  |
| <b>NCC310</b>  | 1169       | 23 | 464  | 2,13                                             | 6,73 $\pm$ 0,77                  | 4,60 $\pm$ 1,00 (39%) | 7,30 $\pm$ 1,52 (38%)  | 10,40 $\pm$ 1,20 (23%) | 9,20 $\pm$ 0,07   |
| <b>NCC358A</b> | 2455       | 73 | 2058 | 3,05                                             | 4,57 $\pm$ 0,51                  | 4,91 $\pm$ 0,18 (84%) | 14,82 $\pm$ 1,31 (16%) | -                      | 9,17 $\pm$ 0,07   |

U, concentração de <sup>238</sup>U obtido via LA-ICP-MS; n, número de grãos analisados; Ns, número de traços contados; ps, densidade superficial de traços; \* Idade Central via MFT; \* Picos obtidos via IsoplotR (Vermesch, 2009); MTL, comprimento médio dos traços confinados.

A Figura 10 apresenta os gráficos KDE e no *inset*, RadialPlotter, ambos obtidos via Isoplot (Vermeesch, 2018).

**Figura 10:** Kernel density estimates (KDE) e histogramas das amostras analisadas do Domínio Ceará Central. O inset mostra a distribuição de idade via RadialPlotter.



Fonte: Elaborado pelo autor

A interpretação dos dados requer uma avaliação criteriosa da evolução do magmatismo meso-cenozóico na região estudada e em áreas adjacentes. Durante a reativação tectono-termal da Plataforma Sul-Americana, associada à abertura do Oceano Atlântico Sul, desenvolveram-se importantes eventos magmáticos mesozóicos, durante o Jurássico e o Cretáceo, bem como eventos cenozóicos. Esses eventos encontram-se registrados em grande parte do território brasileiro, especialmente nas regiões costeiras e áreas adjacentes, sob a forma de enxames de diques máficos e complexos alcalinos.

Mapas apresentados por Almeida et al. (1986, 1988, 2012) evidenciam a distribuição regional desses registros magmáticos tanto em áreas interiores quanto na porção costeira do país. Nesta última, Chang et al. (1992) caracterizaram a extensão do

retrabalhamentocrustal e do registro sedimentar associado ao Cretáceo Superior. Nesse intervalo, entre aproximadamente 135 Ma no sul do Brasil e 102 Ma no nordeste do país, o maior volume de magmatismo gerado apresenta composição predominantemente basáltica, ocorrendo tanto nas bacias sedimentares paleozóicas, sob a forma de diques e sills, quanto no embasamento pré-Ordoviciano, na forma de diques isolados e enxames de diques, como aqueles reconhecidos nas províncias de Florianópolis e Ponta Grossa.

Em contraste, volumes relativamente menores de magmatismo alcalino e kimberlítico, com idades entre aproximadamente 130 e 60 Ma, encontram-se distribuídos em diversas províncias alcalinas, como Goiás e Alto Paranaíba (BIONDI, 2005; BROD et al., 2005; MOHRIAK et al., 2022). A evolução do rifteamento e o posicionamento espacial do magmatismo têm sido interpretados a partir de modelos que consideram a atuação de plumas mantélicas, junções tríplexes e riftes abortados (CHANG et al., 1992; WILSON, 1992; COUTINHO, 2008).

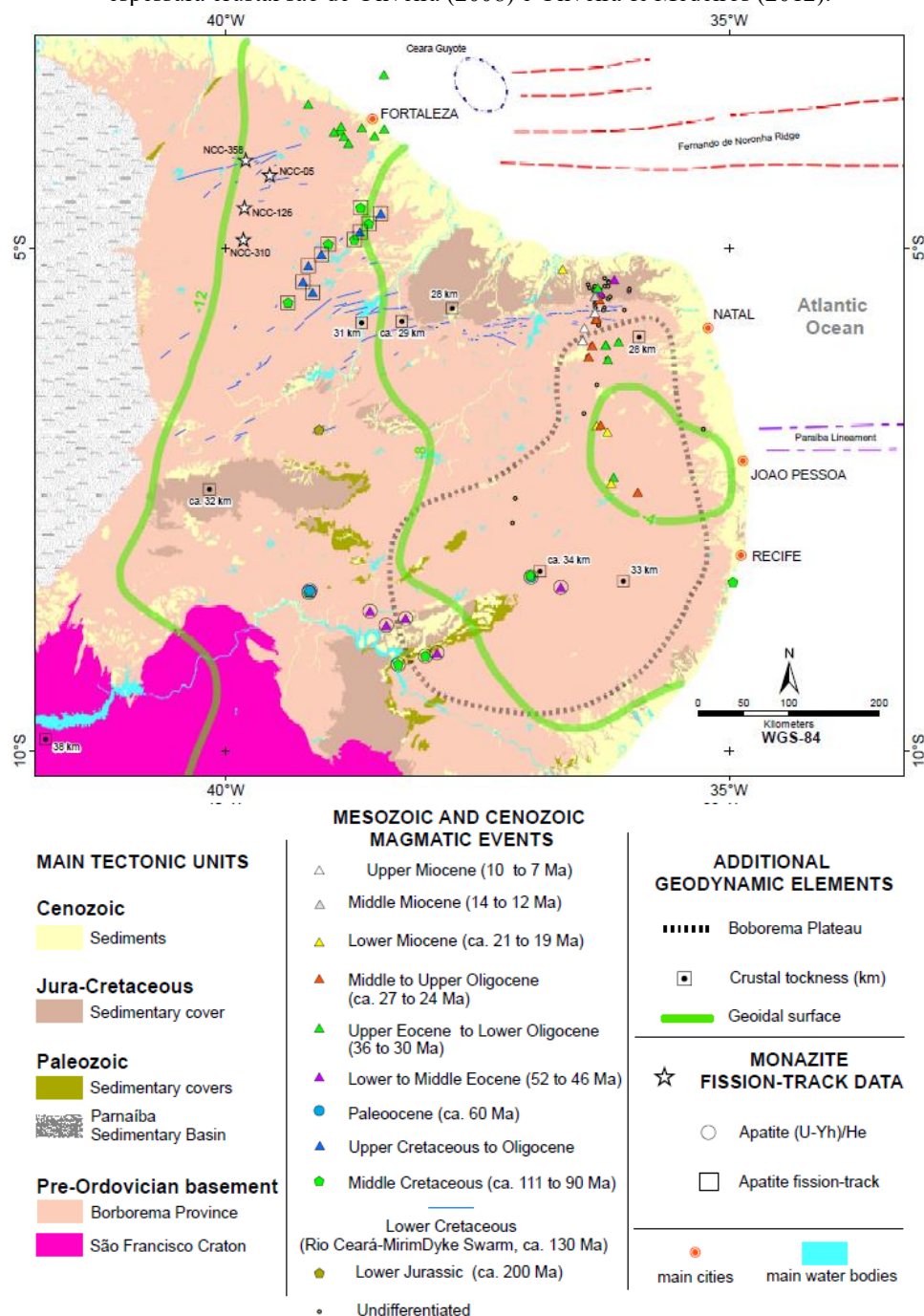
Diferentemente do observado ao longo da maior parte da costa brasileira, a Província Borborema, além de ter sido afetada por episódios tectono-termais relacionados à abertura do Oceano Atlântico, do Triássico Superior ao Paleógeno Inferior (GANADE et al., 2022), registra também os episódios magmáticos mais jovens do território brasileiro, datados do Cenozóico Médio e Superior. Desde a abertura do Atlântico, a Província Borborema apresenta um comportamento geodinâmico anômalo, caracterizado por uma superfície geoidal com valores negativos entre  $-4$  e  $-12$ , compatíveis com a posição do Platô da Borborema, bem como por uma diminuição significativa da espessura crustal na região de ocorrência da Bacia Sedimentar Potiguar e do enxame de diques Ceará-Mirim (OLIVEIRA, 2008; OLIVEIRA; MEDEIROS, 2012).

Nessa região são registradas as idades magmáticas mais jovens conhecidas para a porção continental do território brasileiro, entre aproximadamente 10 e 7 Ma. Essas características indicam que grande parte da Província Borborema foi, por um longo intervalo de tempo, e possivelmente ainda permanece, afetada por efeitos termais e magmáticos associados a processos de soerguimento mantélico relacionados à atuação de plumas, em situação análoga àquela proposta por Assunção et al. (2004) para a porção central do Brasil, no setor sudeste do Cráton do São Francisco. Destaca-se, ainda, que a Província Borborema apresenta atividade neotectônica significativa,



evidenciada principalmente por sismicidade de idade neogênica (BEZERRA et al., 2011; ASSUNÇÃO et al., 2004).

**Figura 11:** Contexto geológico maior da Província Borborema (NE-BR) com destaque para as principais ocorrências dos eventos magmáticos mesozóicos e cenozóicos. O símbolo de estrela indicam os pontos de coleta para datação MFT. Baseado em dados de Bizzi et al. (2000), Mizusaki et al. (2002), Cavalcante (2003), Dantas (2021), Pinéo (2020) e Santos et al. 2002). Idades e localização dos registros magmáticos compiladas de Souza et al. (2003), Cordani et al. (2004), Silveira (2006), Lopes et al. (2023), Guimarães et al. (2020), Cavalcante (2006). As informações da superfície geoidal, limite do Platô da Boroborema e espessura crustal são de Oliveira (2008) e Oliveira & Medeiros (2012).



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Os eventos magmáticos registrados na Província Borborema (PB) encontram-se relativamente bem datados (Figura 11). Os primeiros estudos radiométricos sistemáticos tiveram início no final da década de 1960, quando uma série de determinações pelo método K–Ar forneceu idades atribuídas ao Cretáceo Inferior e ao Oligoceno (CORDANI, 1968). Posteriormente, Gomes et al. (1981), por meio do método Rb–Sr isocrônico, atribuíram uma idade genérica cretácica ao enxame de diques Rio Ceará-Mirim, aflorante nos estados do Rio Grande do Norte e do Ceará.

Resultados K–Ar adicionais, obtidos por Bellieni et al. (1992), sugeriram que o enxame Ceará-Mirim poderia registrar dois eventos magmáticos distintos, um do Jurássico Médio e outro do Cretáceo Inferior. Com base em um amplo conjunto de idades K–Ar, Mizusaki et al. (2002) apresentaram uma síntese consistente acerca do magmatismo pós-Paleozóico nas porções onshore e offshore do território brasileiro. Nesse estudo, foram bem definidos, para a Província Borborema, conjuntos de idades cretácicas e cenozóicas, além de um registro subordinado de idades jurássicas associado às rochas básicas da Bacia Sedimentar de Lavras da Mangabeira.

Determinações posteriores pelo método  $40\text{Ar}/39\text{Ar}$  permitiram refinar significativamente as idades previamente obtidas por K–Ar (ARAÚJO et al., 2001; NASCIMENTO et al., 2003; SOUZA et al., 2003; SILVEIRA et al., 2006; GUIMARÃES et al., 2020), possibilitando a definição mais precisa dos principais intervalos de idade e eventos magmáticos sintetizados na Tabela 5.

As idades mais jovens obtidas por métodos K–Ar e  $40\text{Ar}/39\text{Ar}$  na porção continental do território brasileiro correspondem a dois principais eventos magmáticos: o Magmatismo Messejana, com idades entre aproximadamente 36 e 30 Ma (Eoceno Superior a Oligoceno Inferior), registrado nos estados do Ceará e do Rio Grande do Norte, e o magmatismo aqui denominado Serra Preta de Bodó, com idades entre aproximadamente 10 e 7 Ma (Mioceno Superior), reconhecido, até o momento, exclusivamente no Estado do Rio Grande do Norte. O Magmatismo Messejana encontra-se posicionado na extremidade ocidental de um trend estrutural de caráter transformante, o qual estabelece conexão com o Guyot do Ceará (ca. 35–40 Ma) e com o vulcanismo do arquipélago de Fernando de Noronha, associado à Fernando de Noronha Ridge no mapa apresentado, cujas litologias magmáticas apresentam, conforme determinações K–Ar e  $40\text{Ar}/39\text{Ar}$  realizadas por Cordani et al. (2004), idades

neogênicas entre 12 Ma (Formação Remédios) e 1,4 Ma (Formação Quixaba). Na extremidade oriental, esse mesmo trend estrutural se prolonga em direção à Depressão de Benue, no continente africano. Mais detalhes sobre a reconstrução paleogeográfica regional e sobre a distribuição espacial desses elementos estruturais e magmáticos podem ser obtidas em Guimarães et al. (2020) e no mapa gravimétrico free-air do Atlântico Sul apresentado em Mohriak et al. (2022).

Em relação ao magmatismo mais jovem presente na área continental (Serra Preta de Bodó), esse aparentemente encontra-se restrito ao Estado do Rio Grande do Norte, na região do embasamento pré-Ordoviciano, mas próximo à borda sul da Bacia Sedimentar Potiguar. Tal magmatismo, datado do Mioceno Superior (SILVEIRA, 2006), aparentemente ocorre associado à um sistema transformante de menor magnitude situado logo a sul da RomancheFracture Zone (Fernando de Noronha Ridge no mapa apresentado). O mapa gravimétrico free-air do Atlântico Sul presente em Mohriak et al. (2022) exibe muito bem a distribuição espacial e os trends estruturais maiores atrás mencionados.

**Tabela 5:**Eventos magmáticos da área de interesse.

| <b>Idade (Ma)</b> | <b>Período</b>                       | <b>Evento Magmático</b>       | <b>Região</b>               |
|-------------------|--------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| 10 a 7            | Mioceno Superior                     | Serra Preta de Bodó           | Rio Grande do Norte         |
| 14 a 12           | Mioceno Médio                        | Serra Preta                   | Rio Grande do Norte         |
| 21 a 19           | Mioceno Inferior                     | Macau                         | Rio Grande do Norte         |
| 27 a 24           | Oligoceno Médio a Superior           | Cabugi - Cubati               | Rio Grande do Norte         |
| 36 a 30           | Eoceno Superior a Oligoceno Inferior | Mecejana                      | Ceará e Rio Grande do Norte |
| 111 a 90          | Cretáceo Médio                       | Cabo de Santo Agostinho e Cuó | Pernambuco                  |
| ca. 130           | Cretáceo Inferior                    | Rio Ceará-Mirim               | Rio Grande do Norte e Ceará |
| ca. 200           | Jurássico inferior                   | Mosquito                      | Ceará                       |

O cenário tectono-termal maior atrás descrito teve seu início no Jurássico com o magmatismo dessa época (ca. 200 Ma), estando bem registrado nas bacias Sedimentares Fanerozóicas do norte e Nordeste do Brasil (HOLLANDA et al., 2019). Segundo Wilson (1992), a origem inicial da grande reativação da plataforma Sul-Americana na região da PB se deu devido à atuação do hot spot Santa Helena. Dessa forma tem-se

registrado na PB a continuidade do processo de reativação, o qual após seu início no Jurássico perdurou até o Neógeno Superior.

Inúmeras determinações AFT e ZFT realizadas na PB não foram plotadas no mapa apresentado (Figura 11) por apresentarem idades muito antigas e/ou a presença de apenas algumas idades mais jovens decorrentes de separação de populações estatísticas. Compõe o conjunto de idades não abordadas no mapa apresentado as seguintes determinações termocronológicas:

- **idades ZFT:** a) obtidas por Lopes (2023) no Estado de Pernambuco, dentre as quais a menor idade encontrada aplicando a individualização de populações estatísticas (VERMEESCH, 2018), foi de  $198.7 \pm 61.2$  Ma; b) obtidas por Azevedo et al. (2025) nos Estados do Rio Grande do Norte e Ceará em quatorze zircões extraídos de rochas plutônicas neoproterozóicas, as quais distribuem-se entre ca. 411 a 189 Ma. Distantes aproximadamente 50 e 100 km das monazitas analisadas, as duas idades obtidas no domínio Ceará Central foram de ca.  $261 \pm 8$  Ma e  $192 \pm 7$  Ma;
- **idades AFT:** a) obtidas por Moraes Neto et al. (2006, 2007 2009) e Nóbrega et al. (2005) em regiões dos Estados do Rio Grande do Norte e Paraíba, distribuídas entre 52 e 376 Ma; b) obtidas por Lopes (2023) em dezesseis grãos, onde as duas menores idades encontradas após a individualização de populações estatísticas (Vermeesch 2018) foram de  $30,1 \pm 5,2$  Ma e  $25,9 \pm 7,5$  Ma.

No mapa apresentado encontram-se as determinações AFT realizadas por Cavalcante (2006) em apatitas extraídas de litologias deformadas associadas à Zona de Cisalhamento de Senador Pompeu (limite SE do Terreno Ceará Central). Tais determinações distam cerca de 100 e 250 km das amostras de monazita, e forneceram dois conjuntos de idades: a) mais antigo do Cretáceo Inferior (ca. 111 Ma) e b) Cretáceo Superior a Oligoceno (ca. 70 a 36 Ma).

Sobre as determinações (U-Th)/He em apatita realizadas por Lopes et al. (2023) em litologias associadas à Zona de Cisalhamento Pernambuco e adjacências (distantes cerca de 500 km a S-SE das monazitas analisadas), os seguintes comentários podem ser colocados: **a)** as idades representadas no mapa são as idades calculadas pelo autor

(weightedmean ages) com dois desvios-padrão considerando sempre cinco grãos individuais; **b)** os elevados erros associados às idades calculadas parecem decorrer da mistura de idades discrepantes (por exemplo, ver amostra NE-06A com quatro idades menores de 19,7 a 39,2 Ma e uma idade mais elevada de 78.2 Ma, weightedmean age com dois sigma de  $38 \pm 24$  Ma); **c)** no gráfico da figura acima encontram-se plotadas individualmente as idades calculadas para os sessenta grãos analisados e suas respectivas amostras. Também se encontra assinalada a posição temporal dos eventos magmáticos recentes mais importantes: Rio Ceará-Mirim, Cabo de Santo Agostinho, Mecejana, Cabuji e Macau; **d)** nenhuma idade individual se sobrepos à idade do magmatismo Serra Preta de Bodó (Mioceno Superior); **e)** considerando as doze amostras analisadas, três conjuntos de dispersão das idades em amostras individuais foram encontrados: baixa dispersão (ca. 40 Ma, quatro amostras), dispersão intermediária (ca. 60 Ma, cinco amostras) e dispersão elevada ( $> 100$  Ma, três amostras); **f)** dada a correspondência entre várias das idades determinadas e os diferentes eventos magmáticos registrados na PB, a individualização de populações estatísticas (VERMEESCH, 2018) pode ser tentativamente implementada sobre o conjunto total de sessenta grãos analisados; **g)** considerando as idades individuais dos grãos analisados, a maior parte das idades encontra-se no intervalo correspondente entre o Cretáceo Superior e o Paleógeno; **h)** as idades do Cretáceo Inferior, as quais podem ser tentativamente correlacionadas ao Magmatismo Rio Ceará-Mirim, ocorrem em apenas três amostras, as quais invariavelmente apresentam idades mais jovens que chegam até o Eoceno.

Finalmente, uma análise integrada dos resultados MFT indica que todas as amostras analisadas apresentam idades centrais significativamente mais jovens ( $>10$  Ma) quando comparadas às idades previamente obtidas por métodos de termocronologia de temperatura mais elevada, como apatita e zircão (U–Th)/He (AHe, ZHe), traços de fissão em apatita (AFT) e  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  disponíveis para a área de estudo. Esses resultados fornecem suporte preliminar às estimativas experimentais e empíricas que indicam uma sensibilidade térmica nominal muito baixa para o sistema MFT, restrita a temperaturas da ordem de  $\leq 46\text{--}25$  °C (WEISE et al., 2009; JONES et al., 2019, 2023; JEPSON et al., 2025).

Todas as amostras brasileiras falharam no teste estatístico do qui-quadrado ( $\chi^2$ ), indicando que a dispersão das idades de grãos individuais em relação à idade central excede aquela esperada apenas por incertezas analíticas. Um comportamento análogo foi observado nos conjuntos de dados apresentados por Jones et al. (2023) e Jepson et al. (2025), nos quais a rejeição do teste  $\chi^2$  foi interpretada como reflexo da atuação de processos adicionais que podem afetar a preservação e o annealing dos traços de fissão em monazita. Essa dispersão pode ser interpretada, em princípio, como resultado da presença de múltiplas populações de idade; contudo, conforme discutido na literatura, outros fatores físico-químicos também podem desempenhar papel relevante no controle das idades MFT.

Segundo Jepson et al. (2025), efeitos geoquímicos ainda pouco compreendidos incluindo variações composicionais internas, zonas de crescimento mineral e diferenças locais na concentração de U e Th podem influenciar significativamente as taxas de annealing dos traços, resultando em ampla dispersão das idades dentro de uma mesma amostra. De forma complementar, Jones et al. (2023) sugerem que algumas fontes adicionais de incerteza no sistema MFT podem estar associadas às elevadas concentrações de  $^{238}\text{U}$ , bem como à possibilidade de ocorrência de annealing diferencial mesmo em condições de superfície.

Nesse contexto, Jones et al. (2023) discutem a possibilidade de o sistema MFT operar, ao menos parcialmente, de maneira análoga a um sistema aberto, no sentido de que a monazita pode permanecer simultaneamente sujeita à produção contínua de traços e a processos de annealing mesmo após sua exumação para condições próximas à superfície. Evidências experimentais e observacionais sugerem que a monazita pode sofrer annealing extremamente lento em temperaturas muito baixas, potencialmente próximas à temperatura ambiente, o que pode indicar uma sensibilidade a variações climáticas de longo prazo. Além disso, processos não exclusivamente térmicos, como o annealing assistido por radiação alfa e os efeitos associados ao recuo nuclear durante o decaimento alfa de U e Th, são discutidos como mecanismos potenciais capazes de contribuir para a redução da densidade de traços ao longo do tempo (JONES et al., 2023).

Esses processos ainda não são plenamente compreendidos nem quantitativamente comprovados, mas podem sugerir que o sistema MFT não registre

exclusivamente eventos discretos de resfriamento térmico, podendo também responder, de forma integrada, a processos contínuos atuantes em condições superficiais ao longo do tempo geológico. Com basenessa premissa, na Seção 4.3 foi aplicada uma análise composicional às amostras, com o objetivo de investigar a possível influência desses fatores na dispersão observada das idades.

Diante dessas considerações, Jones et al. (2023) interpretam as idades centrais de MFT como idades mínimas de resfriamento, uma vez que a densidade de traços pode ser parcialmente reduzida mesmo após o término do principal evento de resfriamento térmico. Os resultados obtidos neste estudo aparentemente corroboram essa interpretação, pois as idades centrais das amostras tendem a se situar dentro do intervalo temporal do evento de resfriamento inferido a partir das modelagens tempo–temperatura, ou mesmo a apresentar valores ligeiramente mais jovens.

Os dados obtidos para as quatro amostras revelam distribuições de idades amplas, com idades centrais variando entre aproximadamente 3,6 e 6,7 Ma, mas apontam de forma consistente para um regime térmico dominado pelo resfriamento durante o Mioceno Superior. A sobreposição significativa dos intervalos de idade indica que as idades centrais, embora úteis como parâmetros estatísticos de síntese, não devem ser interpretadas isoladamente. Ainda assim, a coerência entre as distribuições de idades individuais, as idades centrais e os resultados das modelagens tempo–temperatura sugere a atuação de um controle regional comum, associado à exumação progressiva e à estabilização térmica em níveis crustais rasos a partir de aproximadamente 6–8 Ma.

Essa convergência reforça a interpretação de que os sistemas de traços de fissão em monazita registram predominantemente um episódio tectono-termal de escala regional, em vez de eventos térmicos locais ou pontuais. As modelagens QTQt apresentadas na Seção 4.3.2 corroboram essa interpretação ao indicar, para todas as amostras, um resfriamento a partir de temperaturas moderadas a elevadas no Mioceno Superior, seguido por uma permanência prolongada em condições rasas até o presente.

Por fim, os pequenos sinais de reaquecimento próximos ao presente, observados em algumas soluções de modelagem, são interpretados como artefatos numéricos associados à imposição da temperatura atual como condição de contorno, não representando evidência de eventos térmicos geologicamente significativos. Assim, o conjunto de dados sustenta de forma robusta um cenário de resfriamento regional no



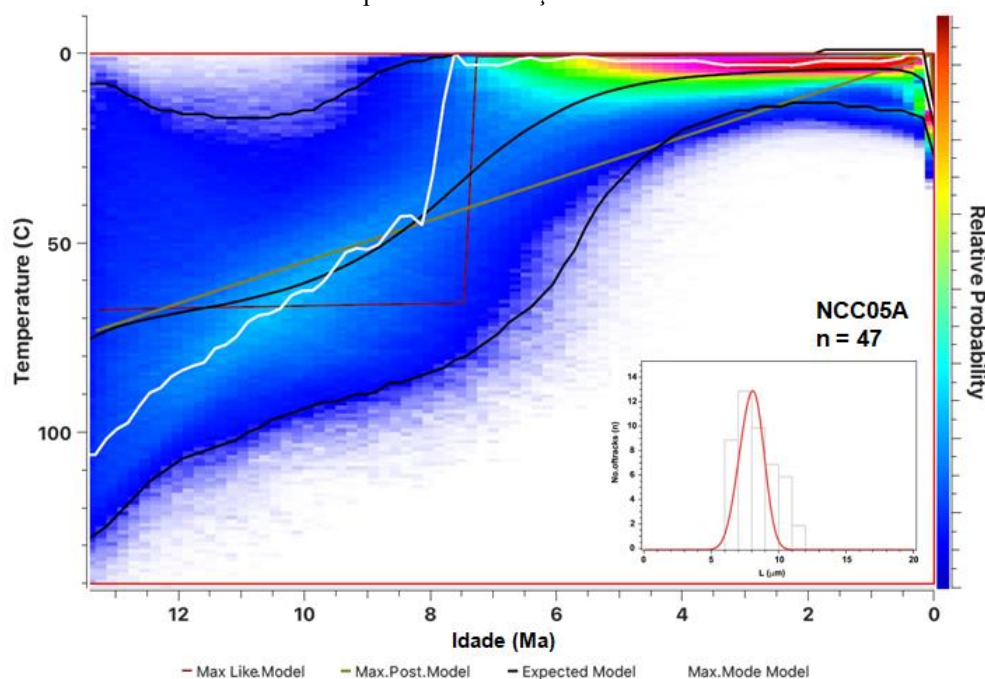
Mioceno Superior, seguido por longa residência próxima à superfície, compatível com uma fase de tectonismo e denudação efetiva, sucedida por relativa quiescência térmica.

#### **4.2.3 Histórias Térmicas**

A modelagem inversa utilizando o software QTQt (Gallagher, 2012) foi realizada em dados de MFT para quantificar as histórias térmicas de quatro amostras brasileiras. O QTQt V5.8.5 utiliza um método de amostragem Bayesiano transdimensional de Cadeia de Markov Monte Carlo (MCMC) para gerar uma gama de histórias térmicas aceitáveis, quantificadas por meio de uma distribuição de probabilidade posterior (Gallagher, 2012; Gallagher et al., 2009). O modelo de annealing da monazita utilizado no QTQt é o modelo Fanning Linear ( $T_0 = \text{infinito}$ ) de Jones et al. (2021).

Foram executadas 500.000 iterações durante a modelagem da história térmica de cada amostra, sendo as primeiras 100.000 descartadas como período de aquecimento (burn-in) (Gallagher et al., 2009). Os resultados para cada modelo de história térmica também são ilustrados pelas idades termocronológicas observadas versus previstas e pelas distribuições de traços confinados observadas, sobrepostas às observações previstas (curva vermelha) e ao intervalo de confiança de 95% (curvas cinza) das distribuições previstas. As histórias térmicas representam a distribuição de probabilidade posterior dos caminhos tempo-temperatura aceitos, com cores mais brilhantes indicando probabilidades mais altas. As linhas pretas sólidas representam os limites do intervalo de confiança de 95%.

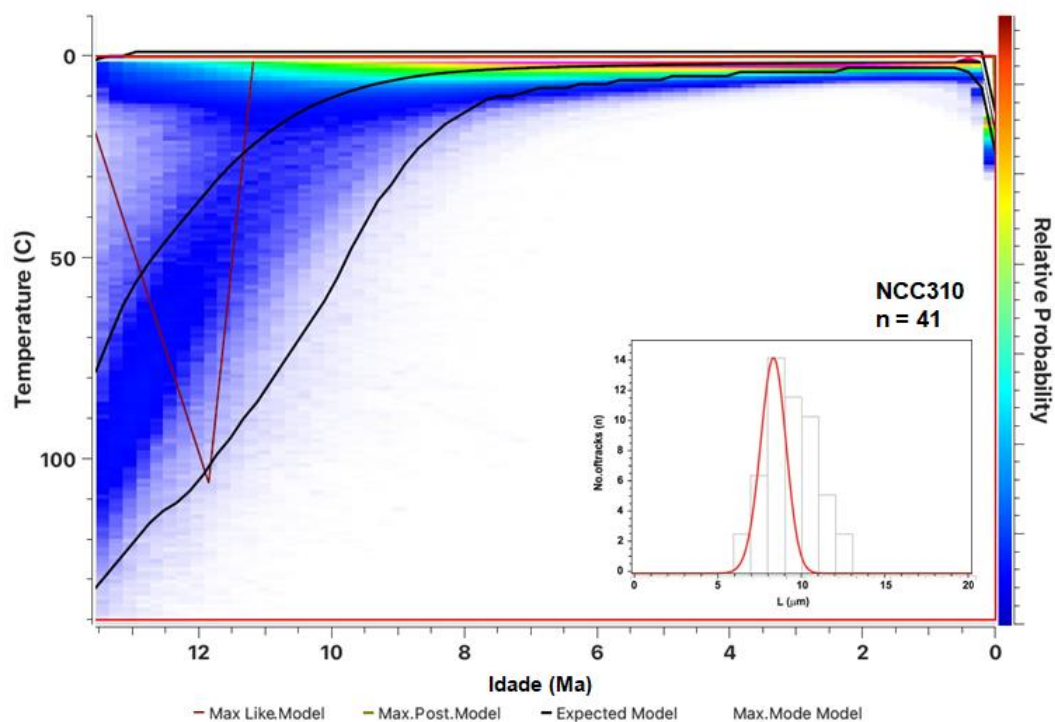
**Figura 12:** Modelagem de história térmica via QTQt na amostra NCC05A. O inset mostra a distribuição dos comprimentos de traços confinados.



Fonte: Elaborado pelo autor

A história térmica da amostra NCC05A via QTQt indica em uma história probabilística tempo-temperatura caracterizada por um resfriamento gradual a partir de temperaturas moderadas durante o Mioceno Superior, seguido por uma permanência prolongada em condições próximas à superfície desde aproximadamente 6–8 Ma. Um pequeno reaquecimento aparente em direção aos dias atuais é observado em alguns resumos posteriores; No entanto, essa característica é interpretada como um artefato de modelagem resultante da restrição de temperatura atual imposta ( $25 \pm 10$  °C), em vez de evidência de um evento térmico tardio geologicamente significativo.

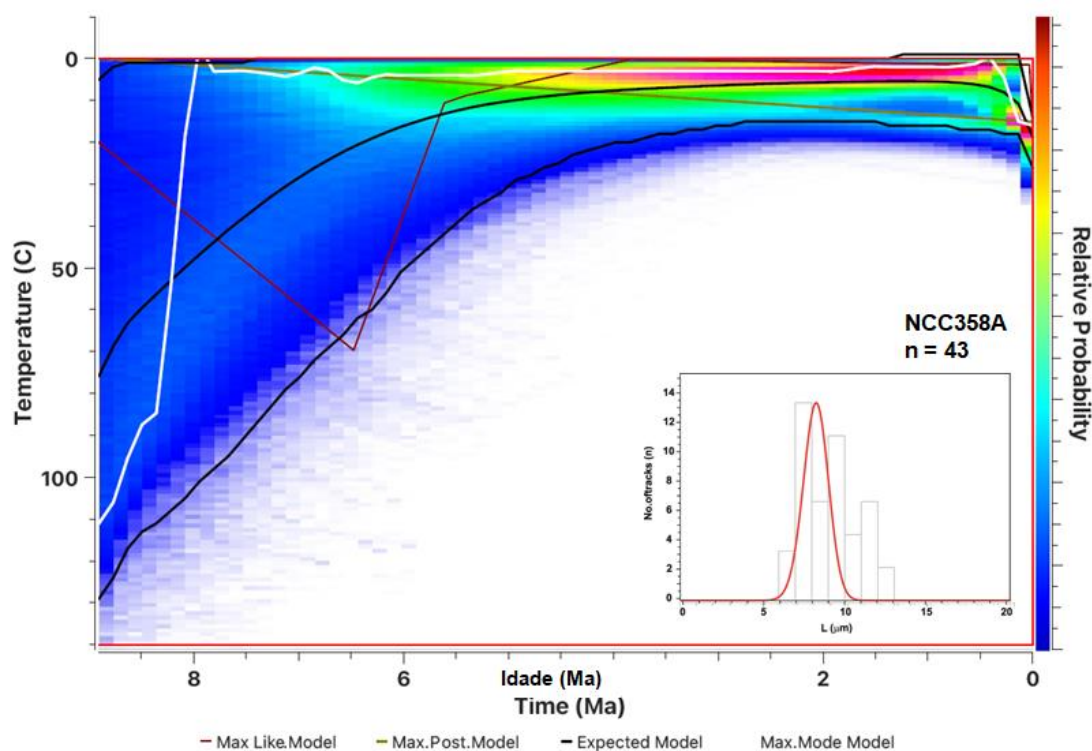
**Figura 13:** Modelagem de história térmica via QTQt na amostra NCC310. O inset mostra a distribuição dos comprimentos de traços confinados.



Fonte:Elaborado pelo autor

Os resultados do QTQt para a amostra NCC310 indicam um rápido resfriamento no Mioceno Superior a partir de temperaturas elevadas, seguido por uma permanência prolongada em condições próximas à superfície desde aproximadamente 8 Ma. O pequeno reaquecimento aparente nas condições atuais é atribuído à restrição de temperatura atual imposta, e não a um sinal térmico resolvido.

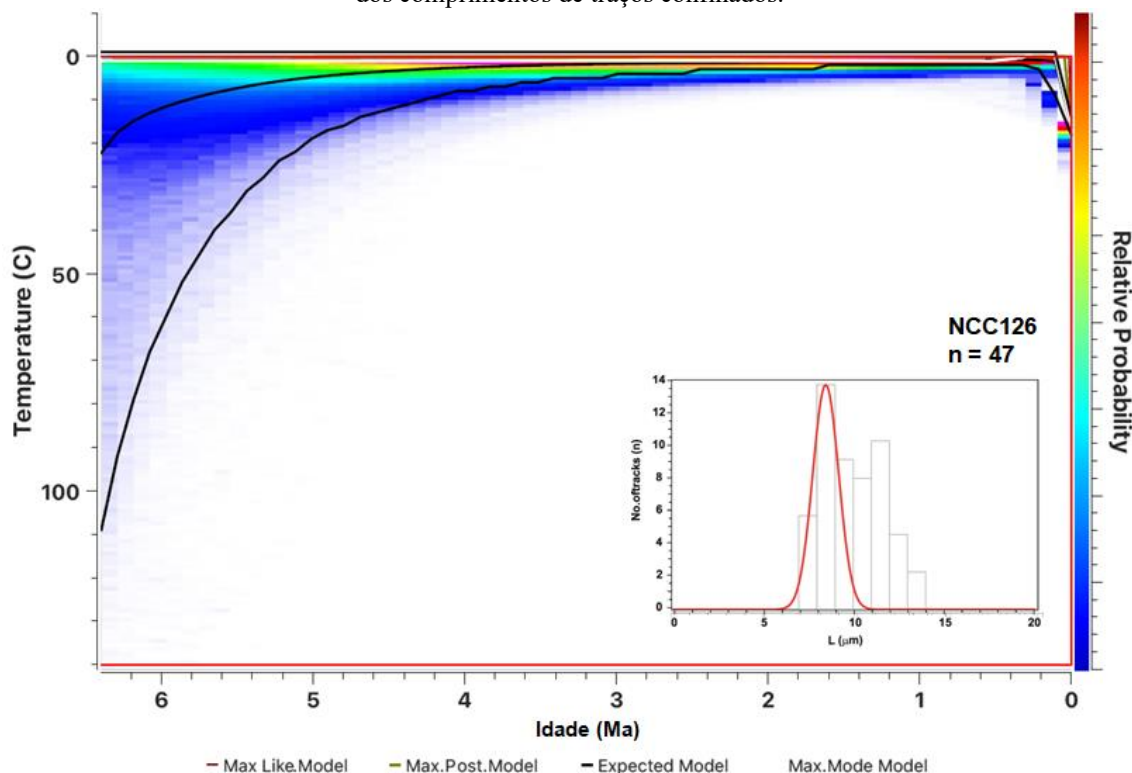
**Figura 14:** Modelagem de história térmica via QTQt na amostra NCC358A. O inset mostra a distribuição dos comprimentos de traços confinados.



Fonte: Elaborado pelo autor

A modelagem QTQt dos dados de MFTna amostra NCC358A indica um resfriamento de temperaturas moderadas a altas durante o Mioceno Superior, com a principal fase de resfriamento ocorrendo entre ~8 e 6 Ma. Posteriormente, a distribuição posterior se concentra em baixas temperaturas, consistente com uma permanência prolongada próxima à superfície de ~6 Ma até o presente. Um pequeno reaquecimento aparente muito próximo do presente é interpretado como um artefato para satisfazer a restrição de temperatura atual imposta, e não como um evento térmico discreto.

**Figura 15:** Modelagem de história térmica via QTQt na amostra NCC126. O inset mostra a distribuição dos comprimentos de traços confinados.



Fonte: Elaborado pelo autor

A modelagem QTQt da amostra NCC126 resulta em uma distribuição posterior de tempo-temperatura fortemente concentrada em temperaturas próximas à superfície nos últimos ~6 milhões de anos. Embora o modelo permita uma ampla gama de temperaturas na extremidade mais antiga da janela, as soluções de maior probabilidade indicam uma permanência prolongada em baixas temperaturas desde o Mioceno Superior, com poucas evidências de reaquecimento geologicamente significativo. A estrutura menor próxima do presente reflete a convergência para a restrição de temperatura atual imposta e não é interpretada como um evento térmico discreto.

### 4.3 Avaliação Composicional

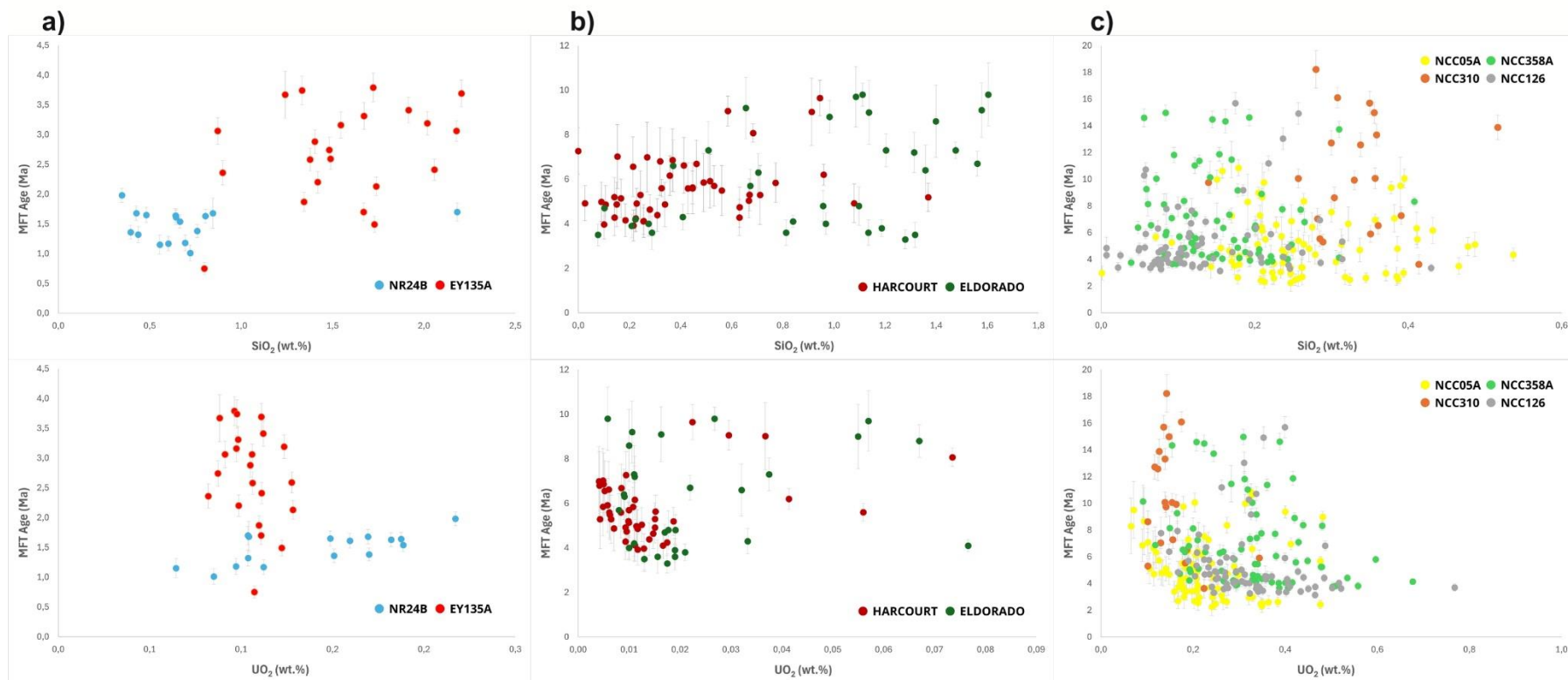
O objetivo desta seção é analisar a influência direta da composição química da monazita sobre as idades MFT. Para tanto, foram elaborados gráficos (Figura 16) que relacionam as idades MFT das amostras com os teores de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{UO}_2$  e  $\text{ThO}_2$ .

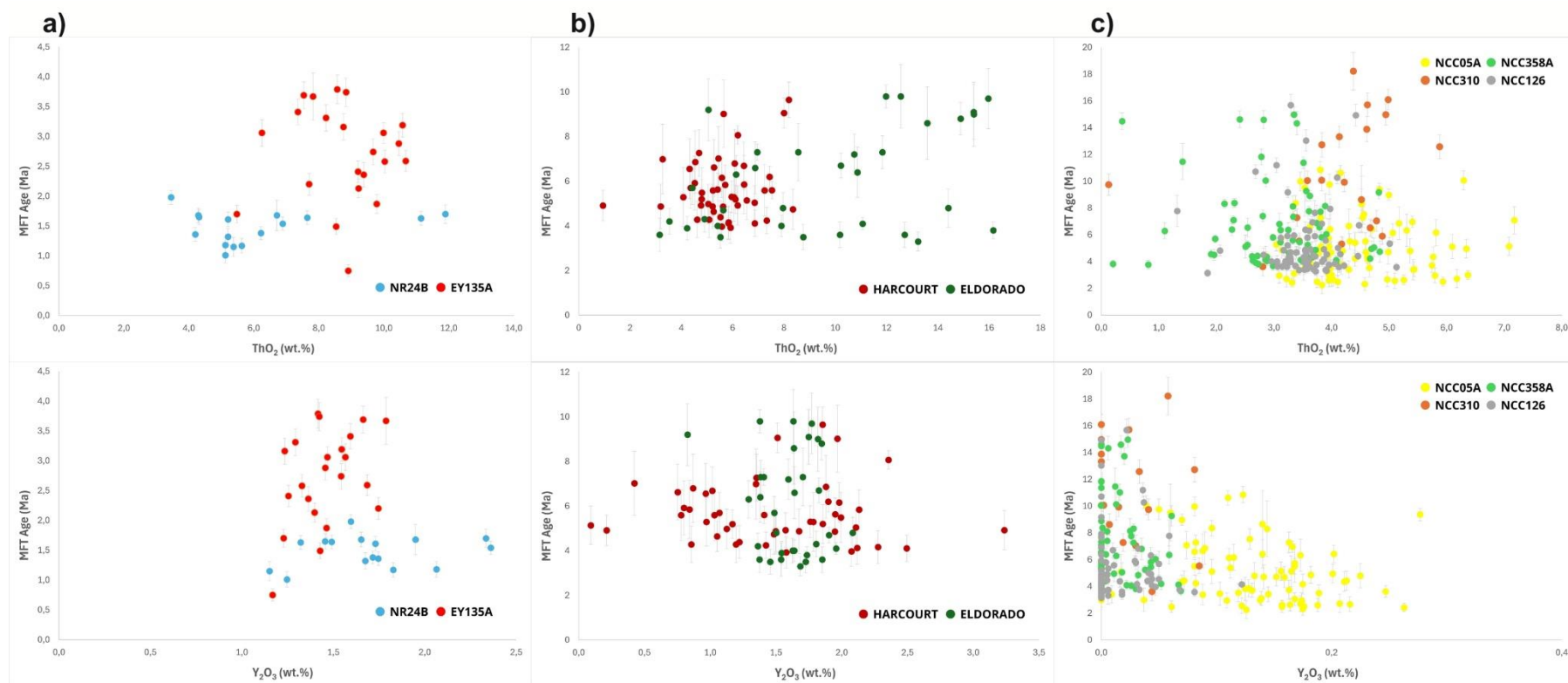
Jones et al. (2023) indicaram a existência de uma relação positiva entre a concentração de  $\text{SiO}_2$  em monazita e as idades MFT, interpretando que maiores teores de Si estariam associados a uma maior resistência ao annealing, o que sugeriria um possível controle composicional na cinética de annealing da MFT. Nesse contexto, os autores também atribuíram a elevada dispersão das idades MFT e a reprovação no teste do qui-quadrado à heterogeneidade no conteúdo de Si entre os grãos analisados, interpretando que diferenças composicionais poderiam resultar em distintas cinéticas de annealing dentro de uma mesma amostra.

Do ponto de vista cristal químico, essa interpretação é fisicamente plausível, uma vez que o  $\text{Si}^{4+}$  pode substituir o  $\text{P}^{5+}$  no sítio tetraédrico da estrutura da monazita, exigindo mecanismos de compensação de carga, como a incorporação de cátions divalentes ou a formação de vacâncias (DELLA VENTURA et al., 2018). Essas substituições promovem distorções locais na rede cristalina, potencialmente afetando a densidade e a estabilidade dos defeitos estruturais associados aos traços fósseis e, conseqüentemente, a energia de ativação do annealing. Como resultado, grãos com diferentes teores de Si podem apresentar taxas distintas de apagamento dos traços mesmo sob uma mesma história térmica, contribuindo para a dispersão das idades MFT e para a não conformidade dos dados com o teste do qui-quadrado.

No entanto, os próprios resultados apresentados por Jones et al. (2023) mostram que essa relação não é sistemática em nível de grãos individuais, uma vez que, mesmo dentro de uma mesma amostra, ocorrem grãos com baixos teores de  $\text{SiO}_2$  que apresentam idades MFT relativamente elevadas. Dessa forma, embora a heterogeneidade composicional em Si represente um mecanismo plausível para explicar a elevada dispersão das idades MFT e a reprovação no teste do qui-quadrado observadas por aqueles autores, essa interpretação não é exclusiva, uma vez que outros fatores, particularmente de natureza térmica e estrutural, também podem contribuir de forma significativa para a dispersão observada.

Figura 16: Dispersão de idades MFT com as concentrações (wt%) de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{UO}_2$ ,  $\text{ThO}_2$  e  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , apresentados para as amostras: a) japonesas, b) australianas e c) brasileiras.





Fonte:Elaborado pelo autor.



Comportamento semelhante é observado nos resultados do presente estudo. Para as amostras brasileiras (Figura 16c), não se identifica correlação clara entre o conteúdo de Si e as idades MFT, indicando ausência de controle direto desse parâmetro sobre o annealing. Para as amostras da Austrália (Figura 16b) e do Japão (Figura 16a), estas últimas correspondentes às mesmas amostras analisadas por Jones et al. (2023), observa-se uma tendência positiva apenas na comparação entre amostras distintas. Contudo, essa relação não se sustenta em escala intra-amostra, isto é, na comparação entre grãos de uma mesma amostra.

A avaliação entre amostras distintas pode não ser a abordagem mais adequada, uma vez que cada amostra registra uma história térmica própria. Considerando que o controle térmico exerce influência primária sobre o annealing e, consequentemente, sobre as idades MFT, diferenças térmicas tendem a se refletir diretamente nas idades obtidas, independentemente da composição. Por outro lado, em escala intra-amostra, espera-se menor variabilidade térmica entre os grãos, tornando essa abordagem mais apropriada para investigar possíveis efeitos composicionais.

Dessa forma, os resultados não indicam relação direta e sistemática entre as idades MFT e as concentrações de Si. Embora não se descarte a influência composicional no processo de annealing, os dados sugerem predominância do controle térmico, com eventuais efeitos composicionais atuando de forma secundária.

Jepson et al. (2025) observaram uma relação negativa entre o conteúdo de  $Y_2O_3$  e as idades MFT, interpretada como resultado da substituição isovalente entre cátions  $Y^{3+}$  e terras raras trivalentes ( $REE^{3+}$ ) na estrutura cristalina da monazita. No presente estudo, de forma consistente com o comportamento observado para o Si, não foi identificada relação direta entre as idades MFT e o conteúdo de Y. Esses resultados reforçam a interpretação de que, nas condições investigadas, o controle térmico é predominante, enquanto possíveis efeitos composicionais associados ao Y, se presentes, são secundários.

Jones et al. (2023) também sugeriram a possível ocorrência de um mecanismo de radiation-assisted annealing, no qual a dose de radiação alfa, resultante do decaimento de U e Th, poderia facilitar o processo de annealing da monazita. Nesse contexto, as concentrações de U e Th no mineral poderiam atuar diretamente nas idades MFT. Em apenas uma das amostras analisadas, os autores observaram uma relação direta entre o

conteúdo de U e as idades MFT, de modo que os grãos com maiores concentrações de U apresentaram idades mais jovens, interpretadas como idades possivelmente subestimadas em função do annealing assistido pela radiação alfa. Todavia, esse comportamento não foi observado de forma sistemática nas demais amostras analisadas por aqueles autores.

Com o objetivo de investigar esse efeito, foram construídos gráficos de dispersão relacionando as idades MFT com os teores de  $\text{UO}_2$  (wt%) e  $\text{ThO}_2$  (wt%), apresentados na Figura 16. De modo semelhante ao observado para o Si e Y, não se identifica uma relação direta e sistemática entre os conteúdos de U e Th e as idades MFT quando analisados grãos individuais de uma mesma amostra, indicando que, no conjunto de dados analisado, variações composicionais não se refletem de forma consistente nas idades obtidas. Ressalta-se, contudo, que os teores de U e Th representam apenas uma aproximação indireta da dose de radiação alfa acumulada, a qual também depende do tempo de residência térmica e do histórico prévio de annealing.

Nesse contexto, a simples correlação entre concentrações de U e Th e idades MFT não permite quantificar diretamente a dose de radiação acumulada no cristal, nem avaliar seus efeitos na estrutura cristalina ou eventuais variações na energia de ativação do annealing associadas ao dano radiogênico. Abordagens mais robustas são necessárias para esse tipo de avaliação. Nakajima et al. (2024), por exemplo, estimaram a dose de radiação a partir da integração de dados químicos obtidos por EPMA com análises estruturais via espectroscopia Raman, demonstrando o potencial dessa abordagem para melhor constranger o papel da radiação alfa na cinética de annealing da monazita.

As relações entre composição química (Si, Y, U e Th) e idades MFT foram avaliadas de forma qualitativa, com base na inspeção de gráficos de dispersão, sem a aplicação de testes estatísticos formais. Considerando o número limitado de grãos por amostra e a predominância do controle térmico no annealing, essa abordagem se mostra adequada para a identificação de tendências gerais. Ainda assim, para trabalhos futuros, recomenda-se a aplicação de análises estatísticas mais aprofundadas, incluindo abordagens multifatoriais, a fim de melhor discriminar possíveis interações entre variáveis composicionais e térmicas.

Embora se observe influência dos teores de U e Th na velocidade de ataque químico, esse comportamento não se reflete de forma clara no annealing associado às idades MFT. Dessa forma, os resultados reforçam que o controle térmico exerce papel predominante, enquanto eventuais efeitos composicionais, se presentes, atuam de maneira secundária. Adicionalmente, destaca-se novamente que estudos cristalográficos, como difração de raios X (DRX), bem como investigações mais aprofundadas dos fatores estequiométricos, constituem abordagens promissoras para melhor compreender os mecanismos envolvidos. Nesse sentido, análises complementares voltadas à quantificação da dose de radiação e à caracterização microestrutural do dano cristalino são essenciais para o avanço na interpretação do papel da radiação alfa na cinética de annealing da monazita.

#### **4.4 Desafios atuais e perspectivas futuras da MFT em monazita**

Apesar do avanço metodológico representado pela aplicação da MFT, algumas lacunas conceituais e limitações intrínsecas ao método ainda permanecem e devem ser explicitamente reconhecidas. Uma das limitações críticas reside na ausência de uma amostra padrão de idade amplamente aceita para a MFT em monazita, o que implica a inexistência de um referencial absoluto de calibração, dificulta a validação externa dos resultados e impõe restrições relevantes às comparações interlaboratoriais. Diferentemente de outros sistemas termocronológicos mais consolidados, a MFT ainda carece de um referencial metrológico básico, o que aumenta a complexidade na distinção entre efeitos cinéticos, analíticos e genuinamente geológicos.

Outra característica fundamental do sistema MFT está relacionada à simultaneidade entre a produção e o annealing dos traços de fissão. Enquanto a monazita permanece dentro ou oscila em torno da MPAZ, novos traços continuam sendo produzidos ao mesmo tempo em que traços pré-existentes são progressivamente encurtados ou apagados, o que dificulta o estabelecimento de um regime cineticamente fechado. Nesse contexto, conforme discutido por Jones (2023), a idade MFT pode ser interpretada como o resultado de um equilíbrio dinâmico entre produção e annealing, e não necessariamente como o registro direto de um evento térmico pontual.

A posição extremamente rasa da MPAZ confere ao clima um papel potencialmente relevante no funcionamento do método. Variações na temperatura média anual, na amplitude térmica sazonal, na frequência de eventos climáticos extremos e em ciclos climáticos de maior escala podem influenciar diretamente o regime térmico experimentado pelos grãos de monazita. Dessa forma, um mesmo grão pode alternar entre condições dentro e fora da MPAZ sem a ocorrência de alterações tectônicas significativas, o que implica que oscilações climáticas podem gerar sinais termocronológicos que, em primeira ordem, podem se assemelhar àqueles associados a processos geodinâmicos rasos.

Em um regime dominado por equilíbrio dinâmico, a dispersão das idades MFT não deve ser interpretada automaticamente como evidência de múltiplos eventos térmicos distintos. A variabilidade observada pode refletir heterogeneidades intragranulares na distribuição de U e Th, variações locais na taxa de produção de traços e diferenças cinéticas associadas à estrutura cristalina e ao grau de dano radiativo acumulado. Consequentemente, a falha no teste do  $\chi^2$  pode indicar que o sistema operou de forma cineticamente aberta, e não necessariamente a existência de múltiplas populações geológicas independentes.

Diante dessas limitações, o avanço da MFT depende da consolidação de um conjunto de desenvolvimentos metodológicos ainda em curso. Entre eles, destaca-se a necessidade de experimentos de annealing conduzidos em temperaturas ultrabaixas ( $\approx 20\text{--}50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) e em escalas de tempo prolongadas, a fim de compreender de forma mais precisa o comportamento cinético dos traços em temperaturas ambiente ou próximas a elas. Além disso, os estudos realizados até o momento têm sido conduzidos majoritariamente com traços induzidos artificialmente, o que torna desejável a realização de investigações envolvendo traços fósseis naturais, formados ao longo do tempo geológico, para avaliar se o comportamento cinético observado é plenamente representativo das condições naturais do sistema.

Adicionalmente, abordagens intragranulares podem representar uma vantagem metodológica singular da monazita. O intenso zonamento químico, aliado à heterogeneidade na distribuição de U e Th dentro de um mesmo grão, permite investigar diferentes microambientes cinéticos que compartilham a mesma história térmica. A integração entre datações MFT em domínios zonados, mapeamentos composicionais de

alta resolução e análises estruturais possibilita avaliar de forma mais robusta a influência de controles químicos e cinéticos sobre o comportamento do sistema.

A incorporação de técnicas estruturais, como espectroscopia Raman e EBSD (associadas à EPMA) pode constituir um caminho complementar para compreender a relação entre o estado da rede cristalina, a densidade de defeitos e a cinética de annealing. Essas abordagens permitem correlacionar domínios com diferentes idades MFT ao grau de dano radiativo e à organização cristalina, fornecendo restrições independentes sobre os mecanismos que controlam o comportamento do sistema em baixas temperaturas.

Perspectivas adicionais incluem experimentos envolvendo dano radiativo controlado, conforme sugerido por Jones et al. (2023), com o objetivo de avaliar o papel do annealing assistido por radiação alfa e pelos efeitos de recuo alfa em condições próximas às naturais. De forma complementar, o uso sistemático do comprimento de traços confinados surge como uma variável potencialmente mais sensível à cinética de annealing do que a idade aparente, oferecendo um registro mais direto da evolução térmica e maior capacidade de discriminar entre estados de equilíbrio dinâmico e eventos térmicos discretos.

## 5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos demonstram que a Termocronologia por Traços de Fissão em monazita (MFT) possui elevado potencial analítico e boa reprodutibilidade. As idades determinadas para amostras de referência internacionais (Japão e Austrália) mostram concordância estreita com dados previamente publicados e controles independentes, validando a adequação do protocolo adotado pelo grupo TRACKs e evidenciando, inclusive, a obtenção de incertezas analíticas ligeiramente menores em comparação com abordagens tradicionais, sem prejuízo da confiabilidade dos resultados.

A cinética de revelação dos traços de fissão em monazita sugere possível influência do grau de dano radiogênico acumulado, potencialmente relacionado aos teores de Th e U no mineral. Amostras como a referência australiana HAR2019 apresentaram tempos ótimos de revelação mais curtos, enquanto as amostras brasileiras, caracterizadas por maiores teores de U e menores de Th, demandaram tempos de ataque mais longos. No entanto, essas observações não permitem estabelecer relações diretas ou dominantes entre composição e cinética de ataque, devendo ser interpretadas com cautela. Considerando a ocorrência de annealing em baixas temperaturas, é importante também avaliar o papel de fatores estequiométricos no controle da reatividade do mineral. Nesse contexto, análises cristalográficas por DRX e a quantificação do grau de dano estrutural por espectroscopia Raman configuram abordagens promissoras para melhor constranger esses efeitos. Esses resultados reforçam a adoção da técnica de step-etch como abordagem preferencial, em detrimento de tempos fixos de ataque, por permitir ajustes mais adequados às heterogeneidades composicionais e estruturais das amostras.

Do ponto de vista aplicado, a MFT forneceu restrições temporais inéditas para a evolução tectono-térmica do Domínio Ceará Central, revelando idades muito jovens, entre o Mioceno Superior e o Plioceno (~3,6–6,7 Ma), associadas a condições de ultrabaixa temperatura (25–45 °C). Essas idades são significativamente mais recentes do que aquelas obtidas por métodos termocronológicos convencionais, como AFT e ZFT, indicando um episódio de resfriamento e exumação tardio, possivelmente relacionado à dinâmica do Platô da Borborema e a eventos magmáticos neogênicos, como o

magmatismo Serra Preta de Bodó. As modelagens térmicas inversas realizadas no software QTQt corroboram esse cenário, apontando para um resfriamento acelerado no Mioceno Superior, seguido por relativa estabilidade térmica em níveis crustais até o presente.

Os resultados obtidos indicaram que o controle composicional exerce um papel secundário em relação ao controle térmico nos processos de annealing em monazita, ainda que variações na composição química possam influenciar de forma sutil a resposta do sistema em diferentes regimes de temperatura. Apesar disso, torna-se fundamental o desenvolvimento e a aplicação de métodos analíticos mais robustos para a caracterização quantitativa do grau de destruição estrutural da monazita associado ao decaimento alfa, bem como para a compreensão mais detalhada de sua relação com os processos de annealing em distintos regimes térmicos.

Nesse contexto, a aplicação da MFT em amostras brasileiras representa uma oportunidade estratégica para a expansão da geocronologia e da termocronologia no país, considerando a ampla distribuição da monazita em diversos contextos geológicos. A sensibilidade térmica ultrabaixa desse sistema permite investigar processos geológicos recentes e de baixa magnitude energética, como erosão climática, ajustes isostáticos e movimentos tectônicos superficiais sutis, com implicações diretas para a compreensão da evolução recente do relevo brasileiro e para estudos em bacias sedimentares, terrenos neoproterozoicos e áreas de interesse econômico, incluindo províncias associadas à mineralização de elementos terras raras.

Entretanto, apesar de seu caráter claramente promissor, a termocronologia por traços de fissão em monazita ainda se encontra em fase de consolidação. Diversos avanços metodológicos e aplicações adicionais são necessários, tanto do ponto de vista analítico, incluindo calibrações mais amplas, melhor compreensão dos controles térmicos e composicionais e dos mecanismos de annealing, quanto do ponto de vista aplicado, por meio da ampliação do número de estudos de caso em diferentes contextos geológicos. Somente com esse aprofundamento será possível estabelecer de forma mais robusta os limites, potencialidades e a plena aplicabilidade da MFT como ferramenta termocronológica no Brasil.

## **6 DECLARAÇÃO DO USO DE IA**

Reconheço o uso do ChatGPT (OpenAI, versão GPT-5.3) como ferramenta de apoio para identificação de pontos de melhoria no estilo de escrita e para correção gramatical ao longo da elaboração deste trabalho.

Declaro que todo o conteúdo gerado com o auxílio dessa ferramenta foi cuidadosamente revisado, ajustado e validado por mim. Assumo total responsabilidade pela precisão, integridade e originalidade das informações apresentadas neste documento.



## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F. F. M.; BRITO NEVES, B. B.; FUCK, R. A. Distribuição regional e relações tectônicas do magmatismo pós-paleozóico no Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 16, n. 4, p. 325–349, 1986.

ALMEIDA, F. F. M.; BRITO NEVES, B. B.; FUCK, R. A. Magmatismo pós-paleozóico no Nordeste Oriental do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 18, n. 4, p. 451–462, 1988.

ALMEIDA, F. F. M.; BRITO NEVES, B. B.; FUCK, R. A. The origin and evolution of the South American Platform. **Earth-Science Reviews**, v. 50, p. 77–111, 2000.

ALMEIDA, F. F. M.; BRITO NEVES, B. B.; FUCK, R. A. Magmatismo pós-paleozóico no Brasil. In: HASUI, Y. (org.). *Geologia do Brasil*. São Paulo: Beca, 2012. cap. 18, p. 430–452.

ARAÚJO, M. G. S. et al. Idades  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  do magmatismo básico meso-cenozóico da Província Borborema Oriental, nordeste do Brasil. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 19., 2001, Natal. *Resumos*. Natal: SBG, 2001. p. 260–261.

ARTHAUD, Michel Henri. Evolução neoproterozóica do Grupo Ceará (Domínio Ceará Central, NE Brasil): da sedimentação à colisão continental brasileira. 2007. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

ARTHAUD, M. H. et al. The Neoproterozoic Ceará Group, Ceará Central Domain, NE Brazil: depositional age and provenance of detrital material. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 58, p. 223–237, 2015.

ASSUNÇÃO, M. et al. Intraplate seismicity in SE Brazil: stress concentration in lithospheric thin spots. **Geophysical Journal International**, v. 159, p. 390–399, 2004.

AZEVEDO, Murilo C. de. 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. 2021. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2021.

AZEVEDO, M. C. et al. Thermochronology and exhumation history of the basement and plutonic rocks of the Borborema Province, Brazil. **SSRN ePapers**, 2025. Preprint. Disponível em: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=5248419](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=5248419). Acesso em: 10 jan. 2026.

BELLINI, G. et al. Evidence of magmatic activity related to Middle Jurassic and Lower Cretaceous rifting from northeastern Brazil (Ceará-Mirim). **Chemical Geology**, v. 97, p. 9–32, 1992.

BEZERRA, F. H. R. et al. Review of active faults in the Borborema Province, intraplate South America. **Tectonophysics**, v. 510, p. 269–290, 2011.

- BIONDI, J. C. Brazilian mineral deposits associated with alkaline and alkaline-carbonate complexes. In: COMIN-CHIARAMONTI, P.; GOMES, C. B. (eds.). *Mesozoic to Cenozoic alkaline magmatism in the Brazilian Platform*. São Paulo: FAPESP-EDUSP, 2005. p. 707–750.
- BIZZI, L. A. et al. *Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil*. Brasília: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2000.
- BOYCE, J. W. et al. He diffusion in monazite: Implications for (U–Th)/He thermochronometry. **Geochemistry, Geophysics, Geosystems**, v. 6, n. 12, 2005.
- BROD, J. A. et al. The Late-Cretaceous Goiás Alkaline Province (GAP), Central Brazil. In: COMIN-CHIARAMONTI, P.; GOMES, C. B. (eds.). *Mesozoic to Cenozoic alkaline magmatism in the Brazilian Platform*. São Paulo: FAPESP-EDUSP, 2005. p. 261–316.
- CARLSON, W. D.; DONELICK, R. A.; KETCHAM, R. A. Variability of apatite fission track annealing kinetics. **American Mineralogist**, v. 84, n. 9, p. 1213–1223, 1999.
- CARTER, A.; MOSS, S. J. Combined detrital zircon fission track and U–Pb dating. **Geology**, v. 27, n. 3, p. 235–238, 1999.
- CASTRO, Neivaldo Araujo de. Evolução geológica proterozóica da região entre Madalena e Tapera, domínio tectônico Ceará Central (Província Borborema). 2005.
- CAXITO, F. D. A. et al. Toward an integrated model of geological evolution for NE Brazil–NW Africa. **Brazilian Journal of Geology**, v. 50, n. 2, e20190087, 2020.
- CHADDERTON, L. T. Nuclear tracks in solids: registration physics and the compound spike. **Radiation Measurements**, v. 36, n. 1–6, p. 13–34, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1350-4487\(03\)00094-5](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(03)00094-5).
- CHADDERTON, L. T.; TORRENS, I. M. *Fission damage in crystals*. London: Methuen, 1969.
- CHEW, D. M.; DONELICK, R. A. Combined apatite fission track and U–Pb dating by LA ICP-MS. In: SYLVESTER, P. (org.). *Quantitative Mineralogy and Microanalysis of Sediments and Sedimentary Rocks*. Vancouver: Mineralogical Association of Canada, 2012. v. 42, p. 219–247.
- CLEMENS, J. D. Granitic magmas with I-type affinities. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, v. 173, n. 11, p. 1–20, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00410-018-1520-z>.
- CORDANI, U. G. Idade do vulcanismo no Oceano Atlântico Sul. 1968. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1968.
- CURVO, E. A. C. et al. Zircon fission track and U–Pb dating methods. **Radiation Measurements**, v. 50, p. 172–180, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2005.06.014>.

DANTAS, E. L. et al. The 3.4–3.5 Ga São José do Campestre massif. **Precambrian Research**, v. 130, p. 113–137, 2004.

DIAS, A. N. C. Análise integrada pelo método U–Pb e traços de fissão em zircão. 2012. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

DIAS, A. N. C. et al. A new approach for electronmicroprobezirconfission track thermochronology. **Chemical Geology**, v. 459, p. 129–136, 2017.

DONELICK, R. A.; O’SULLIVAN, P. B.; KETCHAM, R. A. Apatitefission track analysis. In: REINERS, P. W.; EHLERS, T. A. (org.). *LowTemperatureThermochronology: Techniques, InterpretationsandApplications. Reviews in MineralogyandGeochemistry*, v. 58, p. 49–94, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1515/9781501509575-005>.

FAYON, A. An assessment ofthefeasibilityof monazite as a fission track thermochronometer. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THERMOCHRONOLOGY, 11., 2008. *Anais...* [S.l.: s.n.], 2008. p. 71–72.

FAYON, A. K. Fission track datingof monazite: etchingefficiencies as a functionof U content. In: GSA ANNUAL MEETING, 2011. *Anais...* [S.l.: s.n.], 2011. p. 331.

FAYON, A. K.; BAIRD, G. No nukes: determiningfission track ages fromelectronmicroprobeanalysis. **Geological Society of America Abstracts withPrograms**, v. 37, p. 199, 2005.

FARLEY, K. A.; STOCKLI, D. F. (U–Th)/He datingofphosphates: Apatite, monazite, andxenotime. **Reviews in MineralogyandGeochemistry**, v. 48, n. 1, p. 559–577, 2002.

FLEISCHER, R. L.; PRICE, P. B.; WALKER, R. M. Solid-state track detectors: applicationsto nuclear scienceandgeophysics. **Annual Review of Nuclear Science**, v. 15, n. 1, p. 1–28, 1965.

FLEISCHER, R. L.; PRICE, P. B.; WALKER, R. M. *Nuclear tracks in solids: principlesandapplications*. Berkeley: Universityof California Press, 1975.

GALLAGHER, K. Transdimensionalinversethermalhistorymodeling for quantitativethermochronology. **JournalofGeophysicalResearch: Solid Earth**, v. 117, n. B2, 2012.

GALLAGHER, K.; BROWN, R.; JOHNSON, C. Fission track analysisand its applications. **Annual Review of Earth andPlanetarySciences**, v. 26, p. 519–572, 1998.

GLEADOW, A. J. W. et al. Confinedfission track lengths in apatite: a diagnostic tool for thermalhistoryanalysis. **ContributionstoMineralogyandPetrology**, v. 94, p. 405–415, 1986. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00376334>.

GLEADOW, A. J. W. et al. Fission track datingofphosphatemineralsandthethermochronologyofapatite. **Reviews in MineralogyandGeochemistry**, v. 48, n. 1, p. 579–630, 2002. DOI: <https://doi.org/10.2138/rmg.2002.48.16>.

- GOMBOSI, D. J.; GARVER, J. I.; BALDWIN, S. L. On the development of electron microprobe zircon fission track geochronology. **Chemical Geology**, v. 363, p. 312–321, 2014.
- GREEN, P. F. et al. Thermal annealing of fission tracks in apatite. **Chemical Geology**, v. 59, p. 237–253, 1986.
- GUEDES, S. et al. Kinetic model for the annealing of fission tracks in zircon. **Radiation Measurements**, v. 40, n. 2–6, p. 517–521, 2005.
- HASEBE, N. et al. Apatite fission track chronometry using laser ablation ICP-MS. **Chemical Geology**, v. 207, p. 135–145, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.01.007>.
- HURFORD, A. J.; GREEN, P. F. A users' guide to fission track dating calibration. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 59, n. 2, p. 343–354, 1982.
- JEPSON, G. et al. Monazite fission track dating of the Catalina metamorphic core complex, AZ, USA. **Authorea Preprints**, 2022.
- JEPSON, G. et al. An assessment of monazite fission track thermochronology as a proxy for low magnitude cooling, Catalina Rincon Metamorphic Core Complex, AZ, USA. **Geochemistry, Geophysics, Geosystems**, v. 26, n. 4, p. e2024GC011881, 2025.
- JONES, S. et al. Etching of fission tracks in monazite: an experimental study. **Terra Nova**, v. 31, n. 3, p. 179–188, 2019.
- JONES, S.; GLEADOW, A.; KOHN, B. Thermal annealing of implanted  $^{252}\text{Cf}$  fission tracks in monazite. **Geochronology**, v. 3, n. 1, p. 89–102, 2021.
- JONES, S.; KOHN, B.; GLEADOW, A. Etching of fission tracks in monazite: further evidence from optical and focused ion beam scanning electron microscopy. **American Mineralogist**, v. 107, n. 6, p. 1065–1073, 2022.
- JONES, S. et al. Low-temperature thermochronology of Ryoke belt granitoids, SW Japan: new insights into the recent cooling history from monazite fission-track dating. **Tectonophysics**, v. 864, p. 229998, 2023.
- KETCHAM, R. A. et al. Improved measurement of fission track annealing in apatite using c-axis projection. **American Mineralogist**, v. 92, p. 789–798, 2007. DOI: <https://doi.org/10.2138/am.2007.2280>.
- KETCHAM, R. A. Fission track annealing: from geologic observation to thermal history modeling. In: REINERS, P. W.; EHLERS, T. A. (org.). *Low temperature thermochronology: techniques, interpretations, and applications*. Cambridge: Cambridge University Press, 2019. p. 101–122.
- LI, W. et al. Effect of orientation on ion track formation in apatite and zircon. **American Mineralogist**, v. 99, n. 5–6, p. 1127–1132, 2014.
- LI, W. et al. Alpha-decay induced shortening of fission tracks simulated by in situ ion irradiation. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 299, p. 1–14, 2021.

LIMA, Maria da Guia. A história do intemperismo na Província Borborema Oriental, Nordeste do Brasil: implicações paleoclimáticas e tectônicas. 2008.

LUDWIG, K. R. *ISOPLOT 3.00: a geochronological toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley, California: Berkeley Geochronology Center, 2003. (Berkeley Geochronology Center Special Publication, v. 39).

MANSOUR, S. et al. Combined zircon/apatite U–Pb and fission track dating by LA ICP-MS and its geological applications: an example from the Egyptian Younger Granites. **Minerals**, Basel, v. 11, n. 5, p. 1–23, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/min11050478>.

MOJZESZOWICZ, Andrew George. Evolução da tectônica rúptil no Nordeste do Brasil baseada na termocronologia por traço de fissão em apatita. 2009.

MONTEL, Jean Marc et al. Electron microprobe dating of monazite. **Chemical Geology**, v. 131, n. 1–4, p. 37–53, 1996.

MONTEL, Jean-Marc et al. Monazite from mountain to ocean: a case study from Trolognaro (Fort-Dauphin), Madagascar. **European Journal of Mineralogy**, v. 23, n. 5, p. 745–757, 2011.

MOREIRA, P. A. F. P. et al. Molecular Dynamics simulation of track formation at different ensembles. **Radiation Measurements**, v. 48, p. 68–72, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2012.11.014>.

PARRISH, R. R. U–Pb dating of monazite and its application to geological problems. **Canadian Journal of Earth Sciences**, v. 27, n. 11, p. 1431–1450, 1990.

REINERS, P. W.; BRANDON, M. T. Using thermochronology to understand orogenic erosion. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 34, p. 419–466, 2006.

SANTOS, Francisco L. de A. et al. Termocronologia aplicada à evolução geomorfológica do Nordeste setentrional do Brasil: uma breve revisão. In: SANTOS, Francisco L. de A. (org.). *Evolução morfoestrutural do Planalto da Ibiapaba (CE/PI) e Noroeste do Ceará, Brasil: interpretações a partir da termocronologia de baixa temperatura*. Fortaleza: UFC, 2022. p. 157–176.

SEYDOUX GUILLAUME, Anne Magali et al. An XRD, TEM and Raman study of experimentally annealed natural monazite. **Physics and Chemistry of Minerals**, v. 29, p. 240–253, 2002.

SEYDOUX GUILLAUME, Anne Magali; GONCALVES, P.; WIRTH, R.; DEUTSCH, A. Transmission electron microscope study of polyphase and discordant monazites: site specific specimen preparation using the focused ion beam technique. **Geology**, v. 31, n. 11, p. 973–976, 2003.

SEYDOUX GUILLAUME, Anne Magali et al. Why natural monazite never becomes amorphous: experimental evidence for alpha self healing. **American Mineralogist**, v. 103, n. 5, p. 824–827, 2018.

SHIPLEY, N.; FAYON, A. Vanishing act: experiments on fission track annealing in monazite. **EOS Transactions, American Geophysical Union**, v. 87, n. 52, 2006.

SHISHIKURA, Ai. Fission-track dating method in monazite: development of a low-temperature thermochronometer. In: JAPAN GEOSCIENCE UNION MEETING, 2018. *Anais...* 2018.

SOARES, C. J. et al. Novel calibration for LA-ICP-MS-based fission-track thermochronology. **Physics and Chemistry of Minerals**, v. 41, n. 1, p. 65–73, 2014.

SPADAVECCHIA, A.; HAHN, B. Die Rotationskammer und einige Anwendungen. **Helvetica Physica Acta**, v. 40, p. 1063–1079, 1967.

SULLIVAN, C. J. *Record 1947/10: Geology and mineral resources of the Murray Valley Region*. Canberra: Bureau of Mineral Resources, Geology and Geophysics, 1947.

URE, A. Annealing characteristics of fission tracks in monazite: application of a new method for performing thermal annealing experiments using implanted Cf-252 fission fragment semi-tracks. 2010. Dissertação (Bacharelado em Ciências) – The University of Melbourne, Victoria, 2010.

VAN SCHMUS, William Randall; KOZUCH, Marianne; DE BRITO NEVES, B. B. Precambrian history of the Zona Transversal of the Borborema Province, NE Brazil: insights from Sm–Nd and U–Pb geochronology. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 31, n. 2–3, p. 227–252, 2011.

VERMEESCH, P. RadialPlotter: a Java application for fission track, luminescence and other radial plots. **Radiation Measurements**, v. 44, n. 4, p. 409–410, 2009.

WAGNER, G. A.; VAN DEN HAUTE, P. *Fission track dating*. 2. ed. Stuttgart: Kluwer Academic Publishers, 1992. (Solid Earth Sciences Library). DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-011-2478-2>.

WEISE, C. et al. Annealing kinetics of Kr tracks in monazite: implications for fission track modelling. **Chemical Geology**, v. 260, p. 129–137, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.12.014>.

YAMADA, R. et al. Annealing kinetics of fission tracks in zircon: an experimental study. 1996.

## APÊNDICE A

Neste apêndice, são apresentados os trabalhos que aplicaram a FT em monazita. A Tabela A1 reúne as principais informações obtidas, incluindo a área de procedência das amostras, a litologia, os teores de U determinados por análise, a densidade de traços ( $\rho$ ), bem como as idades MFT calculadas.

**Tabela A1:** Idades MFT obtidas em artigos desde 1970.

| Área de estudo                                                                | Litologia                                         | U (wt%)       | $\rho$ (*10 <sup>6</sup> traços/<br>cm <sup>2</sup> ) | Idade (Ma)  | Referência                            |
|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------|-------------------------------------------------------|-------------|---------------------------------------|
| <b>Akshatau<br/>(Casaquistão)</b>                                             | Veios de quartzo                                  | 0.073 – 0,075 | 14,2 – 14,5                                           | 25,4 – 26,1 | Shukoljukov<br>e<br>Komarov<br>(1970) |
| <b>Cleveland, Carolina<br/>do Norte (EUA)</b>                                 | Quartzo<br>monzonito                              | 0,3 – 0,8     | -                                                     | 1 – 1,5     | Fayon<br>(2008)                       |
| <b>Complexo núcleo<br/>metamórfico de<br/>Catalina, Arizona<br/>(EUA)</b>     | -                                                 | -             | -                                                     | 6,1 ± 0,4   | Jepson et al.<br>(2022)               |
| <b>Complexo núcleo<br/>metamórfico<br/>Catalina-Rincon,<br/>Arizona (EUA)</b> | Granito Oracle e<br>Suíte Granítica<br>Wilderness | -             | -                                                     | 1,5 – 8,1   | Jepson et al.<br>(2025)               |
| <b>Yamaguchi (Japão)</b>                                                      | Granito<br>Shimonkuhara                           | 0,4 ± 0,1     | 6,88                                                  | 2,9 ± 0,2   | Jones et al.<br>(2023)                |
|                                                                               | Granito Namera                                    | 0,6 ± 0,5     | 5,65                                                  | 2,1 ± 0,3   | Jones et al.<br>(2023)                |
|                                                                               | Granito Kibe                                      | 0,6 ± 0,1     | 8,14                                                  | 2,7 ± 0,1   | Jones et al.<br>(2023)                |
|                                                                               | Intrusão de<br>Microgranito                       | 0,5 ± 0,1     | 7,00                                                  | 2,6 ± 0,1   | Jones et al.<br>(2023)                |
| <b>Nara (Japão)</b>                                                           | Granito Sakawa                                    | 0,5 ± 0,1     | 4,39                                                  | 1,7 ± 0,1   | Jones et al.<br>(2023)                |

## APÊNDICE B

Neste apêndice são apresentados os dados referentes aos conteúdos químicos obtidos por microanálise em sonda eletrônica (EPMA) para os grãos de monazita analisados. A Tabela B1 reúne os resultados das amostras internacionais, enquanto a Tabela B2 apresenta os dados correspondentes às amostras brasileiras.

**Tabela B1:** Conteúdos químicos dos óxidos, expressos em porcentagem em peso (wt %), obtidos por microanálise por sonda eletrônica (EPMA) em amostras de monazita provenientes da Austrália e do Japão.

| Amostra        | Elementos (wt%) |       |        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |        |       |        |        |
|----------------|-----------------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|
|                | SiO2            | Al2O3 | P2O5   | HfO2  | ZrO2  | CaO   | Er2O3 | Tm2O3 | Yb2O3 | Lu2O3 | PbO   | Sm2O3 | Gd2O3 | Tb2O3 | Dy2O3 | Y2O3  | ThO2  | UO2   | La2O3  | Ce2O3  | Pr2O3 | Nd2O3  | Total  |
| HARCOURT - G1  | 0.913           | 0.007 | 25.322 | 0.000 | 0.004 | 0.447 | 0.173 | 0.099 | 0.000 | 0.039 | 0.034 | 3.158 | 0.997 | 0.208 | 0.576 | 1.967 | 5.649 | 0.037 | 12.439 | 26.826 | 3.233 | 11.861 | 93.989 |
| HARCOURT - G2  | 0.309           | 0.000 | 26.020 | 0.223 | 0.081 | 1.006 | 0.121 | 0.039 | 0.000 | 0.069 | 0.000 | 2.310 | 0.299 | 0.143 | 0.158 | 1.222 | 5.522 | 0.014 | 13.369 | 27.476 | 3.337 | 12.379 | 94.097 |
| HARCOURT - G3  | 0.216           | 0.025 | 27.724 | 0.000 | 0.075 | 0.832 | 0.186 | 0.049 | 0.000 | 0.070 | 0.089 | 2.624 | 0.490 | 0.072 | 0.370 | 1.578 | 5.919 | 0.012 | 13.181 | 27.725 | 3.594 | 12.381 | 97.212 |
| HARCOURT - G4  | 0.447           | 0.012 | 24.358 | 0.022 | 0.012 | 0.534 | 0.138 | 0.025 | 0.041 | 0.052 | 0.093 | 2.638 | 0.457 | 0.194 | 0.383 | 1.950 | 5.413 | 0.015 | 13.195 | 27.775 | 3.313 | 11.709 | 92.776 |
| HARCOURT - G5  | 0.684           | 0.000 | 26.327 | 0.000 | 0.091 | 0.539 | 0.161 | 0.174 | 0.131 | 0.159 | 0.053 | 2.566 | 0.529 | 0.181 | 0.497 | 2.355 | 6.201 | 0.074 | 11.824 | 26.528 | 3.442 | 11.427 | 93.943 |
| HARCOURT - G6  | 0.101           | 0.024 | 25.861 | 0.038 | 0.077 | 0.735 | 0.187 | 0.091 | 0.000 | 0.025 | 0.000 | 2.713 | 0.670 | 0.065 | 0.510 | 2.073 | 5.580 | 0.013 | 12.956 | 27.272 | 3.447 | 12.025 | 94.463 |
| HARCOURT - G7  | 0.107           | 0.010 | 17.430 | 0.000 | 0.013 | 1.234 | 0.102 | 0.066 | 0.055 | 0.094 | 0.000 | 2.173 | 0.404 | 0.092 | 0.403 | 1.947 | 5.630 | 0.012 | 13.539 | 27.371 | 3.470 | 11.460 | 85.612 |
| HARCOURT - G8  | 0.026           | 0.008 | 23.340 | 0.000 | 0.000 | 0.799 | 0.155 | 0.017 | 0.000 | 0.135 | 0.000 | 2.163 | 0.363 | 0.052 | 0.377 | 1.572 | 4.763 | 0.012 | 10.850 | 20.326 | 2.577 | 9.505  | 77.040 |
| HARCOURT - G9  | 0.167           | 0.036 | 19.589 | 0.000 | 0.100 | 1.128 | 0.000 | 0.100 | 0.000 | 0.000 | 0.056 | 2.688 | 0.337 | 0.000 | 0.000 | 0.092 | 6.548 | 0.010 | 13.582 | 28.855 | 3.573 | 12.542 | 89.403 |
| HARCOURT - G10 | 0.141           | 0.022 | 26.524 | 0.200 | 0.019 | 0.920 | 0.073 | 0.028 | 0.000 | 0.053 | 0.032 | 3.211 | 1.021 | 0.093 | 0.514 | 1.856 | 4.794 | 0.010 | 12.008 | 27.570 | 3.718 | 12.932 | 95.739 |
| HARCOURT - G11 | 0.184           | 0.019 | 27.611 | 0.075 | 0.141 | 0.439 | 0.256 | 0.126 | 0.000 | 0.159 | 0.017 | 2.670 | 1.119 | 0.106 | 0.873 | 2.275 | 5.844 | 0.011 | 12.385 | 27.061 | 3.458 | 11.632 | 96.461 |
| HARCOURT - G12 | 0.447           | 0.000 | 11.914 | 0.000 | 0.109 | 0.601 | 0.116 | 0.187 | 0.057 | 0.105 | 0.000 | 2.494 | 0.626 | 0.000 | 0.383 | 1.032 | 5.228 | 0.008 | 13.384 | 28.305 | 3.572 | 12.822 | 81.390 |
| HARCOURT - G13 | 0.255           | 0.000 | 25.442 | 0.201 | 0.073 | 1.341 | 0.227 | 0.035 | 0.083 | 0.108 | 0.040 | 3.127 | 1.220 | 0.211 | 0.581 | 2.494 | 6.866 | 0.017 | 11.479 | 25.792 | 3.343 | 12.696 | 95.631 |
| HARCOURT - G14 | 1.079           | 0.173 | 28.285 | 0.060 | 0.051 | 1.191 | 0.134 | 0.134 | 0.066 | 0.082 | 0.000 | 2.751 | 1.238 | 0.162 | 0.904 | 3.236 | 6.197 | 0.009 | 11.829 | 25.099 | 3.183 | 11.463 | 97.326 |
| HARCOURT - G15 | 0.772           | 0.000 | 28.474 | 0.000 | 0.129 | 0.696 | 0.052 | 0.133 | 0.082 | 0.177 | 0.008 | 2.613 | 0.734 | 0.135 | 0.570 | 2.132 | 5.710 | 0.011 | 12.996 | 27.438 | 3.296 | 12.227 | 98.385 |
| HARCOURT - G16 | 0.667           | 0.000 | 27.314 | 0.000 | 0.186 | 0.597 | 0.047 | 0.034 | 0.022 | 0.057 | 0.033 | 2.479 | 0.854 | 0.200 | 0.447 | 2.108 | 6.856 | 0.012 | 12.472 | 26.137 | 3.343 | 11.198 | 95.063 |
| HARCOURT - G17 | 0.142           | 0.005 | 23.914 | 0.000 | 0.157 | 1.409 | 0.107 | 0.084 | 0.011 | 0.057 | 0.000 | 2.576 | 0.681 | 0.134 | 0.308 | 0.856 | 5.083 | 0.009 | 11.629 | 26.037 | 3.299 | 11.782 | 88.280 |
| HARCOURT - G18 | 0.561           | 0.049 | 28.240 | 0.195 | 0.071 | 0.505 | 0.122 | 0.049 | 0.000 | 0.196 | 0.000 | 3.187 | 1.111 | 0.231 | 0.599 | 1.993 | 4.802 | 0.006 | 12.111 | 27.644 | 3.572 | 12.148 | 97.392 |
| HARCOURT - G19 | 0.150           | 0.000 | 27.294 | 0.000 | 0.031 | 0.962 | 0.131 | 0.068 | 0.000 | 0.106 | 0.000 | 3.098 | 1.276 | 0.121 | 0.739 | 1.675 | 5.217 | 0.007 | 11.989 | 25.868 | 3.231 | 12.153 | 94.116 |
| HARCOURT - G20 | 0.462           | 0.000 | 24.944 | 0.000 | 0.114 | 0.697 | 0.041 | 0.054 | 0.000 | 0.028 | 0.019 | 2.122 | 0.440 | 0.072 | 0.232 | 1.015 | 6.440 | 0.009 | 13.576 | 27.815 | 3.288 | 11.238 | 92.606 |
| HARCOURT - G21 | 0.339           | 0.021 | 27.860 | 0.029 | 0.088 | 0.722 | 0.127 | 0.073 | 0.000 | 0.020 | 0.000 | 1.938 | 0.208 | 0.104 | 0.507 | 1.498 | 3.194 | 0.007 | 14.734 | 29.545 | 3.475 | 10.905 | 95.394 |
| HARCOURT - G22 | 0.153           | 0.000 | 27.590 | 0.000 | 0.111 | 0.943 | 0.000 | 0.063 | 0.000 | 0.055 | 0.000 | 2.393 | 0.540 | 0.075 | 0.164 | 0.423 | 5.447 | 0.005 | 13.688 | 28.588 | 3.502 | 11.717 | 95.457 |
| HARCOURT - G23 | 0.711           | 0.057 | 27.337 | 0.080 | 0.134 | 0.629 | 0.221 | 0.177 | 0.027 | 0.067 | 0.000 | 2.826 | 1.070 | 0.197 | 0.571 | 1.784 | 4.076 | 0.004 | 12.458 | 28.620 | 3.598 | 12.829 | 97.473 |
| HARCOURT - G24 | 0.531           | 0.015 | 27.767 | 0.002 | 0.123 | 0.613 | 0.089 | 0.112 | 0.010 | 0.010 | 0.063 | 2.064 | 0.534 | 0.161 | 0.573 | 1.070 | 4.359 | 0.010 | 12.451 | 26.699 | 3.298 | 11.150 | 91.704 |
| HARCOURT - G25 | 0.280           | 0.000 | 26.743 | 0.000 | 0.000 | 0.903 | 0.105 | 0.072 | 0.000 | 0.029 | 0.000 | 2.278 | 0.725 | 0.085 | 0.169 | 1.052 | 5.255 | 0.015 | 13.636 | 28.603 | 3.756 | 12.715 | 96.421 |
| HARCOURT - G26 | 0.429           | 0.009 | 27.202 | 0.037 | 0.098 | 1.111 | 0.057 | 0.054 | 0.000 | 0.000 | 0.064 | 1.696 | 0.229 | 0.020 | 0.211 | 0.778 | 7.243 | 0.006 | 14.803 | 28.780 | 3.281 | 10.920 | 97.028 |
| HARCOURT - G27 | 0.369           | 0.000 | 28.194 | 0.067 | 0.030 | 0.637 | 0.200 | 0.012 | 0.016 | 0.000 | 0.000 | 2.989 | 1.125 | 0.175 | 0.497 | 1.880 | 4.543 | 0.005 | 12.323 | 28.534 | 3.618 | 12.935 | 98.149 |
| HARCOURT - G28 | 0.945           | 0.000 | 29.190 | 0.000 | 0.093 | 0.724 | 0.204 | 0.082 | 0.028 | 0.060 | 0.000 | 2.383 | 0.986 | 0.081 | 0.577 | 1.854 | 8.194 | 0.022 | 11.902 | 26.044 | 3.431 | 11.999 | 98.799 |
| HARCOURT - G29 | 0.413           | 0.018 | 26.974 | 0.045 | 0.226 | 0.700 | 0.000 | 0.033 | 0.000 | 0.072 | 0.064 | 1.853 | 0.393 | 0.085 | 0.208 | 0.752 | 5.269 | 0.006 | 14.774 | 30.041 | 3.553 | 11.835 | 97.314 |
| HARCOURT - G30 | 0.269           | 0.007 | 26.978 | 0.097 | 0.000 | 0.598 | 0.166 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.035 | 2.038 | 0.403 | 0.174 | 0.283 | 1.348 | 3.269 | 0.004 | 15.362 | 30.820 | 3.575 | 11.376 | 96.802 |
| HARCOURT - G31 | 0.228           | 0.000 | 28.441 | 0.275 | 0.203 | 1.566 | 0.046 | 0.000 | 0.000 | 0.072 | 0.011 | 0.640 | 0.321 | 0.029 | 0.022 | 0.212 | 0.944 | 0.015 | 10.895 | 25.345 | 3.282 | 11.241 | 83.788 |
| HARCOURT - G32 | 1.369           | 0.065 | 28.830 | 0.052 | 0.065 | 0.556 | 0.170 | 0.021 | 0.000 | 0.083 | 0.053 | 2.406 | 0.898 | 0.173 | 0.324 | 1.169 | 6.105 | 0.019 | 12.780 | 27.648 | 3.395 | 11.834 | 98.015 |
| HARCOURT - G33 | 0.090           | 0.000 | 18.410 | 0.000 | 0.132 | 1.171 | 0.090 | 0.013 | 0.000 | 0.006 | 0.000 | 3.411 | 1.010 | 0.103 | 0.275 | 1.125 | 5.049 | 0.011 | 12.159 | 27.843 | 3.608 | 13.684 | 88.190 |
| HARCOURT - G34 | 0.358           | 0.023 | 28.248 | 0.097 | 0.017 | 0.895 | 0.285 | 0.107 | 0.000 | 0.000 | 0.040 | 2.379 | 1.007 | 0.135 | 0.543 | 1.980 | 5.581 | 0.011 | 12.683 | 27.142 | 3.272 | 11.361 | 96.164 |
| HARCOURT - G35 | 0.000           | 0.000 | 18.737 | 0.000 | 0.077 | 0.706 | 0.178 | 0.116 | 0.002 | 0.028 | 1.017 | 2.611 | 1.273 | 0.123 | 0.584 | 1.352 | 4.691 | 0.009 | 12.477 | 27.406 | 3.420 | 12.264 | 87.071 |



|                |        |       |        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |        |       |        |         |
|----------------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|---------|
| HARCOURT - G36 | 81,721 | 2,137 | 26,275 | 0,000 | 0,000 | 0,133 | 0,212 | 0,084 | 0,042 | 0,111 | 0,000 | 2,360 | 0,919 | 0,008 | 0,753 | 1,822 | 6,577 | 0,012 | 12,769 | 27,228 | 3,270 | 11,475 | 177,908 |
| HARCOURT - G37 | 0,585  | 0,000 | 1,399  | 0,000 | 0,000 | 0,862 | 0,190 | 0,016 | 0,000 | 0,006 | 0,123 | 2,149 | 0,922 | 0,113 | 0,548 | 1,511 | 8,004 | 0,030 | 12,781 | 27,254 | 3,358 | 11,911 | 71,762  |
| HARCOURT - G38 | 0,256  | 0,011 | 26,945 | 0,000 | 0,096 | 1,124 | 0,135 | 0,025 | 0,038 | 0,142 | 0,000 | 2,878 | 1,424 | 0,218 | 0,661 | 2,117 | 5,834 | 0,011 | 12,214 | 26,786 | 3,314 | 12,102 | 96,331  |
| HARCOURT - G39 | 0,515  | 0,024 | 28,218 | 0,000 | 0,005 | 0,629 | 0,133 | 0,052 | 0,000 | 0,093 | 0,000 | 2,224 | 0,396 | 0,072 | 0,281 | 0,800 | 4,522 | 0,006 | 14,348 | 29,090 | 3,558 | 12,275 | 97,241  |
| HARCOURT - G40 | 0,630  | 0,008 | 20,102 | 0,148 | 0,024 | 0,457 | 0,020 | 0,042 | 0,000 | 0,054 | 0,000 | 2,140 | 0,495 | 0,148 | 0,358 | 1,196 | 4,618 | 0,009 | 14,165 | 29,677 | 3,476 | 11,585 | 89,352  |
| HARCOURT - G41 | 0,320  | 0,000 | 28,417 | 0,030 | 0,025 | 0,920 | 0,175 | 0,000 | 0,010 | 0,071 | 0,000 | 2,580 | 0,758 | 0,137 | 0,266 | 0,869 | 6,075 | 0,004 | 13,246 | 28,030 | 3,530 | 12,404 | 97,867  |
| HARCOURT - G42 | 0,214  | 0,021 | 25,402 | 0,059 | 0,000 | 0,798 | 0,138 | 0,114 | 0,000 | 0,000 | 0,051 | 2,019 | 0,606 | 0,054 | 0,293 | 0,965 | 4,323 | 0,005 | 14,511 | 29,288 | 3,579 | 12,298 | 94,738  |
| HARCOURT - G43 | 0,243  | 0,000 | 26,060 | 0,038 | 0,000 | 1,000 | 0,028 | 0,118 | 0,011 | 0,049 | 0,087 | 2,389 | 0,741 | 0,083 | 0,469 | 0,971 | 6,049 | 0,006 | 12,995 | 28,247 | 3,623 | 13,018 | 96,225  |
| HARCOURT - G44 | 0,960  | 0,013 | 29,610 | 0,000 | 0,000 | 0,806 | 0,061 | 0,053 | 0,074 | 0,127 | 0,022 | 2,522 | 0,769 | 0,145 | 0,593 | 1,898 | 7,443 | 0,041 | 11,406 | 24,762 | 3,222 | 11,239 | 95,766  |
| HARCOURT - G45 | 0,326  | 0,000 | 25,105 | 0,156 | 0,004 | 1,119 | 0,087 | 0,103 | 0,005 | 0,038 | 0,023 | 2,951 | 0,956 | 0,151 | 0,414 | 1,410 | 7,532 | 0,056 | 10,859 | 26,691 | 3,444 | 12,048 | 93,478  |
| HARCOURT - G46 | 0,631  | 0,009 | 27,709 | 0,000 | 0,080 | 0,766 | 0,161 | 0,060 | 0,076 | 0,060 | 0,106 | 2,954 | 0,942 | 0,041 | 0,610 | 1,484 | 8,351 | 0,010 | 10,237 | 26,482 | 3,523 | 11,724 | 96,016  |
| HARCOURT - G47 | 0,670  | 0,000 | 25,480 | 0,097 | 0,171 | 0,653 | 0,156 | 0,066 | 0,000 | 0,076 | 0,000 | 2,922 | 1,118 | 0,210 | 0,669 | 1,760 | 5,963 | 0,015 | 11,498 | 27,558 | 3,573 | 12,097 | 94,752  |
| HARCOURT - G48 | 0,225  | 0,000 | 28,668 | 0,000 | 0,176 | 0,682 | 0,000 | 0,073 | 0,037 | 0,060 | 0,083 | 2,892 | 1,274 | 0,187 | 0,693 | 1,423 | 7,327 | 0,017 | 11,984 | 25,702 | 3,334 | 11,290 | 96,127  |
| HARCOURT - G49 | 0,490  | 0,024 | 27,895 | 0,000 | 0,121 | 1,194 | 0,039 | 0,000 | 0,000 | 0,108 | 0,000 | 2,180 | 0,435 | 0,116 | 0,238 | 0,842 | 6,446 | 0,005 | 13,948 | 29,278 | 3,410 | 11,663 | 98,432  |
|                | 2,084  | 0,058 | 25,341 | 0,047 | 0,074 | 0,821 | 0,122 | 0,068 | 0,019 | 0,067 | 0,047 | 2,498 | 0,762 | 0,120 | 0,444 | 1,485 | 5,644 | 0,014 | 12,753 | 27,401 | 3,420 | 11,908 |         |

| Amostra        | Elementos (wt%) |       |        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |       |        |        |       |        |         |
|----------------|-----------------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|---------|
|                | SiO2            | Al2O3 | P2O5   | HfO2  | ZrO2  | CaO   | Er2O3 | Tm2O3 | Yb2O3 | Lu2O3 | PbO   | Sm2O3 | Gd2O3 | Tb2O3 | Dy2O3 | Y2O3  | ThO2   | UO2   | La2O3  | Ce2O3  | Pr2O3 | Nd2O3  | Total   |
| ELDORADO - G1  | 0.840           | 0.010 | 27.943 | 0.133 | 0.030 | 1.841 | 0.187 | 0.081 | 0.081 | 0.183 | 0.035 | 3.988 | 2.054 | 0.198 | 1.061 | 1.957 | 11.070 | 0.077 | 6.874  | 23.326 | 3.508 | 11.894 | 97.371  |
| ELDORADO - G3  | 0.225           | 0.011 | 28.879 | 0.045 | 0.085 | 1.331 | 0.096 | 0.059 | 0.011 | 0.003 | 0.013 | 2.898 | 1.267 | 0.016 | 0.127 | 0.565 | 7.319  | 0.000 | 12.547 | 27.525 | 3.665 | 12.142 | 98.829  |
| ELDORADO - G4  | 0.655           | 0.016 | 27.559 | 0.000 | 0.000 | 1.953 | 0.067 | 0.033 | 0.000 | 0.000 | 0.040 | 1.947 | 0.853 | 0.098 | 0.321 | 0.827 | 5.056  | 0.011 | 2.897  | 11.735 | 2.034 | 7.466  | 63.568  |
| ELDORADO - G5  | 0.968           | 0.072 | 24.252 | 0.067 | 0.061 | 1.325 | 0.127 | 0.217 | 0.081 | 0.070 | 0.064 | 4.154 | 1.757 | 0.251 | 0.853 | 1.639 | 7.902  | 0.010 | 7.236  | 25.183 | 3.787 | 12.874 | 92.950  |
| ELDORADO - G6  | 2.026           | 0.402 | 28.158 | 0.000 | 0.000 | 0.773 | 0.065 | 0.164 | 0.007 | 0.000 | 0.106 | 3.912 | 1.501 | 0.195 | 0.785 | 1.278 | 9.148  | 0.029 | 8.975  | 25.811 | 3.698 | 12.744 | 99.777  |
| ELDORADO - G7  | 1.204           | 0.176 | 25.325 | 0.000 | 0.028 | 1.555 | 0.117 | 0.241 | 0.056 | 0.099 | 0.118 | 5.786 | 1.882 | 0.254 | 0.498 | 1.383 | 11.836 | 0.038 | 4.137  | 21.014 | 4.232 | 15.696 | 95.675  |
| ELDORADO - G8  | 1.067           | 0.227 | 26.914 | 0.075 | 0.155 | 1.111 | 0.159 | 0.042 | 0.016 | 0.149 | 0.000 | 4.154 | 1.708 | 0.245 | 1.045 | 1.842 | 9.268  | 0.000 | 8.907  | 24.622 | 3.666 | 12.103 | 97.475  |
| ELDORADO - G9  | 0.288           | 0.000 | 25.823 | 0.000 | 0.035 | 0.512 | 0.065 | 0.074 | 0.000 | 0.126 | 0.076 | 3.853 | 1.444 | 0.231 | 0.642 | 1.539 | 3.154  | 0.016 | 9.391  | 28.306 | 4.263 | 12.984 | 92.822  |
| ELDORADO - G10 | 1.137           | 0.052 | 29.086 | 0.178 | 0.013 | 2.227 | 0.107 | 0.138 | 0.068 | 0.124 | 0.125 | 4.494 | 2.234 | 0.268 | 0.849 | 1.819 | 15.400 | 0.055 | 5.423  | 20.866 | 3.434 | 11.412 | 99.509  |
| ELDORADO - G11 | 0.542           | 0.002 | 27.336 | 0.000 | 0.118 | 1.524 | 0.114 | 0.133 | 0.000 | 0.138 | 0.041 | 4.379 | 1.639 | 0.163 | 0.692 | 1.024 | 9.605  | 0.000 | 7.096  | 22.496 | 3.399 | 11.372 | 91.813  |
| ELDORADO - G12 | 1.399           | 0.011 | 23.970 | 0.060 | 0.000 | 1.313 | 0.246 | 0.119 | 0.058 | 0.119 | 0.136 | 3.243 | 1.331 | 0.095 | 0.624 | 1.636 | 13.588 | 0.010 | 8.179  | 23.705 | 3.405 | 10.893 | 94.140  |
| ELDORADO - G13 | 1.279           | 0.001 | 25.958 | 0.014 | 0.129 | 1.712 | 0.216 | 0.016 | 0.000 | 0.033 | 0.000 | 4.342 | 1.859 | 0.148 | 0.934 | 1.685 | 13.225 | 0.018 | 6.426  | 23.748 | 3.872 | 12.220 | 97.835  |
| ELDORADO - G14 | 1.135           | 0.050 | 28.440 | 0.000 | 0.045 | 1.731 | 0.173 | 0.123 | 0.000 | 0.088 | 0.012 | 4.721 | 1.702 | 0.289 | 0.757 | 1.375 | 12.707 | 0.019 | 6.212  | 23.553 | 3.654 | 12.404 | 99.190  |
| ELDORADO - G15 | 0.958           | 0.057 | 29.386 | 0.000 | 0.000 | 0.845 | 0.155 | 0.079 | 0.101 | 0.160 | 0.084 | 3.816 | 1.622 | 0.265 | 1.012 | 2.083 | 7.964  | 0.019 | 8.977  | 25.532 | 3.651 | 12.500 | 99.266  |
| ELDORADO - G16 | 1.314           | 0.055 | 25.358 | 0.000 | 0.015 | 1.203 | 0.176 | 0.087 | 0.050 | 0.139 | 0.093 | 4.698 | 1.948 | 0.101 | 0.983 | 1.594 | 10.743 | 0.011 | 6.162  | 24.305 | 3.894 | 13.757 | 96.686  |
| ELDORADO - G17 | 0.704           | 0.038 | 27.056 | 0.000 | 0.020 | 0.807 | 0.130 | 0.066 | 0.000 | 0.114 | 0.000 | 3.118 | 1.079 | 0.188 | 0.444 | 1.292 | 6.136  | 0.009 | 10.917 | 28.472 | 3.809 | 12.114 | 96.513  |
| ELDORADO - G18 | 0.994           | 0.117 | 27.690 | 0.000 | 0.155 | 0.446 | 0.085 | 0.017 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.555 | 1.019 | 0.120 | 0.083 | 0.367 | 4.719  | 0.000 | 16.304 | 30.878 | 3.406 | 11.395 | 99.350  |
| ELDORADO - G19 | 0.223           | 0.000 | 29.257 | 0.023 | 0.000 | 0.589 | 0.155 | 0.132 | 0.000 | 0.074 | 0.028 | 4.665 | 1.432 | 0.221 | 0.825 | 1.362 | 3.538  | 0.011 | 8.940  | 28.816 | 4.162 | 13.700 | 98.153  |
| ELDORADO - G20 | 0.509           | 0.044 | 28.092 | 0.088 | 0.086 | 1.702 | 0.198 | 0.168 | 0.056 | 0.114 | 0.124 | 5.401 | 1.813 | 0.300 | 0.800 | 1.704 | 8.556  | 0.011 | 5.556  | 24.050 | 4.169 | 13.650 | 97.191  |
| ELDORADO - G21 | 1.578           | 0.021 | 28.278 | 0.038 | 0.095 | 1.763 | 0.187 | 0.134 | 0.000 | 0.082 | 0.000 | 3.697 | 1.635 | 0.220 | 0.853 | 1.748 | 15.393 | 0.016 | 7.030  | 22.374 | 3.360 | 11.307 | 99.809  |
| ELDORADO - G22 | 0.989           | 0.025 | 24.634 | 0.000 | 0.166 | 1.038 | 0.046 | 0.204 | 0.074 | 0.192 | 0.029 | 3.582 | 1.425 | 0.236 | 0.706 | 1.371 | 8.782  | 0.000 | 10.195 | 26.791 | 3.644 | 11.845 | 95.974  |
| ELDORADO - G23 | 0.077           | 0.000 | 27.815 | 0.000 | 0.221 | 1.315 | 0.111 | 0.050 | 0.000 | 0.089 | 0.000 | 2.477 | 1.020 | 0.209 | 0.567 | 1.725 | 5.520  | 0.013 | 12.606 | 27.443 | 3.449 | 11.622 | 96.329  |
| ELDORADO - G24 | 1.098           | 0.000 | 30.262 | 0.000 | 0.071 | 2.092 | 0.163 | 0.190 | 0.000 | 0.059 | 0.060 | 3.798 | 1.781 | 0.222 | 0.861 | 1.502 | 14.408 | 0.018 | 6.226  | 20.720 | 3.168 | 10.434 | 97.133  |
| ELDORADO - G25 | 0.673           | 0.029 | 28.278 | 0.000 | 0.000 | 0.426 | 0.075 | 0.139 | 0.084 | 0.035 | 0.002 | 3.517 | 1.283 | 0.126 | 0.762 | 1.487 | 4.428  | 0.008 | 10.764 | 29.399 | 4.173 | 13.030 | 98.718  |
| ELDORADO - G26 | 0.371           | 0.007 | 27.704 | 0.000 | 0.000 | 1.278 | 0.175 | 0.063 | 0.000 | 0.164 | 0.013 | 3.986 | 1.617 | 0.236 | 0.581 | 1.640 | 6.879  | 0.032 | 9.405  | 27.257 | 3.883 | 12.591 | 97.882  |
| ELDORADO - G27 | 0.983           | 0.030 | 28.308 | 0.000 | 0.000 | 2.026 | 0.169 | 0.181 | 0.019 | 0.083 | 0.159 | 4.402 | 1.927 | 0.337 | 1.112 | 1.847 | 14.890 | 0.067 | 6.200  | 21.200 | 3.372 | 11.364 | 98.676  |
| ELDORADO - G28 | 1.476           | 0.208 | 25.294 | 0.000 | 0.000 | 0.182 | 0.193 | 0.164 | 0.000 | 0.065 | 0.044 | 3.491 | 0.912 | 0.036 | 0.498 | 1.407 | 6.961  | 0.011 | 5.244  | 29.625 | 5.472 | 16.033 | 97.316  |
| ELDORADO - G29 | 0.359           | 0.050 | 24.246 | 0.074 | 0.128 | 0.980 | 0.105 | 0.088 | 0.060 | 0.000 | 0.023 | 3.225 | 1.188 | 0.071 | 0.603 | 1.181 | 5.499  | 0.000 | 11.347 | 28.522 | 3.559 | 12.277 | 93.585  |
| ELDORADO - G30 | 1.604           | 0.349 | 28.818 | 0.000 | 0.000 | 2.309 | 0.198 | 0.075 | 0.078 | 0.066 | 0.000 | 3.639 | 1.682 | 0.182 | 0.901 | 1.632 | 12.557 | 0.006 | 8.017  | 23.989 | 3.410 | 11.501 | 101.013 |
| ELDORADO - G31 | 1.317           | 0.019 | 27.382 | 0.044 | 0.000 | 0.840 | 0.124 | 0.069 | 0.043 | 0.174 | 0.064 | 3.777 | 1.393 | 0.124 | 0.621 | 1.456 | 8.751  | 0.013 | 8.424  | 25.334 | 3.703 | 12.063 | 95.735  |
| ELDORADO - G32 | 1.358           | 0.045 | 26.947 | 0.000 | 0.046 | 1.061 | 0.126 | 0.215 | 0.000 | 0.117 | 0.075 | 4.749 | 2.137 | 0.160 | 0.664 | 1.380 | 10.866 | 0.009 | 5.706  | 23.431 | 4.032 | 13.851 | 96.975  |
| ELDORADO - G33 | 0.813           | 0.020 | 21.720 | 0.000 | 0.055 | 1.236 | 0.192 | 0.200 | 0.051 | 0.055 | 0.139 | 4.982 | 2.337 | 0.288 | 1.066 | 1.851 | 10.185 | 0.019 | 5.912  | 23.788 | 4.075 | 13.366 | 92.350  |
| ELDORADO - G34 | 0.459           | 0.000 | 21.571 | 0.000 | 0.287 | 0.526 | 0.064 | 0.072 | 0.000 | 0.000 | 0.066 | 1.806 | 0.679 | 0.233 | 0.160 | 0.931 | 5.517  | 0.000 | 14.137 | 29.100 | 3.274 | 11.229 | 90.111  |
| ELDORADO - G35 | 1.086           | 0.013 | 29.276 | 0.039 | 0.114 | 2.106 | 0.089 | 0.164 | 0.050 | 0.190 | 0.182 | 4.460 | 1.968 | 0.299 | 0.814 | 1.771 | 15.965 | 0.057 | 5.764  | 21.440 | 3.460 | 11.291 | 100.599 |

|                |       |       |        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |       |        |        |       |        |         |
|----------------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|---------|
| ELDORADO - G36 | 1,112 | 0,087 | 27,635 | 0,000 | 0,089 | 1,451 | 0,025 | 0,133 | 0,099 | 0,021 | 0,160 | 4,751 | 1,898 | 0,148 | 0,651 | 1,377 | 11,978 | 0,027 | 6,233  | 23,720 | 3,712 | 12,697 | 98,004  |
| ELDORADO - G37 | 0,102 | 0,080 | 26,980 | 0,000 | 0,000 | 1,588 | 0,167 | 0,034 | 0,067 | 0,014 | 0,119 | 2,674 | 1,345 | 0,206 | 0,872 | 1,903 | 5,635  | 0,017 | 12,301 | 27,147 | 3,563 | 11,899 | 96,713  |
| ELDORADO - G38 | 0,409 | 0,000 | 26,198 | 0,074 | 0,000 | 0,874 | 0,195 | 0,084 | 0,109 | 0,092 | 0,038 | 4,154 | 1,611 | 0,225 | 0,954 | 1,806 | 4,903  | 0,033 | 9,468  | 27,516 | 3,766 | 12,539 | 95,048  |
| ELDORADO - G39 | 1,346 | 0,019 | 29,353 | 0,008 | 0,034 | 1,493 | 0,220 | 0,075 | 0,034 | 0,110 | 0,067 | 4,557 | 1,626 | 0,056 | 0,611 | 1,163 | 10,330 | 0,008 | 6,871  | 25,656 | 3,893 | 13,114 | 100,644 |
| ELDORADO - G40 | 1,561 | 0,016 | 25,024 | 0,000 | 0,149 | 0,374 | 0,117 | 0,182 | 0,071 | 0,112 | 0,027 | 6,461 | 2,356 | 0,282 | 0,852 | 1,825 | 10,222 | 0,022 | 5,389  | 23,965 | 4,312 | 14,794 | 98,113  |
| ELDORADO - G41 | 1,187 | 0,035 | 25,898 | 0,044 | 0,039 | 2,389 | 0,111 | 0,100 | 0,058 | 0,098 | 0,069 | 4,194 | 1,701 | 0,287 | 0,775 | 1,735 | 16,160 | 0,021 | 5,841  | 20,203 | 3,192 | 10,517 | 94,654  |
| ELDORADO - G42 | 0,209 | 0,062 | 29,090 | 0,037 | 0,173 | 1,029 | 0,150 | 0,247 | 0,143 | 0,097 | 0,021 | 4,719 | 1,371 | 0,153 | 0,839 | 1,543 | 4,225  | 0,019 | 9,195  | 28,293 | 4,068 | 13,563 | 99,246  |
| ELDORADO - G43 | 0,275 | 0,024 | 28,567 | 0,044 | 0,150 | 1,229 | 0,187 | 0,167 | 0,007 | 0,061 | 0,000 | 3,872 | 1,251 | 0,213 | 0,649 | 1,626 | 5,419  | 0,010 | 10,012 | 27,748 | 3,946 | 12,691 | 98,148  |
| ELDORADO - G44 | 1,064 | 0,000 | 29,243 | 0,000 | 0,126 | 2,197 | 0,103 | 0,163 | 0,013 | 0,072 | 0,113 | 4,064 | 1,849 | 0,339 | 0,955 | 1,871 | 14,326 | 0,028 | 5,296  | 19,451 | 3,151 | 10,725 | 95,149  |
| ELDORADO - G45 | 1,078 | 0,022 | 24,116 | 0,000 | 0,055 | 1,698 | 0,087 | 0,113 | 0,003 | 0,078 | 0,156 | 3,980 | 1,748 | 0,152 | 0,738 | 1,794 | 12,115 | 0,025 | 6,603  | 23,582 | 3,828 | 12,353 | 94,324  |
|                | 0,910 | 0,057 | 27,025 | 0,025 | 0,068 | 1,318 | 0,137 | 0,120 | 0,037 | 0,088 | 0,062 | 3,958 | 1,588 | 0,197 | 0,727 | 1,512 | 9,383  | 0,019 | 8,076  | 24,810 | 3,708 | 12,319 |         |

| Amostra     | Elementos (wt%) |       |        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |       |        |        |       |        |         |
|-------------|-----------------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|---------|
|             | SiO2            | Al2O3 | P2O5   | HfO2  | ZrO2  | CaO   | Er2O3 | Tm2O3 | Yb2O3 | Lu2O3 | PbO   | Sm2O3 | Gd2O3 | Tb2O3 | Dy2O3 | Y2O3  | ThO2   | UO2   | La2O3  | Ce2O3  | Pr2O3 | Nd2O3  | Total   |
| NR24B - G1  | 0.845           | 0.000 | 26.400 | 0.000 | 0.107 | 0.708 | 0.192 | 0.093 | 0.089 | 0.001 | 0.034 | 2.183 | 0.567 | 0.137 | 0.504 | 1.949 | 6.705  | 0.104 | 13.333 | 28.167 | 3.253 | 10.865 | 96.236  |
| NR24B - G2  | 0.602           | 0.025 | 28.342 | 0.051 | 0.047 | 0.657 | 0.212 | 0.033 | 0.000 | 0.075 | 0.000 | 2.795 | 0.877 | 0.131 | 0.559 | 1.827 | 5.625  | 0.112 | 13.180 | 28.166 | 3.437 | 11.311 | 98.064  |
| NR24B - G3  | 0.694           | 0.018 | 28.061 | 0.000 | 0.077 | 0.778 | 0.172 | 0.080 | 0.101 | 0.095 | 0.000 | 2.156 | 0.512 | 0.117 | 0.591 | 2.064 | 5.123  | 0.097 | 13.610 | 28.774 | 3.286 | 11.002 | 97.408  |
| NR24B - G4  | 0.396           | 0.000 | 27.748 | 0.000 | 0.041 | 0.503 | 0.065 | 0.061 | 0.067 | 0.035 | 0.000 | 2.132 | 0.335 | 0.128 | 0.623 | 1.746 | 4.198  | 0.151 | 14.056 | 30.009 | 3.398 | 11.344 | 97.036  |
| NR24B - G5  | 0.555           | 0.000 | 28.562 | 0.000 | 0.066 | 0.663 | 0.174 | 0.000 | 0.037 | 0.016 | 0.000 | 2.351 | 0.652 | 0.132 | 0.449 | 1.151 | 5.374  | 0.064 | 13.711 | 29.017 | 3.418 | 11.246 | 97.638  |
| NR24B - G6  | 0.427           | 0.000 | 28.618 | 0.000 | 0.190 | 0.550 | 0.151 | 0.106 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 2.296 | 0.428 | 0.271 | 0.547 | 1.652 | 4.290  | 0.169 | 13.914 | 29.690 | 3.226 | 11.125 | 97.650  |
| NR24B - G7  | 0.437           | 0.006 | 28.492 | 0.000 | 0.043 | 0.651 | 0.218 | 0.017 | 0.000 | 0.076 | 0.000 | 2.141 | 0.763 | 0.182 | 0.551 | 1.675 | 5.206  | 0.104 | 13.682 | 28.749 | 3.273 | 11.052 | 97.318  |
| NR24B - G8  | 0.644           | 0.000 | 22.402 | 0.000 | 0.105 | 0.689 | 0.159 | 0.129 | 0.000 | 0.142 | 0.000 | 2.234 | 0.693 | 0.167 | 0.632 | 1.730 | 5.207  | 0.159 | 13.521 | 29.165 | 3.299 | 11.748 | 92.825  |
| NR24B - G9  | 0.722           | 0.000 | 29.719 | 0.045 | 0.105 | 0.447 | 0.147 | 0.065 | 0.000 | 0.039 | 0.000 | 2.010 | 0.223 | 0.080 | 0.494 | 1.246 | 5.124  | 0.085 | 13.739 | 29.783 | 3.285 | 11.417 | 98.775  |
| NR24B - G10 | 0.665           | 0.011 | 26.377 | 0.149 | 0.082 | 0.739 | 0.127 | 0.067 | 0.000 | 0.148 | 0.000 | 2.757 | 1.120 | 0.210 | 0.821 | 2.361 | 6.887  | 0.189 | 12.281 | 26.700 | 3.075 | 11.105 | 95.871  |
| NR24B - G11 | 0.760           | 0.012 | 28.805 | 0.000 | 0.092 | 0.713 | 0.105 | 0.033 | 0.046 | 0.068 | 0.000 | 2.458 | 0.644 | 0.137 | 0.414 | 1.715 | 6.218  | 0.170 | 14.173 | 28.164 | 3.140 | 10.911 | 98.778  |
| NR24B - G12 | 0.481           | 0.000 | 28.550 | 0.000 | 0.146 | 0.653 | 0.124 | 0.000 | 0.028 | 0.129 | 0.000 | 1.786 | 0.162 | 0.068 | 0.396 | 1.455 | 4.313  | 0.149 | 14.967 | 30.101 | 3.204 | 10.589 | 97.301  |
| NR24B - G13 | 0.348           | 0.000 | 29.149 | 0.074 | 0.013 | 0.563 | 0.142 | 0.059 | 0.000 | 0.058 | 0.000 | 2.445 | 0.682 | 0.197 | 0.420 | 1.596 | 3.453  | 0.217 | 13.242 | 29.146 | 3.433 | 11.627 | 96.864  |
| NR24B - G14 | 2.182           | 0.023 | 29.894 | 0.000 | 0.000 | 1.042 | 0.153 | 0.134 | 0.000 | 0.078 | 0.000 | 3.087 | 1.324 | 0.158 | 0.585 | 2.334 | 11.896 | 0.104 | 10.753 | 23.892 | 3.042 | 11.292 | 101.973 |
| NR24B - G15 | 0.805           | 0.009 | 24.833 | 0.075 | 0.139 | 0.661 | 0.077 | 0.101 | 0.030 | 0.105 | 0.000 | 2.569 | 0.942 | 0.260 | 0.528 | 1.321 | 11.146 | 0.182 | 12.159 | 25.510 | 2.982 | 10.930 | 95.364  |
| NR24B - G16 | 0.642           | 0.003 | 27.767 | 0.000 | 0.205 | 0.574 | 0.108 | 0.056 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.891 | 0.179 | 0.056 | 0.308 | 1.491 | 7.643  | 0.188 | 13.855 | 29.074 | 3.287 | 10.860 | 98.187  |
|             | 0.700           | 0.007 | 27.732 | 0.025 | 0.091 | 0.662 | 0.145 | 0.065 | 0.025 | 0.067 | 0.002 | 2.331 | 0.631 | 0.152 | 0.526 | 1.707 | 6.151  | 0.140 | 13.386 | 28.382 | 3.252 | 11.152 |         |

|              | SiO2  | Al2O3 | P2O5   | HfO2  | ZrO2  | CaO   | Er2O3 | Tm2O3 | Yb2O3 | Lu2O3 | PbO   | Sm2O3 | Gd2O3 | Tb2O3 | Dy2O3 | Y2O3  | ThO2   | UO2   | La2O3  | Ce2O3  | Pr2O3 | Nd2O3  | Total  |
|--------------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|
| EY135A - G1  | 1,404 | 0,001 | 0,000  | 0,030 | 0,025 | 0,000 | 0,000 | 0,002 | 0,003 | 0,003 | 0,000 | 0,000 | 1,911 | 0,151 | 0,371 | 1,456 | 10,465 | 0,105 | 12,919 | 26,976 | 3,051 | 9,558  | 68,431 |
| EY135A - G2  | 2,178 | 0,037 | 0,016  | 0,000 | 0,009 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,004 | 0,001 | 0,013 | 0,000 | 1,300 | 0,159 | 0,624 | 1,468 | 9,990  | 0,106 | 10,037 | 22,714 | 2,933 | 9,704  | 61,293 |
| EY135A - G3  | 1,241 | 0,003 | 0,001  | 0,124 | 0,054 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,007 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 1,143 | 0,187 | 0,418 | 1,788 | 7,824  | 0,088 | 12,471 | 27,624 | 3,233 | 10,527 | 66,734 |
| EY135A - G4  | 0,899 | 0,011 | 0,010  | 0,000 | 0,000 | 0,003 | 0,004 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,005 | 0,008 | 1,223 | 0,101 | 0,169 | 1,364 | 9,386  | 0,082 | 12,353 | 27,663 | 3,177 | 10,532 | 66,990 |
| EY135A - G5  | 1,419 | 0,006 | 0,024  | 0,030 | 0,002 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,003 | 0,002 | 0,000 | 0,003 | 1,220 | 0,164 | 0,487 | 1,746 | 7,703  | 0,099 | 12,152 | 26,770 | 3,180 | 9,880  | 64,891 |
| EY135A - G6  | 1,377 | 0,010 | 0,027  | 0,110 | 0,000 | 0,004 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 1,092 | 0,132 | 0,288 | 1,329 | 10,028 | 0,106 | 10,683 | 24,522 | 3,035 | 10,154 | 62,897 |
| EY135A - G7  | 0,799 | 0,023 | 11,353 | 0,023 | 0,017 | 0,300 | 0,067 | 0,011 | 0,041 | 0,000 | 0,000 | 1,615 | 1,362 | 0,122 | 0,427 | 1,168 | 8,908  | 0,107 | 12,611 | 28,172 | 3,323 | 10,894 | 81,343 |
| EY135A - G8  | 1,670 | 0,002 | 27,519 | 0,155 | 0,090 | 0,959 | 0,000 | 0,022 | 0,000 | 0,009 | 0,005 | 1,865 | 1,197 | 0,145 | 0,184 | 1,228 | 5,475  | 0,111 | 13,282 | 29,642 | 3,341 | 11,135 | 98,036 |
| EY135A - G9  | 0,872 | 0,008 | 28,371 | 0,000 | 0,012 | 0,641 | 0,069 | 0,105 | 0,058 | 0,071 | 0,000 | 1,968 | 1,237 | 0,057 | 0,228 | 1,566 | 6,251  | 0,091 | 12,850 | 28,698 | 3,337 | 10,936 | 97,426 |
| EY135A - G10 | 1,739 | 0,000 | 26,582 | 0,000 | 0,191 | 0,671 | 0,163 | 0,090 | 0,000 | 0,004 | 0,005 | 2,297 | 1,158 | 0,030 | 0,344 | 1,398 | 9,222  | 0,128 | 12,330 | 26,681 | 3,085 | 10,354 | 96,472 |
| EY135A - G11 | 1,730 | 0,000 | 26,765 | 0,000 | 0,268 | 0,517 | 0,065 | 0,024 | 0,039 | 0,071 | 0,063 | 1,949 | 1,079 | 0,034 | 0,214 | 1,428 | 8,535  | 0,122 | 12,370 | 25,884 | 3,161 | 9,973  | 94,291 |
| EY135A - G12 | 1,482 | 0,000 | 27,014 | 0,163 | 0,117 | 0,724 | 0,061 | 0,033 | 0,020 | 0,026 | 0,000 | 2,367 | 1,182 | 0,136 | 0,243 | 1,543 | 9,672  | 0,087 | 11,912 | 26,887 | 3,230 | 10,511 | 97,410 |
| EY135A - G13 | 1,344 | 0,000 | 27,270 | 0,000 | 0,108 | 0,772 | 0,074 | 0,055 | 0,000 | 0,076 | 0,079 | 2,651 | 1,361 | 0,155 | 0,525 | 1,463 | 9,785  | 0,110 | 11,911 | 26,078 | 3,105 | 10,947 | 97,869 |
| EY135A - G14 | 1,723 | 0,000 | 27,376 | 0,000 | 0,067 | 0,692 | 0,037 | 0,089 | 0,000 | 0,002 | 0,035 | 1,937 | 1,321 | 0,261 | 0,473 | 1,416 | 8,569  | 0,096 | 11,531 | 25,991 | 3,075 | 10,361 | 95,052 |
| EY135A - G15 | 1,672 | 0,004 | 27,104 | 0,038 | 0,230 | 0,613 | 0,000 | 0,000 | 0,068 | 0,000 | 0,000 | 2,010 | 1,290 | 0,038 | 0,262 | 1,293 | 8,223  | 0,098 | 12,589 | 27,005 | 3,009 | 10,046 | 95,592 |



|              |       |       |        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |       |        |        |       |        |        |
|--------------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|
| EY135A - G16 | 2.205 | 0,000 | 26.057 | 0,000 | 0,089 | 0,730 | 0,161 | 0,008 | 0,000 | 0,137 | 0,000 | 2.606 | 0,805 | 0,150 | 0,372 | 1,663 | 7,539  | 0,111 | 10,483 | 23,610 | 2,892 | 10,441 | 90,059 |
| EY135A - G17 | 2,019 | 0,000 | 25,529 | 0,163 | 0,025 | 0,655 | 0,084 | 0,000 | 0,000 | 0,038 | 0,021 | 2,100 | 0,837 | 0,158 | 0,374 | 1,546 | 10,580 | 0,124 | 11,112 | 25,231 | 3,148 | 10,582 | 94,326 |
| EY135A - G18 | 1,489 | 0,015 | 27,460 | 0,000 | 0,199 | 0,696 | 0,039 | 0,070 | 0,084 | 0,055 | 0,000 | 2,346 | 0,716 | 0,104 | 0,310 | 1,685 | 10,679 | 0,128 | 11,511 | 25,905 | 3,260 | 10,593 | 97,044 |
| EY135A - G19 | 2,057 | 0,000 | 26,330 | 0,052 | 0,119 | 0,563 | 0,074 | 0,012 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 2,134 | 0,508 | 0,083 | 0,157 | 1,255 | 9,208  | 0,111 | 11,916 | 26,058 | 3,067 | 9,969  | 93,673 |
| EY135A - G20 | 1,916 | 0,000 | 26,622 | 0,023 | 0,166 | 0,762 | 0,109 | 0,002 | 0,046 | 0,020 | 0,000 | 2,448 | 1,107 | 0,084 | 0,544 | 1,593 | 7,358  | 0,112 | 11,010 | 24,315 | 2,976 | 10,140 | 91,353 |
| EY135A - G21 | 1,546 | 0,000 | 26,929 | 0,000 | 0,168 | 0,576 | 0,090 | 0,052 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 1,948 | 0,381 | 0,105 | 0,136 | 1,234 | 8,760  | 0,097 | 13,227 | 28,384 | 3,164 | 9,971  | 96,768 |
| EY135A - G22 | 1,333 | 0,002 | 27,347 | 0,000 | 0,087 | 0,526 | 0,071 | 0,035 | 0,000 | 0,078 | 0,084 | 2,156 | 0,715 | 0,004 | 0,288 | 1,423 | 8,839  | 0,098 | 12,414 | 27,895 | 3,180 | 10,581 | 97,156 |
|              | 1,551 | 0,006 | 18,896 | 0,041 | 0,093 | 0,473 | 0,053 | 0,028 | 0,017 | 0,027 | 0,014 | 1,564 | 1,098 | 0,116 | 0,338 | 1,457 | 8,773  | 0,105 | 11,985 | 26,487 | 3,135 | 10,340 |        |

**Tabela B2:** Conteúdos químicos dos óxidos, expressos em percentagem em peso (wt %), obtidos por microanálise por sonda eletrônica (EPMA) em amostras de monazita provenientes do Brasil

| Amostra      | Elementos (wt%) |       |        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |        |       |        |        |
|--------------|-----------------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|
|              | SiO2            | Al2O3 | P2O5   | HfO2  | ZrO2  | CaO   | Er2O3 | Tm2O3 | Yb2O3 | Lu2O3 | PbO   | Sm2O3 | Gd2O3 | Tb2O3 | Dy2O3 | Y2O3  | ThO2  | UO2   | La2O3  | Ce2O3  | Pr2O3 | Nd2O3  | Total  |
| NCC05A - G1  | 0,324           | 0,002 | 20,942 | 0,000 | 0,000 | 1,179 | 0,018 | 0,008 | 0,000 | 0,089 | 0,079 | 1,631 | 2,599 | 0,023 | 0,000 | 0,157 | 3,746 | 0,347 | 16,165 | 32,682 | 3,257 | 10,767 | 94,015 |
| NCC05A - G2  | 0,207           | 0,001 | 24,499 | 0,000 | 0,000 | 1,177 | 0,000 | 0,014 | 0,061 | 0,000 | 0,243 | 1,614 | 2,509 | 0,070 | 0,000 | 0,163 | 4,542 | 0,190 | 15,525 | 32,268 | 3,202 | 10,968 | 97,253 |
| NCC05A - G5  | 0,167           | 0,029 | 24,724 | 0,000 | 0,000 | 1,167 | 0,000 | 0,019 | 0,000 | 0,093 | 0,051 | 1,967 | 3,213 | 0,027 | 0,261 | 0,678 | 3,776 | 0,297 | 15,467 | 31,963 | 3,169 | 11,134 | 98,202 |
| NCC05A - G7  | 0,178           | 0,000 | 24,716 | 0,000 | 0,000 | 1,047 | 0,000 | 0,017 | 0,089 | 0,000 | 0,024 | 1,695 | 2,725 | 0,000 | 0,172 | 0,164 | 4,028 | 0,273 | 15,859 | 33,049 | 3,113 | 11,006 | 98,155 |
| NCC05A - G8  | 0,386           | 0,024 | 23,873 | 0,000 | 0,000 | 1,275 | 0,032 | 0,010 | 0,001 | 0,000 | 0,108 | 1,335 | 2,530 | 0,000 | 0,000 | 0,225 | 5,364 | 0,132 | 15,959 | 32,189 | 3,108 | 10,548 | 97,099 |
| NCC05A - G11 | 0,357           | 0,000 | 24,089 | 0,000 | 0,000 | 1,221 | 0,000 | 0,016 | 0,008 | 0,000 | 0,132 | 1,702 | 2,677 | 0,133 | 0,042 | 0,166 | 5,402 | 0,412 | 15,930 | 32,072 | 3,074 | 10,932 | 98,365 |
| NCC05A - G12 | 0,247           | 0,000 | 24,212 | 0,000 | 0,000 | 0,937 | 0,054 | 0,021 | 0,000 | 0,000 | 0,065 | 1,597 | 2,563 | 0,000 | 0,000 | 0,145 | 5,434 | 0,198 | 15,775 | 32,651 | 3,338 | 11,215 | 98,452 |
| NCC05A - G14 | 0,257           | 0,000 | 23,063 | 0,000 | 0,000 | 1,234 | 0,000 | 0,009 | 0,000 | 0,025 | 0,015 | 1,420 | 2,184 | 0,000 | 0,000 | 0,112 | 4,408 | 0,200 | 10,394 | 24,792 | 2,455 | 9,560  | 80,128 |
| NCC05A - G15 | 0,210           | 0,000 | 23,328 | 0,000 | 0,000 | 1,145 | 0,013 | 0,020 | 0,000 | 0,000 | 0,005 | 1,287 | 2,507 | 0,077 | 0,000 | 0,111 | 5,063 | 0,205 | 15,755 | 33,312 | 3,331 | 11,403 | 97,772 |
| NCC05A - G16 | 0,269           | 0,002 | 24,548 | 0,000 | 0,000 | 1,047 | 0,000 | 0,017 | 0,000 | 0,000 | 0,026 | 1,435 | 2,529 | 0,108 | 0,000 | 0,253 | 5,698 | -     | 15,697 | 32,271 | 3,173 | 11,063 | 98,136 |
| NCC05A - G17 | 0,092           | 0,021 | 23,911 | 0,000 | 0,000 | 0,925 | 0,075 | 0,027 | 0,000 | 0,043 | 0,078 | 1,954 | 3,051 | 0,060 | 0,000 | 0,389 | 3,041 | 0,289 | 14,962 | 32,887 | 3,405 | 12,169 | 97,379 |
| NCC05A - G18 | 0,151           | 0,000 | 24,521 | 0,000 | 0,000 | 0,865 | 0,034 | 0,014 | 0,000 | 0,000 | 0,070 | 1,362 | 2,567 | 0,000 | 0,000 | 0,081 | 3,457 | 0,313 | 17,102 | 34,185 | 3,261 | 10,863 | 98,846 |
| NCC05A - G19 | 0,378           | 0,120 | 21,956 | 0,000 | 0,000 | 0,983 | 0,067 | 0,010 | 0,000 | 0,026 | 0,237 | 1,322 | 2,512 | 0,045 | 0,099 | 0,277 | 4,832 | 0,400 | 14,273 | 27,403 | 2,711 | 8,915  | 86,566 |
| NCC05A - G23 | 0,158           | 0,016 | 11,416 | 0,000 | 0,000 | 0,825 | 0,000 | 0,016 | 0,007 | 0,000 | 0,034 | 1,581 | 2,500 | 0,029 | 0,037 | 0,110 | 4,154 | 0,328 | 14,874 | 30,661 | 3,322 | 10,657 | 80,725 |
| NCC05A - G24 | 0,228           | 0,024 | 25,161 | 0,000 | 0,000 | 0,778 | 0,029 | 0,019 | 0,000 | 0,023 | 0,178 | 1,346 | 2,709 | 0,093 | 0,000 | 0,081 | 3,622 | 0,328 | 16,673 | 33,593 | 3,335 | 11,160 | 99,380 |
| NCC05A - G25 | 0,071           | 0,000 | 22,559 | 0,000 | 0,000 | 0,777 | 0,000 | 0,018 | 0,000 | 0,067 | 0,089 | 2,032 | 3,651 | 0,102 | 0,043 | 0,853 | 3,123 | 0,476 | 15,468 | 32,236 | 3,466 | 12,152 | 97,183 |
| NCC05A - G27 | 0,209           | 0,008 | 23,430 | 0,000 | 0,000 | 1,083 | 0,081 | 0,014 | 0,000 | 0,000 | 0,029 | 1,539 | 2,776 | 0,000 | 0,209 | 0,202 | 4,699 | 0,210 | 16,009 | 32,881 | 3,433 | 11,377 | 98,189 |
| NCC05A - G28 | 0,156           | 0,024 | 23,314 | 0,000 | 0,000 | 0,714 | 0,000 | 0,022 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 1,540 | 2,900 | 0,003 | 0,000 | 0,182 | 3,138 | 0,209 | 16,121 | 34,114 | 3,584 | 11,517 | 97,538 |
| NCC05A - G29 | 0,225           | 0,010 | 23,296 | 0,000 | 0,000 | 1,016 | 0,011 | 0,003 | 0,000 | 0,055 | 0,175 | 1,668 | 2,576 | 0,027 | 0,000 | 0,188 | 3,955 | 0,364 | 16,403 | 34,081 | 3,269 | 11,315 | 98,637 |
| NCC05A - G31 | 0,210           | 0,000 | 23,865 | 0,000 | 0,000 | 0,988 | 0,077 | 0,014 | 0,000 | 0,060 | 0,092 | 1,516 | 2,466 | 0,061 | 0,000 | 0,140 | 4,519 | 0,094 | 15,435 | 32,662 | 3,195 | 11,086 | 96,480 |
| NCC05A - G34 | 0,395           | 0,010 | 23,960 | 0,000 | 0,000 | 1,310 | 0,000 | 0,011 | 0,000 | 0,054 | 0,116 | 1,565 | 2,578 | 0,000 | 0,000 | 0,039 | 6,295 | 0,203 | 15,334 | 32,252 | 3,235 | 10,800 | 98,157 |
| NCC05A - G36 | 0,487           | 0,000 | 23,330 | 0,000 | 0,000 | 1,313 | 0,095 | 0,015 | 0,000 | 0,000 | 0,219 | 1,581 | 2,489 | 0,000 | 0,000 | 0,096 | 6,098 | 0,141 | 15,276 | 31,946 | 3,130 | 10,994 | 97,210 |
| NCC05A - G37 | 0,171           | 0,027 | 23,232 | 0,000 | 0,000 | 0,857 | 0,053 | 0,017 | 0,000 | 0,000 | 0,087 | 1,825 | 2,895 | 0,000 | 0,041 | 0,213 | 2,857 | 0,244 | 14,474 | 32,699 | 3,498 | 12,506 | 95,696 |
| NCC05A - G39 | 0,193           | 0,000 | 23,149 | 0,000 | 0,000 | 0,908 | 0,069 | 0,008 | 0,032 | 0,004 | 0,149 | 1,535 | 2,539 | 0,073 | 0,146 | 0,175 | 4,629 | 0,173 | 16,038 | 33,069 | 3,285 | 11,120 | 97,294 |
| NCC05A - G41 | 0,466           | 0,194 | 16,798 | 0,000 | 0,000 | 1,030 | 0,000 | 0,005 | 0,000 | 0,000 | 0,119 | 1,634 | 2,536 | 0,000 | 0,000 | 0,189 | 3,982 | 0,206 | 16,029 | 33,950 | 3,372 | 11,412 | 91,922 |
| NCC05A - G43 | 0,180           | 0,000 | 25,340 | 0,000 | 0,000 | 1,022 | 0,000 | 0,021 | 0,000 | 0,003 | 0,045 | 1,519 | 2,421 | 0,006 | 0,000 | 0,082 | 4,410 | 0,332 | 14,916 | 31,406 | 3,197 | 10,744 | 95,644 |
| NCC05A - G45 | 0,214           | 0,016 | 9,638  | 0,000 | 0,000 | 0,641 | 0,116 | 0,013 | 0,000 | 0,000 | 0,120 | 1,594 | 2,533 | 0,035 | 0,000 | 0,168 | 4,317 | 0,240 | 16,025 | 32,643 | 3,273 | 10,955 | 82,541 |
| NCC05A - G46 | 0,300           | 0,014 | 23,758 | 0,000 | 0,000 | 1,116 | 0,204 | 0,002 | 0,000 | 0,000 | 0,179 | 1,695 | 2,333 | 0,000 | 0,000 | 0,129 | 4,560 | 0,224 | 15,440 | 32,284 | 3,190 | 10,965 | 96,393 |
| NCC05A - G48 | 0,264           | 0,046 | 20,799 | 0,000 | 0,000 | 0,938 | 0,000 | 0,024 | 0,000 | 0,012 | 0,021 | 1,545 | 2,604 | 0,013 | 0,000 | 0,096 | 3,375 | 0,274 | 16,094 | 33,093 | 3,329 | 11,068 | 93,595 |
| NCC05A - G49 | 0,180           | 0,000 | 23,603 | 0,000 | 0,000 | 0,938 | 0,070 | 0,008 | 0,024 | 0,007 | 0,050 | 1,737 | 2,678 | 0,000 | 0,000 | 0,247 | 4,140 | 0,254 | 16,155 | 33,122 | 3,391 | 11,307 | 97,911 |
| NCC05A - G50 | 0,170           | 0,009 | 22,870 | 0,000 | 0,000 | 1,151 | 0,000 | 0,013 | 0,089 | 0,014 | 0,155 | 1,726 | 2,405 | 0,000 | 0,000 | 0,082 | 3,811 | 0,233 | 16,365 | 32,798 | 3,292 | 10,889 | 96,072 |
| NCC05A - G52 | 0,412           | 0,003 | 25,235 | 0,000 | 0,000 | 1,549 | 0,049 | 0,011 | 0,000 | 0,000 | 0,015 | 1,698 | 2,527 | 0,110 | 0,000 | 0,081 | 4,588 | 0,177 | 15,627 | 32,751 | 3,183 | 11,259 | 99,275 |
| NCC05A - G53 | 0,385           | 0,000 | 23,848 | 0,000 | 0,000 | 1,457 | 0,000 | 0,010 | 0,000 | 0,000 | 0,234 | 1,644 | 2,401 | 0,000 | 0,000 | 0,207 | 6,176 | 0,265 | 15,079 | 29,446 | 2,906 | 10,243 | 94,301 |
| NCC05A - G54 | 0,170           | 0,000 | 22,732 | 0,000 | 0,000 | 0,930 | 0,000 | 0,024 | 0,000 | 0,000 | 0,114 | 1,736 | 2,706 | 0,101 | 0,000 | 0,128 | 3,637 | 0,210 | 16,228 | 33,643 | 3,262 | 11,171 | 96,792 |
| NCC05A - G55 | 0,213           | 0,014 | 19,830 | 0,000 | 0,000 | 1,052 | 0,085 | 0,009 | 0,035 | 0,097 | 0,097 | 1,525 | 2,771 | 0,000 | 0,000 | 0,175 | 4,576 | 0,350 | 15,334 | 32,195 | 3,229 | 11,218 | 92,805 |
| NCC05A - G58 | 0,262           | 0,000 | 25,649 | 0,000 | 0,000 | 0,904 | 0,009 | 0,005 | 0,000 | 0,000 | 0,069 | 1,500 | 2,535 | 0,000 | 0,000 | 0,173 | 3,218 | 0,167 | 14,972 | 30,190 | 2,944 | 10,119 | 92,716 |
| NCC05A - G59 | 0,001           | 0,023 | 0,000  | 0,000 | 0,000 | 0,016 | 0,000 | 0,004 | 0,021 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,004 | 0,000 | 0,000 | 0,012 | 0,242 | 0,000  | 0,000  | 0,000 | 0,006  | 0,329  |
| NCC05A - G63 | 0,211           | 0,000 | 24,068 | 0,000 | 0,000 | 0,827 | 0,030 | 0,018 | 0,000 | 0,000 | 0,028 | 1,360 | 2,605 | 0,000 | 0,000 | 0,139 | 3,346 | 0,262 | 17,175 | 32,934 | 3,107 | 10,606 | 96,716 |
| NCC05A - G65 | 0,390           | 0,049 | 21,603 | 0,000 | 0,000 | 1,056 | 0,070 | 0,010 | 0,000 | 0,028 | 0,080 | 1,639 | 2,625 | 0,069 | 0,000 | 0,060 | 3,532 | 0,071 | 16,501 | 34,461 | 3,528 | 11,686 | 97,458 |
| NCC05A - G67 | 0,179           | 0,000 | 24,078 | 0,000 | 0,000 | 1,203 | 0,033 | 0,013 | 0,000 | 0,011 | 0,056 | 1,658 | 2,839 | 0,022 | 0,000 | 0,123 | 3,804 | 0,326 | 15,950 | 33,603 | 3,270 | 11,417 | 98,585 |
| NCC05A - G69 | 0,264           | 0,026 | 17,498 | 0,000 | 0,000 | 1,197 | 0,000 | 0,015 | 0,012 | 0,000 | 0,211 | 1,500 | 2,471 | 0,000 | 0,000 | 0,156 | 7,085 | 0,184 | 15,946 | 30,122 | 3,069 | 10,070 | 89,821 |

|               |       |       |        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |        |       |        |        |
|---------------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|
| NCC05A - G71  | 0.247 | 0.001 | 22.611 | 0.000 | 0.000 | 0.964 | 0.072 | 0.008 | 0.000 | 0.013 | 0.049 | 1.767 | 2.692 | 0.026 | 0.000 | 0.126 | 3.833 | 0.241 | 16.765 | 33.906 | 3.274 | 11.105 | 97.700 |
| NCC05A - G72  | 0.204 | 0.000 | 23.789 | 0.000 | 0.000 | 0.891 | 0.113 | 0.009 | 0.000 | 0.113 | 0.129 | 1.566 | 2.525 | 0.051 | 0.000 | 0.017 | 3.818 | 0.211 | 15.992 | 33.912 | 3.340 | 11.532 | 98.212 |
| NCC05A - G73  | 0.247 | 0.042 | 24.223 | 0.000 | 0.000 | 0.908 | 0.035 | 0.015 | 0.000 | 0.000 | 0.117 | 1.285 | 2.141 | 0.000 | 0.116 | 0.109 | 3.091 | 0.321 | 13.302 | 27.480 | 2.688 | 9.552  | 85.672 |
| NCC05A - G75  | 0.262 | 0.000 | 24.489 | 0.000 | 0.000 | 0.878 | 0.082 | 0.021 | 0.000 | 0.000 | 0.199 | 1.493 | 2.552 | 0.113 | 0.000 | 0.088 | 5.419 | 0.159 | 15.529 | 31.654 | 3.084 | 10.786 | 96.808 |
| NCC05A - G76  | 0.234 | 0.000 | 23.625 | 0.000 | 0.000 | 1.020 | 0.000 | 0.006 | 0.035 | 0.000 | 0.120 | 1.635 | 2.633 | 0.100 | 0.000 | 0.168 | 3.944 | 0.243 | 15.677 | 33.302 | 3.286 | 11.261 | 97.289 |
| NCC05A - G77  | 0.387 | 0.000 | 23.974 | 0.000 | 0.000 | 1.212 | 0.041 | 0.017 | 0.000 | 0.000 | 0.148 | 1.627 | 2.496 | 0.083 | 0.000 | 0.176 | 5.934 | 0.351 | 15.045 | 31.573 | 3.153 | 10.945 | 97.162 |
| NCC05A - G78  | 0.174 | 0.000 | 23.938 | 0.000 | 0.000 | 1.131 | 0.000 | 0.019 | 0.000 | 0.000 | 0.078 | 1.421 | 2.396 | 0.000 | 0.000 | 0.119 | 4.657 | 0.179 | 15.745 | 32.517 | 3.323 | 11.002 | 96.699 |
| NCC05A - G79  | 0.208 | 0.000 | 24.089 | 0.000 | 0.000 | 1.004 | 0.053 | 0.010 | 0.005 | 0.000 | 0.000 | 1.594 | 2.752 | 0.059 | 0.000 | 0.263 | 3.312 | 0.476 | 17.035 | 33.530 | 3.204 | 11.268 | 98.862 |
| NCC05A - G80  | 0.248 | 0.026 | 23.091 | 0.000 | 0.000 | 0.935 | 0.000 | 0.011 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.492 | 2.467 | 0.059 | 0.000 | 0.090 | 5.172 | 0.090 | 15.621 | 32.592 | 3.226 | 11.092 | 96.212 |
| NCC05A - G82  | 0.313 | 0.000 | 24.689 | 0.000 | 0.000 | 1.189 | 0.066 | 0.023 | 0.000 | 0.000 | 0.161 | 1.606 | 2.528 | 0.101 | 0.000 | 0.165 | 3.956 | 0.105 | 16.228 | 33.497 | 3.306 | 11.096 | 99.029 |
| NCC05A - G83  | 0.411 | 0.000 | 22.768 | 0.000 | 0.000 | 1.170 | 0.108 | 0.015 | 0.000 | 0.049 | 0.163 | 1.463 | 2.492 | 0.046 | 0.000 | 0.173 | 5.303 | 0.120 | 16.140 | 33.282 | 3.298 | 10.867 | 97.868 |
| NCC05A - G85  | 0.143 | 0.000 | 23.936 | 0.000 | 0.000 | 1.022 | 0.000 | 0.012 | 0.000 | 0.000 | 0.022 | 1.520 | 2.640 | 0.000 | 0.000 | 0.103 | 3.515 | 0.209 | 16.128 | 34.022 | 3.374 | 11.511 | 98.157 |
| NCC05A - G86  | 0.537 | 0.000 | 23.484 | 0.000 | 0.000 | 1.704 | 0.000 | 0.024 | 0.000 | 0.000 | 0.011 | 1.524 | 2.675 | 0.022 | 0.000 | 0.070 | 4.619 | 0.207 | 17.052 | 32.944 | 3.341 | 10.950 | 99.164 |
| NCC05A - G87  | 0.205 | 0.000 | 21.561 | 0.000 | 0.000 | 1.109 | 0.000 | 0.012 | 0.000 | 0.033 | 0.017 | 1.689 | 2.695 | 0.055 | 0.000 | 0.070 | 4.994 | 0.481 | 15.896 | 32.702 | 3.289 | 11.264 | 96.072 |
| NCC05A - G91  | 0.225 | 0.000 | 23.443 | 0.000 | 0.000 | 0.903 | 0.057 | 0.015 | 0.000 | 0.033 | 0.064 | 1.477 | 2.614 | 0.000 | 0.000 | 0.131 | 5.743 | 0.237 | 15.492 | 31.739 | 3.261 | 10.931 | 96.365 |
| NCC05A - G92  | 0.191 | 0.001 | 23.685 | 0.000 | 0.000 | 0.986 | 0.000 | 0.020 | 0.000 | 0.000 | 0.194 | 1.682 | 2.807 | 0.056 | 0.000 | 0.144 | 4.520 | 0.065 | 15.817 | 33.271 | 3.532 | 11.428 | 98.399 |
| NCC05A - G93  | 0.432 | 0.090 | 24.091 | 0.000 | 0.000 | 1.249 | 0.009 | 0.015 | 0.000 | 0.000 | 0.077 | 1.424 | 2.651 | 0.108 | 0.000 | 0.115 | 5.815 | 0.219 | 15.620 | 31.244 | 3.121 | 10.502 | 96.782 |
| NCC05A - G94  | 0.318 | 0.015 | 23.521 | 0.000 | 0.000 | 1.136 | 0.054 | 0.007 | 0.000 | 0.024 | 0.158 | 1.694 | 2.745 | 0.075 | 0.041 | 0.216 | 4.970 | 0.203 | 16.326 | 32.268 | 3.190 | 10.631 | 97.592 |
| NCC05A - G95  | 0.250 | 0.000 | 23.711 | 0.000 | 0.000 | 1.084 | 0.037 | 0.016 | 0.000 | 0.000 | 0.309 | 1.607 | 2.790 | 0.071 | 0.000 | 0.152 | 4.594 | 0.275 | 16.099 | 32.660 | 3.222 | 10.878 | 97.755 |
| NCC05A - G97  | 0.257 | 0.000 | 23.316 | 0.000 | 0.000 | 1.147 | 0.077 | 0.010 | 0.000 | 0.000 | 0.165 | 1.613 | 2.687 | 0.000 | 0.000 | 0.122 | 5.099 | 0.211 | 16.212 | 32.760 | 3.209 | 10.942 | 97.827 |
| NCC05A - G98  | 0.371 | 0.000 | 23.130 | 0.000 | 0.000 | 1.237 | 0.053 | 0.023 | 0.000 | 0.000 | 0.193 | 1.696 | 2.600 | 0.000 | 0.000 | 0.174 | 5.797 | 0.213 | 15.657 | 31.559 | 3.099 | 10.886 | 96.688 |
| NCC05A - G99  | 0.306 | 0.022 | 22.579 | 0.000 | 0.000 | 0.986 | 0.000 | 0.020 | 0.024 | 0.055 | 0.098 | 1.601 | 2.509 | 0.056 | 0.000 | 0.125 | 4.103 | 0.177 | 15.921 | 32.503 | 3.337 | 11.065 | 95.487 |
| NCC05A - G101 | 0.345 | 0.000 | 23.935 | 0.000 | 0.000 | 1.115 | 0.047 | 0.012 | 0.005 | 0.000 | 0.128 | 1.652 | 2.572 | 0.019 | 0.000 | 0.157 | 5.255 | 0.384 | 15.675 | 31.818 | 3.033 | 10.726 | 96.878 |
| NCC05A - G102 | 0.337 | 0.013 | 23.477 | 0.000 | 0.000 | 1.035 | 0.047 | 0.002 | 0.000 | 0.000 | 0.170 | 1.555 | 2.396 | 0.099 | 0.085 | 0.141 | 4.986 | 0.115 | 15.879 | 32.411 | 3.244 | 10.880 | 96.872 |
| NCC05A - G105 | 0.261 | 0.026 | 23.305 | 0.000 | 0.000 | 1.066 | 0.000 | 0.015 | 0.000 | 0.000 | 0.089 | 1.706 | 2.404 | 0.000 | 0.000 | 0.009 | 4.300 | 0.185 | 15.960 | 32.616 | 3.396 | 11.301 | 96.639 |
| NCC05A - G106 | 0.239 | 0.027 | 24.878 | 0.000 | 0.000 | 0.846 | 0.049 | 0.013 | 0.000 | 0.000 | 0.086 | 1.403 | 2.397 | 0.057 | 0.006 | 0.072 | 3.934 | 0.174 | 15.813 | 32.599 | 3.358 | 11.646 | 97.597 |
| NCC05A - G107 | 0.253 | 0.015 | 23.156 | 0.000 | 0.000 | 1.362 | 0.111 | 0.013 | 0.000 | 0.044 | 0.138 | 1.479 | 2.636 | 0.000 | 0.000 | 0.061 | 4.109 | 0.249 | 15.967 | 32.904 | 3.146 | 11.179 | 96.822 |
| NCC05A - G108 | 0.382 | 0.000 | 23.642 | 0.000 | 0.000 | 1.083 | 0.009 | 0.003 | 0.019 | 0.000 | 0.186 | 1.442 | 2.300 | 0.000 | 0.000 | 0.074 | 7.174 | 0.102 | 16.322 | 30.807 | 3.116 | 9.954  | 96.615 |
| NCC05A - G109 | 0.394 | 0.000 | 23.506 | 0.000 | 0.000 | 1.287 | 0.082 | 0.015 | 0.000 | 0.000 | 0.166 | 1.384 | 2.522 | 0.058 | 0.000 | 0.138 | 6.368 | 0.329 | 15.615 | 30.984 | 2.979 | 10.286 | 96.113 |
| NCC05A - G110 | 0.271 | 0.044 | 23.451 | 0.000 | 0.000 | 1.013 | 0.072 | 0.005 | 0.000 | 0.000 | 0.105 | 1.683 | 2.526 | 0.010 | 0.000 | 0.133 | 4.192 | 0.135 | 15.917 | 33.192 | 3.074 | 10.961 | 96.784 |
| NCC05A - G111 | 0.279 | 0.000 | 23.520 | 0.000 | 0.000 | 0.885 | 0.037 | 0.018 | 0.000 | 0.000 | 0.038 | 1.314 | 2.434 | 0.060 | 0.000 | 0.211 | 5.767 | 0.186 | 15.837 | 32.056 | 3.136 | 10.361 | 96.139 |
| NCC05A - G112 | 0.322 | 0.034 | 20.101 | 0.000 | 0.000 | 0.963 | 0.035 | 0.013 | 0.072 | 0.020 | 0.084 | 1.820 | 2.644 | 0.027 | 0.047 | 0.088 | 4.300 | 0.114 | 15.855 | 32.816 | 3.447 | 11.282 | 94.084 |
| NCC05A - G113 | 0.235 | 0.017 | 24.467 | 0.000 | 0.000 | 1.034 | 0.014 | 0.020 | 0.004 | 0.000 | 0.050 | 1.530 | 2.616 | 0.009 | 0.000 | 0.168 | 3.947 | 0.126 | 15.932 | 32.927 | 3.538 | 10.989 | 97.623 |
| NCC05A - G114 | 0.223 | 0.000 | 24.536 | 0.000 | 0.000 | 0.891 | 0.019 | 0.011 | 0.000 | 0.043 | 0.124 | 1.485 | 2.855 | 0.000 | 0.000 | 0.037 | 3.996 | 0.180 | 16.089 | 33.469 | 3.346 | 11.314 | 98.618 |
| NCC05A - G115 | 0.236 | 0.015 | 23.745 | 0.000 | 0.000 | 0.907 | 0.121 | 0.018 | 0.000 | 0.000 | 0.088 | 1.724 | 2.865 | 0.083 | 0.000 | 0.159 | 3.990 | 0.148 | 16.085 | 32.988 | 3.446 | 11.469 | 98.087 |
| NCC05A - G117 | 0.275 | 0.029 | 24.124 | 0.000 | 0.000 | 0.854 | 0.074 | 0.012 | 0.000 | 0.004 | 0.066 | 1.613 | 2.820 | 0.091 | 0.000 | 0.140 | 3.976 | 0.190 | 16.128 | 33.370 | 3.449 | 11.512 | 98.727 |
| NCC05A - G118 | 0.212 | 0.000 | 23.347 | 0.000 | 0.000 | 1.229 | 0.000 | 0.000 | 0.006 | 0.046 | 0.185 | 1.244 | 2.107 | 0.037 | 0.000 | 0.050 | 3.963 | 0.179 | 14.084 | 27.429 | 2.558 | 9.379  | 86.055 |
| NCC05A - G119 | 0.478 | 0.000 | 23.763 | 0.000 | 0.000 | 1.268 | 0.055 | 0.013 | 0.015 | 0.066 | 0.221 | 1.448 | 2.801 | 0.000 | 0.000 | 0.201 | 6.340 | 0.203 | 16.627 | 30.514 | 3.042 | 10.776 | 97.331 |
| NCC05A - G120 | 0.237 | 0.000 | 23.818 | 0.000 | 0.000 | 1.075 | 0.021 | 0.026 | 0.000 | 0.000 | 0.069 | 1.541 | 2.845 | 0.045 | 0.000 | 0.163 | 4.170 | 0.168 | 16.511 | 32.674 | 3.120 | 10.704 | 97.187 |
|               | 0.264 | 0.014 | 22.762 | 0.000 | 0.000 | 1.045 | 0.038 | 0.014 | 0.007 | 0.016 | 0.104 | 1.553 | 2.576 | 0.037 | 0.017 | 0.154 | 4.468 | 0.230 | 15.555 | 31.888 | 3.181 | 10.826 |        |

|              | SiO2  | Al2O3 | P2O5   | HfO2  | ZrO2  | CaO   | Er2O3 | Tm2O3 | Yb2O3 | Lu2O3 | PbO   | Sm2O3 | Gd2O3 | Tb2O3 | Dy2O3 | Y2O3  | ThO2  | UO2   | La2O3  | Ce2O3  | Pr2O3 | Nd2O3  | Total  |
|--------------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|
| NCC310 - G2  | 0.280 | 0.001 | 24.576 | 0.000 | 0.000 | 0.963 | 0.118 | 0.020 | 0.020 | 0.199 | 0.112 | 0.060 | 0.000 | 0.005 | 0.002 | 0.058 | 4.379 | 0.142 | 11.117 | 28.709 | 3.092 | 10.437 | 84.290 |
| NCC310 - G3  | 0.361 | 0.008 | 24.015 | 0.000 | 0.000 | 1.046 | 0.194 | 0.017 | 0.103 | 0.093 | 0.004 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 4.672 | 0.187 | 11.008 | 25.744 | 2.857 | 9.184  | 79.493 |
| NCC310 - G4  | 0.285 | 0.000 | 23.727 | 0.000 | 0.000 | 0.912 | 0.046 | 0.031 | 0.128 | 0.021 | 0.163 | 0.042 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.085 | 3.438 | 0.183 | 11.293 | 28.358 | 3.147 | 10.273 | 82.132 |
| NCC310 - G5  | 0.257 | 0.006 | 24.346 | 0.000 | 0.000 | 0.875 | 0.145 | 0.015 | 0.000 | 0.000 | 0.011 | 0.022 | 0.000 | 0.017 | 0.000 | 0.000 | 3.582 | 0.155 | 11.572 | 28.305 | 2.880 | 10.085 | 82.273 |
| NCC310 - G6  | 0.308 | 0.001 | 23.740 | 0.000 | 0.000 | 1.015 | 0.112 | 0.022 | 0.079 | 0.000 | 0.046 | 0.000 | 0.000 | 0.018 | 0.018 | 0.000 | 4.984 | 0.175 | 12.085 | 28.056 | 2.890 | 9.545  | 83.094 |
| NCC310 - G8  | 0.356 | 0.000 | 24.107 | 0.000 | 0.000 | 1.207 | 0.177 | 0.011 | 0.000 | 0.165 | 0.221 | 0.137 | 0.000 | 0.002 | 0.000 | 0.000 | 4.942 | 0.148 | 11.194 | 27.573 | 3.311 | 10.364 | 83.915 |
| NCC310 - G9  | 0.391 | 0.000 | 23.376 | 0.000 | 0.000 | 1.113 | 0.107 | 0.006 | 0.053 | 0.032 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.009 | 0.019 | 3.399 | 0.156 | 9.774  | 24.471 | 2.703 | 9.311  | 74.920 |
| NCC310 - G10 | 0.517 | 0.017 | 23.369 | 0.000 | 0.000 | 1.060 | 0.248 | 0.017 | 0.105 | 0.053 | 0.000 | 0.033 | 0.000 | 0.008 | 0.005 | 0.000 | 4.612 | 0.127 | 11.253 | 27.506 | 3.102 | 10.269 | 82.301 |
| NCC310 - G11 | 0.350 | 0.000 | 23.577 | 0.000 | 0.000 | 1.019 | 0.230 | 0.007 | 0.000 | 0.081 | 0.094 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.024 | 4.624 | 0.136 | 11.518 | 27.649 | 3.176 | 10.606 | 83.092 |
| NCC310 - G14 | 0.351 | 0.032 | 24.732 | 0.000 | 0.000 | 1.136 | 0.218 | 0.016 | 0.013 | 0.034 | 0.161 | 0.036 | 0.000 | 0.037 | 0.001 | 0.000 | 4.881 | 0.344 | 11.692 | 28.092 | 3.153 | 10.367 | 85.296 |
| NCC310 - G15 | 0.282 | 0.000 | 24.279 | 0.000 | 0.000 | 0.933 | 0.118 | 0.029 | 0.000 | 0.174 | 0.171 | 0.036 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.030 | 4.783 | 0.130 | 10.957 | 28.313 | 3.029 | 10.497 | 83.761 |
| NCC310 - G16 | 9.870 | 7.377 | 3.408  | 0.000 | 0.000 | 0.720 | 0.334 | 0.016 | 0.017 | 0.107 | 0.184 | 0.025 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.031 | 4.650 | 0.170 | 10.847 | 27.624 | 2.931 | 10.099 | 78.410 |
| NCC310 - G17 | 1.139 | 0.082 | 15.435 | 0.000 | 0.000 | 1.253 | 0.091 | 0.013 | 0.131 | 0.192 | 0.061 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 4.680 | 0.175 | 11.167 | 27.378 | 3.217 | 10.375 | 75.190 |
| NCC310 - G18 | 0.140 | 0.015 | 9.787  | 0.000 | 0.000 | 0.845 | 0.000 | 0.000 | 0.018 | 0.000 | 0.000 | 0.033 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.041 | 0.128 | 0.141 | 0.006  | 0.000  | 0.004 | 0.002  | 11.160 |
| NCC310 - G20 | 0.338 | 0.000 | 23.859 | 0.000 | 0.000 | 1.111 | 0.153 | 0.018 | 0.000 | 0.143 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.007 | 0.018 | 0.033 | 5.879 | 0.124 | 10.747 | 27.030 | 2.832 | 10.083 | 82.376 |



|              |        |        |        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |        |        |       |        |         |
|--------------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|---------|
| NCC310 - G21 | 0.300  | 0.031  | 23.562 | 0.000 | 0.000 | 1.108 | 0.334 | 0.025 | 0.010 | 0.177 | 0.105 | 0.020 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.081 | 3.832 | 0.117 | 11.278 | 27.312 | 2.792 | 10.010 | 81.094  |
| NCC310 - G22 | 0.359  | 0.375  | 10.988 | 0.000 | 0.000 | 0.656 | 0.171 | 0.011 | 0.000 | 0.008 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.015 | 0.000 | 0.000 | 4.134 | 0.139 | 11.256 | 26.563 | 3.147 | 9.766  | 67.588  |
| NCC310 - G23 | 0.304  | 0.000  | 24.154 | 0.000 | 0.000 | 0.980 | 0.226 | 0.020 | 0.000 | 0.055 | 0.213 | 0.052 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.007 | 4.520 | 0.102 | 11.368 | 28.096 | 3.146 | 10.394 | 83.637  |
| NCC310 - G25 | 64.384 | 18.426 | 0.007  | 0.000 | 0.000 | 0.015 | 0.125 | 0.018 | 0.079 | 0.015 | 0.068 | 0.012 | 0.000 | 0.010 | 0.000 | 0.037 | 3.756 | 0.163 | 11.075 | 27.637 | 3.006 | 10.221 | 139.054 |
| NCC310 - G26 | 0.414  | 0.067  | 22.412 | 0.000 | 0.000 | 1.048 | 0.107 | 0.013 | 0.000 | 0.076 | 0.093 | 0.079 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.044 | 2.805 | 0.224 | 12.203 | 28.662 | 3.371 | 10.078 | 81.696  |
| NCC310 - G27 | 0.357  | 0.031  | 23.640 | 0.000 | 0.000 | 1.040 | 0.110 | 0.020 | 0.070 | 0.264 | 0.013 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.010 | 0.002 | 3.829 | 0.139 | 11.800 | 29.113 | 3.412 | 10.757 | 84.607  |
| NCC310 - G28 | 0.289  | 0.037  | 24.228 | 0.000 | 0.000 | 1.025 | 0.260 | 0.022 | 0.000 | 0.103 | 0.168 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 4.175 | 0.102 | 11.330 | 27.292 | 2.921 | 10.297 | 82.249  |
| NCC310 - G29 | 0.330  | 0.018  | 24.013 | 0.000 | 0.000 | 1.072 | 0.269 | 0.018 | 0.055 | 0.137 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.015 | 4.221 | 0.163 | 11.821 | 28.726 | 3.013 | 10.220 | 84.091  |
|              | 3.564  | 1.153  | 20.406 | 0.000 | 0.000 | 0.963 | 0.169 | 0.017 | 0.038 | 0.093 | 0.082 | 0.026 | 0.000 | 0.005 | 0.003 | 0.022 | 4.118 | 0.158 | 10.798 | 26.444 | 2.919 | 9.706  |         |

|               | SiO2   | Al2O3  | P2O5    | HfO2   | ZrO2   | CaO    | Er2O3  | Tm2O3  | Yb2O3  | Lu2O3  | PbO    | Sm2O3  | Gd2O3  | Tb2O3  | Dy2O3  | Y2O3   | ThO2   | UO2    | La2O3   | Ce2O3   | Pr2O3  | Nd2O3   | Total   |
|---------------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|--------|---------|---------|
| NCC358A - G21 | 0.1700 | 0.0370 | 23.2710 | 0.0000 | 0.0000 | 0.8400 | 0.0510 | 0.0110 | 0.0490 | 0.0180 | 0.1500 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0940 | 0.0120 | 1.4110 | 0.2828 | 10.4540 | 26.0860 | 2.7240 | 10.8130 | 76.4738 |
| NCC358A - G22 | 0.1880 | 0.0110 | 22.9840 | 0.0000 | 0.0000 | 1.6280 | 0.1700 | 0.0280 | 0.0000 | 0.1100 | 0.0190 | 0.0240 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 1.9080 | 0.3400 | 11.2320 | 29.4930 | 3.4100 | 12.8530 | 84.3980 |
| NCC358A - G23 | 0.1500 | 0.0030 | 22.7300 | 0.0000 | 0.0000 | 0.8650 | 0.0000 | 0.0210 | 0.0050 | 0.0410 | 0.2250 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0760 | 0.0030 | 2.6200 | 0.3328 | 11.4450 | 29.9540 | 3.4400 | 13.0800 | 84.9908 |
| NCC358A - G26 | 0.1450 | 0.0130 | 23.5510 | 0.0000 | 0.0000 | 1.0750 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0120 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0070 | 0.0120 | 0.0000 | 0.3620 | 0.2239 | 0.8210  | 2.3530  | 0.3630 | 0.9970  | 29.9349 |
| NCC358A - G27 | 0.2650 | 0.0190 | 22.5280 | 0.0000 | 0.0000 | 1.4460 | 0.0830 | 0.0110 | 0.0000 | 0.0320 | 0.1510 | 0.0470 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0350 | 3.0930 | 0.1907 | 11.1890 | 28.9740 | 3.3060 | 11.4890 | 82.8587 |
| NCC358A - G28 | 0.3100 | 0.0050 | 23.8370 | 0.0000 | 0.0000 | 1.2380 | 0.0000 | 0.0030 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0150 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0200 | 0.0120 | 0.2446 | 0.0000  | 0.0230  | 0.0080 | 0.0000  | 25.7156 |
| NCC358A - G29 | 0.0840 | 0.0150 | 23.3770 | 0.0000 | 0.0000 | 1.0570 | 0.0420 | 0.0100 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0880 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0430 | 3.8260 | 0.2894 | 12.4610 | 30.7500 | 3.2170 | 11.6930 | 86.9524 |
| NCC358A - G30 | 0.2360 | 0.0000 | 23.1020 | 0.0000 | 0.0000 | 1.0930 | 0.0150 | 0.0130 | 0.0660 | 0.0110 | 0.2180 | 0.0210 | 0.0000 | 0.0190 | 0.0000 | 0.0260 | 3.6060 | 0.3483 | 11.8900 | 30.0980 | 3.5670 | 11.8500 | 86.1793 |
| NCC358A - G31 | 0.0930 | 0.0000 | 24.3420 | 0.0000 | 0.0000 | 1.0650 | 0.0570 | 0.0180 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0480 | 0.0000 | 3.0680 | 0.4064 | 10.9790 | 27.4670 | 3.4540 | 11.5440 | 82.5414 |
| NCC358A - G33 | 0.1800 | 0.0000 | 22.9470 | 0.0000 | 0.0000 | 1.0050 | 0.0000 | 0.0170 | 0.0000 | 0.0370 | 0.0260 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0360 | 0.0280 | 0.0220 | 4.0800 | 0.3707 | 11.6670 | 29.2260 | 3.3430 | 11.1650 | 84.1497 |
| NCC358A - G34 | 0.2050 | 0.0260 | 23.6930 | 0.0000 | 0.0000 | 0.9360 | 0.0000 | 0.0170 | 0.0270 | 0.0020 | 0.0860 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0020 | 0.0330 | 0.0000 | 2.7110 | 0.5349 | 9.3430  | 21.5280 | 2.2580 | 8.0580  | 69.4599 |
| NCC358A - G35 | 0.2430 | 0.0090 | 17.1500 | 0.0000 | 0.0000 | 0.8160 | 0.0000 | 0.0150 | 0.0330 | 0.0950 | 0.0990 | 0.0020 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0300 | 0.0000 | 3.4920 | 0.3856 | 11.9280 | 29.4540 | 3.0590 | 11.6540 | 78.4646 |
| NCC358A - G36 | 0.0850 | 0.0160 | 23.6510 | 0.0000 | 0.0000 | 1.2210 | 0.0860 | 0.0130 | 0.0360 | 0.0610 | 0.1320 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0050 | 0.0160 | 0.0470 | 3.9080 | 0.3798 | 11.4970 | 29.3380 | 3.5920 | 12.3450 | 86.4288 |
| NCC358A - G37 | 9.3370 | 0.3150 | 17.1440 | 0.0000 | 0.0000 | 0.6290 | 0.0950 | 0.0250 | 0.0000 | 0.1320 | 0.0530 | 0.0040 | 0.0000 | 0.0240 | 0.0000 | 0.0000 | 1.9900 | 0.5573 | 10.4480 | 28.5790 | 3.6110 | 13.8270 | 86.7703 |
| NCC358A - G38 | 0.0480 | 0.0120 | 11.1460 | 0.0000 | 0.0000 | 0.7360 | 0.0630 | 0.0040 | 0.0000 | 0.0120 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0170 | 0.0000 | 0.0040 | 2.2690 | 0.2654 | 10.9280 | 27.1240 | 3.4090 | 11.6020 | 67.6394 |
| NCC358A - G39 | 0.0810 | 0.0020 | 21.8310 | 0.0000 | 0.0000 | 0.8730 | 0.0560 | 0.0170 | 0.0190 | 0.0000 | 0.0450 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0040 | 0.0000 | 0.0260 | 2.6310 | 0.4154 | 10.8680 | 27.5970 | 3.2990 | 11.4770 | 79.2414 |
| NCC358A - G40 | 0.0920 | 0.0000 | 23.5140 | 0.0000 | 0.0000 | 0.9190 | 0.0000 | 0.0150 | 0.0000 | 0.0240 | 0.0600 | 0.1620 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0290 | 0.0000 | 2.2960 | 0.4288 | 11.4410 | 29.2160 | 3.3940 | 12.9340 | 84.5248 |
| NCC358A - G41 | 0.0950 | 0.0000 | 22.7720 | 0.0000 | 0.0000 | 1.0630 | 0.0430 | 0.0180 | 0.0000 | 0.0000 | 0.1840 | 0.0700 | 0.0000 | 0.0260 | 0.0000 | 0.0000 | 2.7790 | 0.3118 | 10.4400 | 27.5460 | 3.0760 | 11.3930 | 79.8168 |
| NCC358A - G42 | 0.2090 | 0.0300 | 21.7760 | 0.0000 | 0.0000 | 1.0060 | 0.1220 | 0.0250 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0940 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0160 | 0.0000 | 0.0000 | 3.6220 | 0.4205 | 11.5700 | 30.1140 | 3.3750 | 11.9520 | 84.3315 |
| NCC358A - G43 | 0.0820 | 0.0030 | 14.9130 | 0.0000 | 0.0000 | 1.1540 | 0.0000 | 0.0220 | 0.0000 | 0.0920 | 0.0050 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0620 | 0.0190 | 0.0050 | 3.3270 | 0.1999 | 10.9140 | 27.5930 | 3.1720 | 11.1870 | 72.7499 |
| NCC358A - G46 | 0.1410 | 0.0130 | 21.5890 | 0.0000 | 0.0000 | 1.0410 | 0.2700 | 0.0140 | 0.0000 | 0.0060 | 0.0320 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0190 | 0.0020 | 0.0000 | 2.8520 | 0.6771 | 10.5840 | 27.7330 | 3.2050 | 12.4030 | 80.5811 |
| NCC358A - G47 | 0.1080 | 0.0040 | 24.3780 | 0.0000 | 0.0000 | 1.0490 | 0.1350 | 0.0210 | 0.1020 | 0.0470 | 0.0770 | 0.0740 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0010 | 2.3130 | 0.4387 | 10.3610 | 26.3110 | 3.3240 | 11.3830 | 80.1267 |
| NCC358A - G48 | 0.2170 | 0.0000 | 22.8160 | 0.0000 | 0.0000 | 0.9370 | 0.0860 | 0.0240 | 0.0000 | 0.1320 | 0.1470 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0220 | 0.0630 | 0.0300 | 2.7320 | 0.5084 | 11.5630 | 28.5510 | 3.4820 | 12.5170 | 83.8274 |
| NCC358A - G49 | 0.1880 | 0.0310 | 22.6250 | 0.0000 | 0.0000 | 0.5410 | 0.1080 | 0.0050 | 0.0510 | 0.0230 | 0.1310 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0030 | 0.0000 | 0.0000 | 3.4430 | 0.3342 | 11.1670 | 28.5440 | 3.1490 | 11.4450 | 81.7882 |
| NCC358A - G50 | 0.1420 | 0.0000 | 23.6840 | 0.0000 | 0.0000 | 1.0440 | 0.0120 | 0.0000 | 0.0180 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0300 | 0.0100 | 0.0000 | 0.0170 | 0.0130 | 0.0180 | 0.0914 | 0.0560  | 0.0040  | 0.0000 | 0.0140  | 25.1534 |
| NCC358A - G51 | 0.1050 | 0.0450 | 1.9250  | 0.0000 | 0.0000 | 0.1630 | 0.0620 | 0.0030 | 0.1320 | 0.0000 | 0.0110 | 0.0040 | 0.0000 | 0.0100 | 0.0000 | 0.0000 | 3.6660 | 0.3292 | 13.1310 | 29.0650 | 3.0200 | 10.6060 | 62.2772 |
| NCC358A - G52 | 0.1940 | 0.0080 | 23.9310 | 0.0000 | 0.0000 | 0.9610 | 0.1060 | 0.0110 | 0.0000 | 0.0250 | 0.2240 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0140 | 0.0000 | 0.0000 | 2.6840 | 0.2955 | 9.9010  | 24.6260 | 2.7110 | 10.0380 | 75.7295 |
| NCC358A - G53 | 0.1220 | 0.0000 | 23.3470 | 0.0000 | 0.0000 | 0.7940 | 0.0750 | 0.0230 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0540 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0360 | 0.0000 | 0.0110 | 4.6950 | 0.2621 | 12.3330 | 28.8270 | 3.1790 | 11.1290 | 84.8871 |
| NCC358A - G54 | 0.0390 | 0.0130 | 0.8490  | 0.0000 | 0.0000 | 0.1280 | 0.1720 | 0.0260 | 0.1100 | 0.1600 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0550 | 0.0000 | 0.8170 | 0.5031 | 9.9400  | 27.6330 | 3.7690 | 14.2940 | 58.5081 |
| NCC358A - G55 | 0.0560 | 0.0000 | 3.9290  | 0.0000 | 0.0000 | 0.4310 | 0.0000 | 0.0230 | 0.0050 | 0.0000 | 0.0420 | 0.0700 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0170 | 2.8190 | 0.2073 | 11.7990 | 30.3260 | 3.1910 | 12.4900 | 65.4053 |
| NCC358A - G56 | 0.4080 | 0.0940 | 11.2870 | 0.0000 | 0.0000 | 0.6120 | 0.0000 | 0.0220 | 0.0000 | 0.0000 | 0.1430 | 0.0030 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0280 | 2.1390 | 0.4802 | 11.7320 | 29.8910 | 3.7880 | 13.3860 | 74.0132 |
| NCC358A - G57 | 0.1780 | 0.0000 | 23.0500 | 0.0000 | 0.0000 | 1.2070 | 0.1450 | 0.0120 | 0.0000 | 0.0080 | 0.1430 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0240 | 0.0000 | 0.0000 | 4.8220 | 0.3375 | 11.7640 | 27.8830 | 2.9570 | 11.0210 | 83.5515 |
| NCC358A - G58 | 0.1930 | 0.0480 | 8.2920  | 0.0000 | 0.0000 | 0.5800 | 0.1360 | 0.0260 | 0.0260 | 0.1020 | 0.1590 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0120 | 0.0270 | 0.0000 | 2.4050 | 0.3880 | 10.9100 | 28.4390 | 3.5200 | 12.5230 | 67.7860 |
| NCC358A - G59 | 0.1220 | 0.0320 | 22.2010 | 0.0000 | 0.0000 | 1.1000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0060 | 0.0000 | 0.0360 | 0.0000 | 0.0090 | 0.0020 | 0.0040 | 0.0160 | 0.0000 | 0.3185 | 0.0150  | 0.1040  | 0.0000 | 0.0680  | 24.0335 |
| NCC358A - G60 | 0.2210 | 0.0000 | 24.4490 | 0.0000 | 0.0000 | 1.2140 | 0.0080 | 0.0180 | 0.0000 | 0.0790 | 0.0630 | 0.0300 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 4.6680 | 0.1919 | 11.4360 | 29.0590 | 3.3740 | 12.2240 | 87.0349 |
| NCC358A - G61 | 0.0990 | 0.0080 | 23.1460 | 0.0000 | 0.0000 | 1.3500 | 0.1930 | 0.0420 | 0.0570 | 0.0000 | 0.1170 | 0.0010 | 0.0000 | 0.0150 | 0.0000 | 0.0000 | 0.2050 | 0.5581 | 8.3260  | 25.2190 | 3.2940 | 13.2100 | 75.8401 |
| NCC358A - G62 | 0.1110 | 0.0000 | 21.3260 | 0.0000 | 0.0000 | 0.7800 | 0.0300 | 0.0060 | 0.0000 | 0.0110 | 0.0260 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0260 | 0.0280 | 0.0110 | 0.2097 | 0.0130  | 0.0600  | 0.0360 | 0.0460  | 22.7197 |
| NCC358A - G63 | 0.0650 | 0.0060 | 24.1870 | 0.0000 | 0.0000 | 1.1270 | 0.1560 | 0.0080 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0860 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0050 | 0.0000 | 0.0000 | 3.7890 | 0.3044 | 11.3570 | 29.9530 | 3.3340 | 12.1170 | 86.5444 |
| NCC358A - G65 | 0.1510 | 0.0110 | 23.4570 | 0.0000 | 0.0000 | 1.0100 | 0.0590 | 0.0290 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0630 | 0.0170 | 0.0000 | 0.0100 | 0.0350 | 0.0000 | 3.7390 | 0.1178 | 12.6700 | 30.6590 | 3.3070 | 11.7870 | 87.2218 |

|                |        |        |         |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |        |         |         |
|----------------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|--------|---------|---------|
| NCC358A - G66  | 0.0980 | 0.2050 | 23.2210 | 0.0000 | 0.0000 | 1.0240 | 0.1390 | 0.0160 | 0.0000 | 0.0370 | 0.1410 | 0.0140 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0690 | 2.9810 | 0.3869 | 13.4350 | 31.8590 | 3.5350 | 11.4560 | 88.6169 |
| NCC358A - G67  | 0.1670 | 0.0000 | 24.1640 | 0.0000 | 0.0000 | 0.9770 | 0.0960 | 0.0050 | 0.0000 | 0.2160 | 0.0810 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 3.3360 | 0.3234 | 12.0210 | 30.0460 | 3.3770 | 11.5320 | 86.3414 |
| NCC358A - G68  | 0.0610 | 0.0110 | 24.7370 | 0.0000 | 0.0000 | 1.0450 | 0.0510 | 0.0070 | 0.0000 | 0.1030 | 0.2290 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0120 | 0.0000 | 0.0250 | 3.8900 | 0.1493 | 10.5770 | 26.2040 | 2.7540 | 10.2530 | 80.1083 |
| NCC358A - G69  | 0.1780 | 0.0000 | 23.0080 | 0.0000 | 0.0000 | 0.8980 | 0.0000 | 0.0090 | 0.0030 | 0.0000 | 0.0230 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0320 | 0.0260 | 0.0050 | 3.7230 | 0.1941 | 11.9080 | 29.3820 | 3.5800 | 12.0170 | 84.9861 |
| NCC358A - G70  | 0.1450 | 0.0220 | 24.6130 | 0.0000 | 0.0000 | 1.0230 | 0.0570 | 0.0210 | 0.0000 | 0.0000 | 0.1020 | 0.0640 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 3.6120 | 0.2872 | 11.7320 | 30.3020 | 3.1880 | 11.9320 | 87.1002 |
| NCC358A - G71  | 0.1080 | 0.0600 | 1.1550  | 0.0000 | 0.0000 | 0.2350 | 0.0610 | 0.0340 | 0.0000 | 0.1120 | 0.0560 | 0.1020 | 0.0000 | 0.0270 | 0.0290 | 0.0320 | 3.6580 | 0.2928 | 11.2890 | 28.3290 | 3.1000 | 11.6540 | 60.3338 |
| NCC358A - G73  | 0.1230 | 0.0470 | 14.7800 | 0.0000 | 0.0000 | 0.8410 | 0.0860 | 0.0190 | 0.0000 | 0.0040 | 0.0480 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0180 | 0.0000 | 3.3240 | 0.4230 | 11.8470 | 29.7020 | 3.4920 | 12.2360 | 76.9900 |
| NCC358A - G74  | 0.0720 | 0.0000 | 23.4260 | 0.0000 | 0.0000 | 1.1380 | 0.0000 | 0.0120 | 0.0000 | 0.0570 | 0.1680 | 0.0670 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 2.8560 | 0.3284 | 11.0440 | 29.9860 | 3.2990 | 12.2240 | 84.6774 |
| NCC358A - G75  | 0.1020 | 0.0150 | 23.8670 | 0.0000 | 0.0000 | 0.8840 | 0.1190 | 0.0320 | 0.0000 | 0.0000 | 0.1760 | 0.0520 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 1.9790 | 0.4487 | 11.1330 | 29.3630 | 3.4980 | 12.7510 | 84.4197 |
| NCC358A - G76  | 0.1200 | 0.0020 | 21.8780 | 0.0000 | 0.0000 | 0.9460 | 0.0000 | 0.0250 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0900 | 0.0260 | 0.0000 | 0.0240 | 0.0450 | 0.0000 | 3.2560 | 0.3301 | 12.1540 | 30.3090 | 3.4700 | 11.7440 | 84.4191 |
| NCC358A - G77  | 0.1280 | 0.0150 | 22.5090 | 0.0000 | 0.0000 | 1.0800 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0310 | 0.0000 | 0.1540 | 0.0320 | 0.0000 | 0.0630 | 0.0000 | 0.0000 | 3.5100 | 0.3608 | 11.5780 | 30.1290 | 3.4030 | 11.8940 | 84.8868 |
| NCC358A - G78  | 0.2000 | 0.0270 | 22.0100 | 0.0000 | 0.0000 | 0.9890 | 0.0000 | 0.0140 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.1260 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0010 | 0.0000 | 3.2480 | 0.2264 | 12.0190 | 30.7040 | 3.2360 | 11.6170 | 84.4174 |
| NCC358A - G79  | 0.1620 | 0.0270 | 23.5070 | 0.0000 | 0.0000 | 0.8540 | 0.0070 | 0.0190 | 0.0000 | 0.0250 | 0.1710 | 0.0710 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0060 | 3.3970 | 0.1543 | 12.4920 | 30.7790 | 3.3130 | 11.8870 | 86.8713 |
| NCC358A - G80  | 0.2010 | 0.0050 | 24.1430 | 0.0000 | 0.0000 | 1.2530 | 0.0230 | 0.0100 | 0.0000 | 0.0530 | 0.1090 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0120 | 0.0130 | 1.1010 | 0.2579 | 6.2630  | 16.5870 | 1.9460 | 7.4030  | 59.3799 |
| NCC358A - G81  | 0.2370 | 0.0000 | 22.5690 | 0.0000 | 0.0000 | 1.1010 | 0.0530 | 0.0150 | 0.0000 | 0.0000 | 0.1650 | 0.0550 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0520 | 3.5180 | 0.2661 | 12.2640 | 31.0680 | 3.3420 | 11.3280 | 86.0331 |
| NCC358A - G82  | 0.1590 | 0.0000 | 24.0040 | 0.0000 | 0.0000 | 1.1150 | 0.0000 | 0.0160 | 0.0000 | 0.0710 | 0.1440 | 0.0090 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0320 | 0.0590 | 3.1150 | 0.1822 | 11.3700 | 29.1430 | 3.4600 | 12.2150 | 85.0942 |
| NCC358A - G83  | 0.2060 | 0.0190 | 13.4470 | 0.0000 | 0.0000 | 0.8790 | 0.0030 | 0.0180 | 0.0760 | 0.0590 | 0.0820 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0340 | 0.0000 | 0.0000 | 4.8380 | 0.1710 | 11.8230 | 28.0980 | 3.1130 | 10.9810 | 73.8470 |
| NCC358A - G84  | 0.2010 | 0.0000 | 23.4970 | 0.0000 | 0.0000 | 1.5480 | 0.0000 | 0.0300 | 0.0910 | 0.0000 | 0.0780 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0540 | 0.0000 | 2.5420 | 0.1774 | 9.0210  | 24.5000 | 2.8530 | 11.4790 | 76.0714 |
| NCC358A - G85  | 0.3100 | 0.0000 | 22.3560 | 0.0000 | 0.0000 | 1.2640 | 0.0000 | 0.0080 | 0.0000 | 0.0600 | 0.0500 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0170 | 0.0000 | 0.0670 | 3.4660 | 0.3367 | 11.9460 | 30.4770 | 3.3450 | 11.9560 | 85.6587 |
| NCC358A - G86  | 0.1580 | 0.0000 | 23.7570 | 0.0000 | 0.0000 | 1.0670 | 0.0000 | 0.0300 | 0.1570 | 0.1540 | 0.0750 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 2.8760 | 0.4002 | 10.8040 | 28.5650 | 3.2740 | 12.5680 | 83.8852 |
| NCC358A - G87  | 0.1220 | 0.0040 | 17.6980 | 0.0000 | 0.0000 | 0.9250 | 0.0000 | 0.0140 | 0.0000 | 0.0350 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0050 | 2.8060 | 0.3384 | 11.9790 | 28.0130 | 2.8020 | 10.6250 | 75.3664 |
| NCC358A - G88  | 0.0820 | 0.0030 | 22.6440 | 0.0000 | 0.0000 | 1.0920 | 0.0200 | 0.0220 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0870 | 0.0390 | 0.0000 | 0.0270 | 0.0000 | 0.0000 | 1.9600 | 0.3608 | 10.1790 | 27.0330 | 3.3670 | 11.7820 | 78.6978 |
| NCC358A - G89  | 0.0840 | 0.0090 | 22.6070 | 0.0000 | 0.0000 | 0.7480 | 0.0280 | 0.0260 | 0.0400 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0690 | 0.0000 | 0.0430 | 0.0000 | 0.0230 | 3.3480 | 0.3093 | 11.7760 | 29.8640 | 3.5650 | 12.1040 | 84.6433 |
| NCC358A - G90  | 0.1180 | 0.0000 | 16.4530 | 0.0000 | 0.0000 | 0.7000 | 0.1220 | 0.0260 | 0.0000 | 0.0790 | 0.0840 | 0.0380 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 2.5400 | 0.4794 | 11.3580 | 29.3840 | 3.3680 | 12.4610 | 77.2104 |
| NCC358A - G91  | 0.2230 | 0.0130 | 22.4250 | 0.0000 | 0.0000 | 1.0420 | 0.0720 | 0.0170 | 0.0000 | 0.0900 | 0.0000 | 0.0190 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0660 | 0.0000 | 4.0750 | 0.2931 | 12.7170 | 29.8850 | 3.3800 | 11.6560 | 85.9731 |
| NCC358A - G92  | 0.1170 | 0.0000 | 21.9570 | 0.0000 | 0.0000 | 0.9310 | 0.1000 | 0.0120 | 0.0000 | 0.0610 | 0.1770 | 0.0840 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 2.9810 | 0.5963 | 10.2340 | 27.9120 | 3.4560 | 12.2940 | 80.9123 |
| NCC358A - G93  | 0.1730 | 0.0470 | 23.1700 | 0.0000 | 0.0000 | 0.8880 | 0.0000 | 0.0110 | 0.0000 | 0.1220 | 0.0760 | 0.0460 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0070 | 0.0430 | 3.1130 | 0.3400 | 12.2190 | 30.4810 | 3.4690 | 11.9330 | 86.1380 |
| NCC358A - G94  | 0.1180 | 0.0000 | 23.4790 | 0.0000 | 0.0000 | 0.9610 | 0.0210 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.1510 | 0.0370 | 0.0000 | 0.0170 | 0.0000 | 0.0380 | 3.5840 | 0.4777 | 12.5520 | 29.3370 | 3.3950 | 11.6950 | 85.8627 |
| NCC358A - G95  | 0.1540 | 0.0120 | 0.1520  | 0.0000 | 0.0000 | 0.1260 | 0.0180 | 0.0000 | 0.0500 | 0.0020 | 0.0000 | 0.0660 | 0.0090 | 0.0000 | 0.0280 | 0.0000 | 0.0290 | 0.4166 | 0.0250  | 0.0560  | 0.0720 | 0.0100  | 1.2256  |
| NCC358A - G96  | 0.0590 | 0.0060 | 23.6410 | 0.0000 | 0.0000 | 0.9620 | 0.1130 | 0.0260 | 0.1110 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0530 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0150 | 0.0610 | 3.5600 | 0.1653 | 11.9880 | 29.4270 | 3.2190 | 12.2730 | 85.6793 |
| NCC358A - G97  | 0.1310 | 0.0000 | 23.3440 | 0.0000 | 0.0000 | 1.1120 | 0.0000 | 0.0130 | 0.0000 | 0.0750 | 0.0860 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 2.8740 | 0.3493 | 11.7780 | 29.8140 | 3.3890 | 12.1370 | 85.1023 |
| NCC358A - G99  | 0.1230 | 0.0000 | 23.2600 | 0.0000 | 0.0000 | 1.1590 | 0.1350 | 0.0220 | 0.0000 | 0.0000 | 0.1910 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0180 | 4.7370 | 0.1923 | 11.0570 | 28.0740 | 3.3830 | 11.5920 | 83.9433 |
| NCC358A - G100 | 0.2480 | 0.0040 | 17.1870 | 0.0000 | 0.0000 | 0.9660 | 0.0000 | 0.0240 | 0.0000 | 0.1340 | 0.0500 | 0.0400 | 0.0000 | 0.0170 | 0.0130 | 0.0000 | 2.5050 | 0.2115 | 12.4660 | 30.3910 | 3.2720 | 11.8720 | 79.4005 |
| NCC358A - G101 | 0.2600 | 0.0110 | 22.9000 | 0.0000 | 0.0000 | 1.2180 | 0.0230 | 0.0220 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0790 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0130 | 0.0000 | 3.8050 | 0.3782 | 12.1520 | 29.3580 | 3.3060 | 11.2940 | 84.8192 |
|                | 0.278  | 0.019  | 20.388  | 0.000  | 0.000  | 0.955  | 0.055  | 0.016  | 0.018  | 0.039  | 0.088  | 0.023  | 0.000  | 0.010  | 0.013  | 0.012  | 2.835  | 0.330  | 10.408  | 26.301  | 3.010  | 10.815  |         |

|              | SiO2   | Al2O3  | P2O5    | HfO2   | ZrO2   | CaO    | Er2O3  | Tm2O3  | Yb2O3  | Lu2O3  | PbO    | Sm2O3  | Gd2O3  | Tb2O3  | Dy2O3  | Y2O3   | ThO2   | UO2    | La2O3   | Ce2O3   | Pr2O3  | Nd2O3   | Total   |
|--------------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|--------|---------|---------|
| NCC126 - G1  | 0.1750 | 0.0350 | 23.9170 | 0.0000 | 0.0000 | 1.1090 | 0.1570 | 0.0290 | 0.0200 | 0.1710 | 0.2600 | 0.0080 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0220 | 3.2910 | 0.3993 | 11.7590 | 28.7270 | 3.1940 | 10.7750 | 84.0483 |
| NCC126 - G3  | 0.0560 | 0.0000 | 23.6470 | 0.0000 | 0.0000 | 1.3260 | 0.0000 | 0.0110 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0440 | 0.0600 | 0.0000 | 0.0240 | 0.0770 | 0.0370 | 4.0970 | 0.3211 | 11.8290 | 29.8090 | 3.0580 | 11.7010 | 86.0971 |
| NCC126 - G4  | 0.1340 | 0.0000 | 24.0670 | 0.0000 | 0.0000 | 0.6510 | 0.0000 | 0.0140 | 0.0000 | 0.0000 | 0.2540 | 0.0140 | 0.0000 | 0.0020 | 0.0100 | 0.0000 | 3.3740 | 0.5020 | 12.9740 | 30.8320 | 3.4120 | 10.4670 | 86.7070 |
| NCC126 - G5  | 0.1150 | 0.0110 | 24.1040 | 0.0000 | 0.0000 | 1.0870 | 0.0660 | 0.0190 | 0.0400 | 0.0000 | 0.1420 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0270 | 0.0000 | 0.0000 | 3.3460 | 0.2725 | 11.1340 | 28.1920 | 2.8960 | 10.9090 | 82.3605 |
| NCC126 - G6  | 0.2180 | 0.0000 | 23.2870 | 0.0000 | 0.0000 | 0.9400 | 0.0580 | 0.0230 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0420 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0010 | 0.0360 | 3.0430 | 0.2618 | 12.2930 | 31.0430 | 3.2960 | 11.6240 | 86.1658 |
| NCC126 - G7  | 0.1310 | 0.0000 | 23.9050 | 0.0000 | 0.0000 | 1.2960 | 0.0000 | 0.0010 | 0.0230 | 0.0540 | 0.2290 | 0.1010 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0550 | 0.0110 | 3.8960 | 0.2585 | 11.7860 | 29.5920 | 3.3130 | 11.2730 | 85.9245 |
| NCC126 - G8  | 0.1310 | 0.0490 | 24.4220 | 0.0000 | 0.0000 | 1.2120 | 0.0300 | 0.0150 | 0.0000 | 0.1780 | 0.0370 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0120 | 0.0050 | 0.0000 | 3.2360 | 0.2334 | 11.6490 | 28.2230 | 2.7940 | 10.7780 | 83.0044 |
| NCC126 - G9  | 0.0070 | 0.0100 | 0.0300  | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0160 | 0.0000 | 0.0120 | 0.0620 | 0.0100 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 3.5390 | 0.1672 | 11.8750 | 30.4180 | 3.5550 | 10.9990 | 60.7002 |
| NCC126 - G10 | 0.0220 | 0.0040 | 0.0060  | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0720 | 0.0200 | 0.0470 | 0.0000 | 0.1940 | 0.0640 | 0.0000 | 0.0440 | 0.0000 | 0.0180 | 3.5290 | 0.3412 | 11.9170 | 30.3900 | 3.3020 | 11.3930 | 61.3632 |
| NCC126 - G11 | 0.2850 | 0.0000 | 24.1740 | 0.0000 | 0.0000 | 0.9800 | 0.0000 | 0.0230 | 0.0000 | 0.1410 | 0.0330 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0040 | 0.0000 | 3.6700 | 0.3057 | 12.4110 | 30.7390 | 3.3070 | 11.6670 | 87.7397 |
| NCC126 - G12 | 0.0850 | 0.0000 | 24.7640 | 0.0000 | 0.0000 | 1.1580 | 0.0410 | 0.0140 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0590 | 0.0060 | 0.0000 | 0.0070 | 0.0180 | 0.0590 | 1.3180 | 0.1303 | 8.6520  | 23.5210 | 2.2550 | 9.5660  | 71.6533 |
| NCC126 - G13 | 0.2210 | 0.0000 | 24.5970 | 0.0000 | 0.0000 | 0.8680 | 0.0300 | 0.0070 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0720 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0270 | 0.0000 | 0.0290 | 3.7090 | 0.2867 | 12.0110 | 29.9470 | 3.2540 | 11.0730 | 86.1317 |
| NCC126 - G14 | 0.2440 | 0.0230 | 23.6000 | 0.0000 | 0.0000 | 1.0210 | 0.0460 | 0.0150 | 0.0000 | 0.0000 | 0.1780 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0810 | 5.1280 | 0.3400 | 11.4300 | 28.8160 | 3.0330 | 11.1000 | 85.0550 |
| NCC126 - G15 | 0.1040 | 0.0190 | 22.4350 | 0.0000 | 0.0000 | 1.1830 | 0.0000 | 0.0250 | 0.0000 | 0.0550 | 0.1500 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0250 | 0.0330 | 3.7370 | 0.4653 | 12.0930 | 29.4510 | 2.9900 | 10.6280 | 83.3683 |
| NCC126 - G16 | 0.0070 | 0.0310 | 24.3900 | 0.0000 | 0.0000 | 1.0740 | 0.1780 | 0.0040 | 0.0540 | 0.0570 | 0.0950 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0570 | 0.0000 | 0.0000 | 3.2560 | 0.4040 | 12.2050 | 29.5180 | 3.0620 | 10.2890 | 84.6810 |
| NCC126 - G17 | 0.1170 | 0.0000 | 20.8240 | 0.0000 | 0.0000 | 1.0510 | 0.0300 | 0.0100 | 0.0000 | 0.0990 | 0.1430 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0270 | 0.0260 | 0.0100 | 4.4780 | 0.2282 | 12.1840 | 29.9770 | 2.9130 | 9.5150  | 79.6523 |
| NCC126 - G18 | 0.0850 | 0.0000 | 24.1190 | 0.0000 | 0.0000 | 1.1710 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0700 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 3.5250 | 0.5166 | 12.5600 | 30.1630 | 3.1790 | 10.9830 | 86.3716 |
| NCC126 - G19 | 0.0780 | 0.0000 | 23.8950 | 0.0000 | 0.0000 | 1.0140 | 0.1070 | 0.0130 | 0.0000 | 0.1230 | 0.1480 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0180 | 0.0000 | 3.3930 | 0.2253 | 11.0740 | 27.8760 | 2.8310 | 10.8830 | 81.6783 |
| NCC126 - G20 | 0.0670 | 0.0070 | 23.4330 | 0.0000 | 0.0000 | 1.0600 | 0.1100 | 0.0290 | 0.0050 | 0.0000 | 0.0630 | 0.0120 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0170 | 0.0000 | 4.1280 | 0.2666 | 12.8650 | 30.3690 | 3.1250 | 11.1900 | 86.7466 |



|              |         |        |         |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |        |         |          |
|--------------|---------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|--------|---------|----------|
| NCC126 - G21 | 0.0700  | 0.0080 | 23.2770 | 0.0000 | 0.0000 | 1.3070 | 0.0250 | 0.0190 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0570 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 4.0570 | 0.3377 | 11.9710 | 29.4760 | 3.4500 | 11.6860 | 85.7407  |
| NCC126 - G22 | 0.2570  | 0.0110 | 23.4100 | 0.0000 | 0.0000 | 1.0180 | 0.0320 | 0.0120 | 0.0000 | 0.0200 | 0.1010 | 0.0280 | 0.0000 | 0.0440 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 4.4200 | 0.3531 | 11.6610 | 28.9400 | 3.0900 | 10.6870 | 84.0841  |
| NCC126 - G24 | 0.1460  | 0.0230 | 25.6300 | 0.0000 | 0.0000 | 1.1240 | 0.0470 | 0.0150 | 0.0000 | 0.1710 | 0.1420 | 0.1090 | 0.0000 | 0.0200 | 0.0000 | 0.0440 | 0.0000 | 0.0000 | 3.6050 | 0.2873 | 11.8380 | 30.2690 | 3.3800 | 11.4260 | 88.2763  |
| NCC126 - G25 | 0.6490  | 0.2100 | 16.2640 | 0.0000 | 0.0000 | 1.5470 | 0.1240 | 0.0160 | 0.0000 | 0.2070 | 0.0150 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0270 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 3.2690 | 0.4846 | 11.2400 | 27.9200 | 3.0410 | 10.4120 | 75.4256  |
| NCC126 - G26 | 0.1260  | 0.0160 | 17.7890 | 0.0000 | 0.0000 | 1.2900 | 0.1530 | 0.0080 | 0.0000 | 0.2210 | 0.0000 | 0.0430 | 0.0000 | 0.0220 | 0.0020 | 0.0410 | 0.0000 | 0.0000 | 4.1110 | 0.3048 | 11.3750 | 27.4060 | 3.0770 | 10.6230 | 76.6078  |
| NCC126 - G27 | 0.1290  | 0.0090 | 22.0310 | 0.0000 | 0.0000 | 1.1000 | 0.0000 | 0.0200 | 0.0000 | 0.0000 | 0.1690 | 0.0730 | 0.0000 | 0.0320 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 3.6950 | 0.4336 | 12.6270 | 30.9590 | 3.1730 | 11.2780 | 85.7286  |
| NCC126 - G29 | 98.5160 | 0.0000 | 0.0420  | 0.0000 | 0.0000 | 0.0040 | 0.0000 | 0.0010 | 0.0000 | 0.1750 | 0.1080 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0100 | 0.0070 | 0.0170 | 0.0000 | 0.0000 | 2.5490 | 0.1801 | 10.1940 | 25.9520 | 2.7810 | 9.7890  | 150.3251 |
| NCC126 - G30 | 0.2020  | 0.0190 | 23.9420 | 0.0000 | 0.0000 | 0.7940 | 0.0000 | 0.0190 | 0.0000 | 0.0040 | 0.1520 | 0.0740 | 0.0000 | 0.0200 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 3.5460 | 0.1482 | 12.1330 | 29.8860 | 3.0620 | 11.0790 | 85.0802  |
| NCC126 - G31 | 0.2380  | 0.0000 | 23.4750 | 0.0000 | 0.0000 | 0.8420 | 0.2520 | 0.0110 | 0.0490 | 0.0000 | 0.0760 | 0.0620 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0310 | 0.0000 | 0.0000 | 3.8660 | 0.3057 | 11.6320 | 28.5590 | 3.1560 | 10.8540 | 83.4087  |
| NCC126 - G32 | 0.2620  | 0.0000 | 13.7340 | 0.0000 | 0.0000 | 0.9510 | 0.0220 | 0.0170 | 0.0500 | 0.0000 | 0.1140 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0070 | 0.0950 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 2.8180 | 0.2701 | 11.9700 | 29.3660 | 3.2700 | 11.1730 | 74.1191  |
| NCC126 - G33 | 0.3140  | 0.0000 | 23.4290 | 0.0000 | 0.0000 | 1.1630 | 0.0390 | 0.0100 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0620 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0100 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 3.1970 | 0.3223 | 12.5070 | 30.4970 | 3.1700 | 11.8600 | 86.5803  |
| NCC126 - G34 | 0.4300  | 0.0280 | 24.6590 | 0.0000 | 0.0000 | 0.9850 | 0.2080 | 0.0220 | 0.1580 | 0.0000 | 0.2300 | 0.1560 | 0.0000 | 0.0080 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 3.8950 | 0.3857 | 12.3240 | 29.8230 | 3.1900 | 10.9590 | 87.4607  |
| NCC126 - G35 | 0.1180  | 0.0160 | 21.0460 | 0.0000 | 0.0000 | 1.1600 | 0.0000 | 0.0310 | 0.0210 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 3.7080 | 0.2121 | 12.1240 | 31.3160 | 3.4570 | 11.7420 | 84.9511  |
| NCC126 - G37 | 0.0840  | 0.0030 | 24.6010 | 0.0000 | 0.0000 | 1.1130 | 0.1520 | 0.0100 | 0.0310 | 0.0190 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0050 | 0.0050 | 0.0000 | 0.0000 | 3.8660 | 0.2476 | 12.1480 | 29.0350 | 2.9900 | 10.8980 | 85.2076  |
| NCC126 - G38 | 0.2460  | 0.0000 | 22.9310 | 0.0000 | 0.0000 | 1.0300 | 0.0000 | 0.0090 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0920 | 0.1220 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0240 | 0.0060 | 0.0000 | 0.0000 | 3.9150 | 0.2447 | 12.3650 | 30.8990 | 3.3680 | 11.5660 | 86.8177  |
| NCC126 - G39 | 0.2860  | 0.0110 | 22.8460 | 0.0000 | 0.0000 | 1.0020 | 0.1280 | 0.0170 | 0.0000 | 0.0000 | 0.1600 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0410 | 0.0680 | 0.0000 | 0.0000 | 3.9510 | 0.3424 | 11.9170 | 29.7370 | 3.3160 | 11.6980 | 85.5204  |
| NCC126 - G40 | 0.0780  | 0.0000 | 23.9950 | 0.0000 | 0.0000 | 1.0480 | 0.3160 | 0.0210 | 0.1070 | 0.0350 | 0.0260 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 3.0610 | 0.5213 | 11.5820 | 28.2130 | 3.1980 | 11.0080 | 83.2093  |
| NCC126 - G41 | 0.1850  | 0.0130 | 23.5520 | 0.0000 | 0.0000 | 0.8360 | 0.1490 | 0.0070 | 0.0980 | 0.0000 | 0.0700 | 0.0110 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 3.2400 | 0.3258 | 11.4600 | 28.9940 | 3.1400 | 11.0310 | 83.1118  |
| NCC126 - G42 | 0.1480  | 0.0000 | 23.2300 | 0.0000 | 0.0000 | 0.7880 | 0.0000 | 0.0240 | 0.0000 | 0.0010 | 0.1680 | 0.0790 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0220 | 0.0300 | 0.0000 | 0.0000 | 3.1190 | 0.2346 | 12.7860 | 31.4390 | 3.4970 | 11.5980 | 87.1636  |
| NCC126 - G43 | 0.1110  | 0.0010 | 25.6010 | 0.0000 | 0.0000 | 1.1840 | 0.0000 | 0.0120 | 0.0000 | 0.0150 | 0.0550 | 0.0220 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0170 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 3.2810 | 0.2494 | 12.2700 | 31.0960 | 3.5310 | 11.5670 | 89.0124  |
| NCC126 - G44 | 0.2080  | 0.0010 | 23.6420 | 0.0000 | 0.0000 | 0.8970 | 0.1860 | 0.0140 | 0.0000 | 0.0000 | 0.1470 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0120 | 0.0180 | 0.1220 | 0.0000 | 0.0000 | 3.2870 | 0.2926 | 12.5510 | 31.5910 | 3.5390 | 11.8320 | 88.3396  |
| NCC126 - G47 | 0.0500  | 0.0000 | 24.4320 | 0.0000 | 0.0000 | 1.0180 | 0.2410 | 0.0170 | 0.0540 | 0.0000 | 0.1770 | 0.0340 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 3.1680 | 0.2513 | 11.1350 | 27.9010 | 3.2210 | 11.1060 | 82.8053  |
| NCC126 - G48 | 0.0800  | 0.0110 | 23.4410 | 0.0000 | 0.0000 | 1.0160 | 0.2030 | 0.0150 | 0.1890 | 0.0930 | 0.0930 | 0.1140 | 0.0000 | 0.0370 | 0.0180 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 3.2850 | 0.2352 | 12.6700 | 29.4850 | 3.3030 | 10.9260 | 85.2142  |
| NCC126 - G49 | 0.2370  | 0.0050 | 24.0840 | 0.0000 | 0.0000 | 0.8110 | 0.2290 | 0.0260 | 0.1050 | 0.0050 | 0.0700 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0070 | 0.0320 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 3.5570 | 0.3109 | 13.5040 | 31.9270 | 3.4840 | 12.2670 | 90.6609  |
| NCC126 - G50 | 0.3140  | 0.0000 | 23.4240 | 0.0000 | 0.0000 | 1.1760 | 0.0710 | 0.0130 | 0.0000 | 0.0630 | 0.1000 | 0.1080 | 0.0000 | 0.0370 | 0.0000 | 0.0060 | 0.0000 | 0.0000 | 5.0090 | 0.2073 | 12.6210 | 30.2490 | 3.2990 | 10.5560 | 87.2533  |
| NCC126 - G51 | 0.2440  | 0.0000 | 23.4580 | 0.0000 | 0.0000 | 0.9530 | 0.0880 | 0.0240 | 0.0050 | 0.0000 | 0.0040 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0770 | 0.0110 | 0.0430 | 0.0000 | 0.0000 | 3.6310 | 0.2933 | 12.5790 | 31.0560 | 3.2790 | 11.9810 | 87.7263  |
| NCC126 - G52 | 0.0880  | 0.0000 | 24.3840 | 0.0000 | 0.0000 | 1.2500 | 0.0740 | 0.0310 | 0.0180 | 0.0000 | 0.1200 | 0.0390 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0060 | 0.0000 | 0.0000 | 3.9560 | 0.2405 | 12.0710 | 29.5200 | 3.3590 | 11.2480 | 86.4045  |
| NCC126 - G53 | 0.0740  | 0.0130 | 23.7020 | 0.0000 | 0.0000 | 1.3040 | 0.0000 | 0.0250 | 0.0000 | 0.0000 | 0.1930 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0020 | 0.0000 | 0.0430 | 0.0000 | 0.0000 | 3.6100 | 0.2087 | 13.0470 | 32.1080 | 3.2800 | 11.7400 | 89.3497  |
| NCC126 - G54 | 0.1360  | 0.0000 | 23.9530 | 0.0000 | 0.0000 | 1.1510 | 0.0530 | 0.0190 | 0.0000 | 0.0480 | 0.0000 | 0.0080 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0020 | 0.0000 | 0.0000 | 3.3710 | 0.2761 | 13.3470 | 32.4510 | 3.5630 | 11.9300 | 90.3081  |
| NCC126 - G55 | 0.0570  | 0.0050 | 23.9510 | 0.0000 | 0.0000 | 1.2510 | 0.1640 | 0.0310 | 0.0050 | 0.0000 | 0.0860 | 0.1380 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 3.5490 | 0.4277 | 12.0750 | 31.1410 | 3.6160 | 12.1730 | 88.6697  |
| NCC126 - G56 | 0.1190  | 0.0000 | 25.2690 | 0.0000 | 0.0000 | 0.9930 | 0.2300 | 0.0250 | 0.0450 | 0.1020 | 0.0780 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 3.6240 | 0.4502 | 11.4550 | 28.6180 | 3.2810 | 10.9270 | 85.2162  |
| NCC126 - G57 | 0.0870  | 0.0000 | 24.2970 | 0.0000 | 0.0000 | 1.2320 | 0.0170 | 0.0200 | 0.0000 | 0.0650 | 0.0000 | 0.0810 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0160 | 0.0000 | 0.0000 | 3.7160 | 0.2542 | 12.8690 | 31.0250 | 3.3400 | 10.9980 | 88.0172  |
| NCC126 - G58 | 0.1190  | 0.0110 | 24.2620 | 0.0000 | 0.0000 | 1.2130 | 0.0670 | 0.0210 | 0.2670 | 0.0000 | 0.0670 | 0.0890 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 3.5780 | 0.3513 | 13.0080 | 31.4270 | 3.4390 | 11.2650 | 89.1843  |
| NCC126 - G59 | 0.0780  | 0.0040 | 24.4270 | 0.0000 | 0.0000 | 1.2300 | 0.1060 | 0.0160 | 0.1170 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0020 | 0.0000 | 0.0470 | 0.0000 | 0.0000 | 3.2880 | 0.2727 | 12.6420 | 30.3230 | 3.5050 | 11.6030 | 87.6607  |
| NCC126 - G60 | 0.1910  | 0.0090 | 23.1340 | 0.0000 | 0.0000 | 1.0720 | 0.1170 | 0.0060 | 0.0000 | 0.1180 | 0.0000 | 0.1170 | 0.0000 | 0.0220 | 0.0000 | 0.0040 | 0.0000 | 0.0000 | 3.5830 | 0.2239 | 12.4850 | 31.0270 | 3.3290 | 11.9340 | 87.3719  |
| NCC126 - G61 | 0.1710  | 0.0190 | 23.6330 | 0.0000 | 0.0000 | 0.9940 | 0.1510 | 0.0150 | 0.0000 | 0.0070 | 0.1740 | 0.0500 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0070 | 0.0440 | 0.0000 | 0.0000 | 4.1510 | 0.3566 | 12.2310 | 30.6990 | 3.4320 | 11.2660 | 87.4006  |
| NCC126 - G62 | 0.1080  | 0.0180 | 24.3030 | 0.0000 | 0.0000 | 1.0890 | 0.0180 | 0.0140 | 0.0000 | 0.2230 | 0.0000 | 0.0330 | 0.0000 | 0.0550 | 0.0350 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 4.2170 | 0.7677 | 12.0800 | 29.5650 | 3.3310 | 11.1040 | 86.9607  |
| NCC126 - G63 | 0.0780  | 0.0320 | 0.3740  | 0.0000 | 0.0000 | 0.1640 | 0.1290 | 0.0180 | 0.0000 | 0.0150 | 0.1440 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 3.7250 | 0.3230 | 12.4300 | 30.5410 | 3.3760 | 11.0460 | 62.3950  |
| NCC126 - G64 | 0.1000  | 0.0000 | 24.5710 | 0.0000 | 0.0000 | 1.3500 | 0.0950 | 0.0010 | 0.0630 | 0.0000 | 0.0530 | 0.1260 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 3.9740 | 0.1660 | 12.9810 | 31.0690 | 3.2120 | 10.4210 | 88.1820  |
| NCC126 - G65 | 0.1360  | 0.0150 | 22.5510 | 0.0000 | 0.0000 | 1.1940 | 0.1650 | 0.0150 | 0.0000 | 0.0890 | 0.1090 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0080 | 0.0050 | 0.0320 | 0.0000 | 0.0000 | 3.8290 | 0.4869 | 12.5230 | 31.0560 | 3.1290 | 11.1780 | 86.5209  |
| NCC126 - G66 | 0.0980  | 0.0000 | 23.6430 | 0.0000 | 0.0000 | 1.2570 | 0.0000 | 0.0050 | 0.0100 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0770 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 2.9550 | 0.3140 | 12.5020 | 31.5710 | 3.4630 | 12.0340 | 87.9290  |
| NCC126 - G67 | 0.1140  | 0.0000 | 25.7490 | 0.0000 | 0.0000 | 1.2170 | 0.0300 | 0.0000 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |        |         |          |

|              |        |        |         |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |         |        |         |         |
|--------------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|--------|---------|---------|
| NCC126 - G71 | 0,2090 | 0,0000 | 24,4550 | 0,0000 | 0,0000 | 0,8730 | 0,0320 | 0,0150 | 0,0140 | 0,0320 | 0,3090 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0070 | 0,0000 | 3,5520 | 0,4101 | 12,3130 | 29,9850 | 3,3400 | 11,1970 | 86,7431 |
| NCC126 - G72 | 0,1040 | 0,0000 | 23,6220 | 0,0000 | 0,0000 | 1,2590 | 0,1540 | 0,0270 | 0,0580 | 0,1410 | 0,0000 | 0,0060 | 0,0000 | 0,0070 | 0,0000 | 0,0500 | 3,5620 | 0,3708 | 11,5600 | 28,9870 | 3,3670 | 11,2720 | 84,5468 |
| NCC126 - G73 | 0,1020 | 0,0060 | 24,2080 | 0,0000 | 0,0000 | 1,1260 | 0,1160 | 0,0110 | 0,0640 | 0,0000 | 0,2220 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0150 | 0,0350 | 0,0000 | 3,0520 | 0,2892 | 12,6990 | 31,3430 | 3,3980 | 11,1180 | 87,8042 |
| NCC126 - G74 | 0,1940 | 0,0490 | 23,5990 | 0,0000 | 0,0000 | 0,9010 | 0,1150 | 0,0140 | 0,0000 | 0,0320 | 0,1830 | 0,0450 | 0,0000 | 0,0150 | 0,0600 | 0,0400 | 4,4600 | 0,4846 | 11,9680 | 29,9390 | 3,2980 | 11,4320 | 86,8286 |
| NCC126 - G75 | 0,0740 | 0,0310 | 23,6220 | 0,0000 | 0,0000 | 1,2360 | 0,0000 | 0,0180 | 0,0000 | 0,0020 | 0,1480 | 0,0420 | 0,0000 | 0,0230 | 0,0000 | 0,0000 | 3,8350 | 0,4059 | 12,3630 | 30,6450 | 3,4400 | 11,1590 | 87,0439 |
| NCC126 - G76 | 0,0490 | 0,0040 | 24,3820 | 0,0000 | 0,0000 | 1,1670 | 0,1200 | 0,0150 | 0,0000 | 0,0660 | 0,1210 | 0,0500 | 0,0000 | 0,0350 | 0,0000 | 0,0000 | 3,3820 | 0,3122 | 11,9520 | 28,1260 | 3,1390 | 10,4640 | 83,3842 |
| NCC126 - G77 | 0,0580 | 0,0000 | 24,2140 | 0,0000 | 0,0000 | 1,2090 | 0,0060 | 0,0160 | 0,0000 | 0,0450 | 0,0180 | 0,0360 | 0,0000 | 0,0300 | 0,0150 | 0,0000 | 3,2320 | 0,3993 | 11,3590 | 28,8420 | 3,2620 | 10,8900 | 83,6313 |
| NCC126 - G78 | 0,0640 | 0,0160 | 24,1300 | 0,0000 | 0,0000 | 1,2230 | 0,0000 | 0,0150 | 0,0470 | 0,0000 | 0,0040 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0450 | 0,0000 | 0,0000 | 3,4380 | 0,4023 | 12,5620 | 30,8370 | 3,3700 | 11,3710 | 87,5243 |
| NCC126 - G79 | 0,1550 | 0,0000 | 24,3750 | 0,0000 | 0,0000 | 1,3030 | 0,0800 | 0,0150 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0210 | 0,0760 | 0,0000 | 0,0020 | 0,0000 | 0,0000 | 1,8440 | 0,4646 | 13,6790 | 31,6960 | 3,6020 | 11,0530 | 88,3656 |
| NCC126 - G80 | 0,0250 | 0,0140 | 23,6790 | 0,0000 | 0,0000 | 0,9950 | 0,1960 | 0,0150 | 0,0000 | 0,0000 | 0,1190 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 3,5170 | 0,3578 | 12,1050 | 29,3490 | 3,3890 | 10,8800 | 84,6408 |
| NCC126 - G81 | 0,0580 | 0,0130 | 25,3840 | 0,0000 | 0,0000 | 1,0630 | 0,0000 | 0,0290 | 0,0570 | 0,1120 | 0,0990 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 2,6790 | 0,3369 | 10,2790 | 27,5020 | 3,1250 | 10,3580 | 81,0949 |
| NCC126 - G82 | 0,1010 | 0,0070 | 23,9500 | 0,0000 | 0,0000 | 1,1370 | 0,0030 | 0,0110 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0180 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0340 | 0,0050 | 3,6790 | 0,4395 | 12,6100 | 31,2290 | 3,0860 | 10,9940 | 87,3035 |
| NCC126 - G83 | 0,1040 | 0,0000 | 24,3850 | 0,0000 | 0,0000 | 1,1760 | 0,1090 | 0,0100 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0360 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0180 | 0,0000 | 0,0000 | 2,0610 | 0,2689 | 9,3850  | 24,7830 | 2,7880 | 9,6340  | 74,7579 |
|              | 1,419  | 0,011  | 22,354  | 0,000  | 0,000  | 1,042  | 0,083  | 0,016  | 0,027  | 0,043  | 0,093  | 0,031  | 0,000  | 0,011  | 0,010  | 0,014  | 3,487  | 0,323  | 11,876  | 29,344  | 3,190  | 10,964  |         |



## APÊNDICE C

Neste apêndice são apresentadas as Tabelas C1 e C2, nas quais estão reunidas as amostras contendo as idades individuais de traços de fissão em monazita (MFT) de cada grão analisado, bem como as densidades superficiais de traços de fissão em monazita associadas e o conteúdo de U. Adicionalmente, apresenta-se o fator zeta utilizado no cálculo das idades, o qual foi determinado a partir da apatita Durango como padrão de idade, resultando em um valor de 351.

**Tabela C1:** Idades individuais de traços de fissão em monazita (MFT), densidades superficiais de traços de fissão em monazita e conteúdo de U das amostras provenientes da Austrália e do Japão.

| Amostra | Grão | Ns  | $\rho_s (\times 10^7)$<br>(traços/cm <sup>2</sup> ) | U<br>(ppm) | Erro U<br>(ppm) | Idade (Ma) | Erro Idade<br>(Ma) |
|---------|------|-----|-----------------------------------------------------|------------|-----------------|------------|--------------------|
| HAR2019 | 1    | 9   | 8,33E+06                                            | 324        | 6               | 9,02       | 1,51               |
| HAR2019 | 2    | 9   | 1,29E+06                                            | 103        | 2               | 4,39       | 0,73               |
| HAR2019 | 3    | 8   | 1,15E+06                                            | 103        | 2               | 3,92       | 0,69               |
| HAR2019 | 4    | 15  | 2,15E+06                                            | 134        | 3               | 5,63       | 0,73               |
| HAR2019 | 5    | 104 | 1,49E+07                                            | 648        | 13              | 8,07       | 0,41               |
| HAR2019 | 6    | 9   | 1,29E+06                                            | 114        | 2               | 3,97       | 0,66               |
| HAR2019 | 7    | 8   | 1,15E+06                                            | 83         | 2               | 4,86       | 0,86               |
| HAR2019 | 8    | 10  | 1,43E+06                                            | 102        | 2               | 4,92       | 0,78               |
| HAR2019 | 9    | 9   | 1,29E+06                                            | 88         | 2               | 5,14       | 0,86               |
| HAR2019 | 10   | 9   | 1,29E+06                                            | 87         | 2               | 5,20       | 0,87               |
| HAR2019 | 11   | 8   | 1,15E+06                                            | 97         | 2               | 4,16       | 0,74               |
| HAR2019 | 12   | 6   | 8,60E+05                                            | 54         | 1               | 5,59       | 1,14               |
| HAR2019 | 13   | 12  | 1,72E+06                                            | 147        | 3               | 4,11       | 0,60               |
| HAR2019 | 14   | 8   | 1,15E+06                                            | 82         | 2               | 4,92       | 0,87               |
| HAR2019 | 15   | 11  | 1,58E+06                                            | 95         | 2               | 5,84       | 0,88               |
| HAR2019 | 16   | 11  | 1,58E+06                                            | 110        | 2               | 5,04       | 0,76               |
| HAR2019 | 17   | 7   | 1,00E+06                                            | 82         | 2               | 4,28       | 0,81               |
| HAR2019 | 18   | 6   | 8,60E+05                                            | 55         | 1               | 5,49       | 1,12               |
| HAR2019 | 19   | 6   | 8,60E+05                                            | 62         | 1               | 4,87       | 1,00               |
| HAR2019 | 20   | 10  | 1,43E+06                                            | 75         | 2               | 6,69       | 1,06               |
| HAR2019 | 21   | 6   | 8,60E+05                                            | 62         | 1               | 4,87       | 1,00               |
| HAR2019 | 22   | 6   | 8,60E+05                                            | 43         | 1               | 7,02       | 1,44               |
| HAR2019 | 23   | 4   | 5,73E+05                                            | 38         | 1               | 5,29       | 1,32               |
| HAR2019 | 24   | 10  | 1,43E+06                                            | 88         | 2               | 5,70       | 0,90               |
| HAR2019 | 25   | 12  | 1,72E+06                                            | 130        | 3               | 4,64       | 0,67               |
| HAR2019 | 26   | 6   | 8,60E+05                                            | 54         | 1               | 5,59       | 1,14               |
| HAR2019 | 27   | 6   | 8,60E+05                                            | 44         | 1               | 6,86       | 1,40               |
| HAR2019 | 28   | 38  | 5,45E+06                                            | 198        | 4               | 9,65       | 0,79               |

| Amostra  | Grão | Ns  | $\rho_s (\times 10^7)$<br>(traços/cm <sup>2</sup> ) | U<br>(ppm) | Erro U<br>(ppm) | Idade (Ma) | Erro Idade<br>(Ma) |
|----------|------|-----|-----------------------------------------------------|------------|-----------------|------------|--------------------|
| HAR2019  | 29   | 7   | 1,00E+06                                            | 53         | 1               | 6,62       | 1,25               |
| HAR2019  | 30   | 5   | 7,17E+05                                            | 36         | 1               | 6,99       | 1,57               |
| HAR2019  | 31   | 13  | 1,86E+06                                            | 133        | 3               | 4,91       | 0,68               |
| HAR2019  | 32   | 17  | 2,44E+06                                            | 165        | 3               | 5,19       | 0,63               |
| HAR2019  | 33   | 8   | 1,15E+06                                            | 81         | 2               | 4,98       | 0,88               |
| HAR2019  | 34   | 12  | 1,72E+06                                            | 98         | 2               | 6,16       | 0,89               |
| HAR2019  | 35   | 12  | 1,72E+06                                            | 83         | 2               | 7,27       | 1,05               |
| HAR2019  | 36   | 7   | 1,00E+06                                            | 85         | 2               | 4,13       | 0,78               |
| HAR2019  | 37   | 47  | 6,74E+06                                            | 261        | 5               | 9,06       | 0,67               |
| HAR2019  | 38   | 8   | 1,15E+06                                            | 98         | 2               | 4,12       | 0,73               |
| HAR2019  | 39   | 6   | 8,60E+05                                            | 51         | 1               | 5,92       | 1,21               |
| HAR2019  | 40   | 7   | 1,00E+06                                            | 82         | 2               | 4,28       | 0,81               |
| HAR2019  | 41   | 5   | 7,17E+05                                            | 37         | 1               | 6,80       | 1,52               |
| HAR2019  | 42   | 6   | 8,60E+05                                            | 46         | 1               | 6,56       | 1,34               |
| HAR2019  | 43   | 6   | 8,60E+05                                            | 57         | 1               | 5,29       | 1,08               |
| HAR2019  | 44   | 45  | 6,45E+06                                            | 365        | 7               | 6,20       | 0,47               |
| HAR2019  | 45   | 55  | 7,88E+06                                            | 494        | 10              | 5,60       | 0,39               |
| HAR2019  | 46   | 7   | 1,00E+06                                            | 74         | 1               | 4,74       | 0,90               |
| HAR2019  | 47   | 14  | 2,01E+06                                            | 133        | 3               | 5,30       | 0,71               |
| HAR2019  | 48   | 13  | 1,86E+06                                            | 154        | 3               | 4,24       | 0,59               |
| HAR2019  | 49   | 5   | 7,17E+05                                            | 43         | 1               | 5,85       | 1,31               |
| ELDORADO | 1    | 61  | 7,88E+06                                            | 675        | 8               | 4,1        | 0,3                |
| ELDORADO | 4    | 11  | 2,44E+06                                            | 93         | 1               | 9,2        | 1,4                |
| ELDORADO | 5    | 17  | 1,00E+06                                            | 88         | 1               | 4,0        | 0,5                |
| ELDORADO | 6    | 7   | 3,58E+06                                            | 256        | 3               | 4,9        | 0,9                |
| ELDORADO | 7    | 25  | 6,88E+06                                            | 331        | 4               | 7,3        | 0,7                |
| ELDORADO | 9    | 6   | 1,43E+06                                            | 138        | 2               | 3,6        | 0,7                |
| ELDORADO | 10   | 10  | 1,25E+07                                            | 485        | 6               | 9,0        | 1,4                |
| ELDORADO | 12   | 7   | 2,15E+06                                            | 88         | 1               | 8,6        | 1,6                |
| ELDORADO | 13   | 15  | 1,43E+06                                            | 154        | 2               | 3,3        | 0,4                |
| ELDORADO | 14   | 10  | 1,72E+06                                            | 167        | 2               | 3,6        | 0,6                |
| ELDORADO | 15   | 12  | 2,29E+06                                            | 168        | 2               | 4,8        | 0,7                |
| ELDORADO | 16   | 16  | 2,01E+06                                            | 98         | 1               | 7,2        | 0,9                |
| ELDORADO | 17   | 14  | 1,43E+06                                            | 80         | 1               | 6,3        | 0,8                |
| ELDORADO | 19   | 13  | 1,15E+06                                            | 97         | 1               | 4,2        | 0,6                |
| ELDORADO | 20   | 8   | 2,01E+06                                            | 97         | 1               | 7,3        | 1,3                |
| ELDORADO | 21   | 14  | 3,73E+06                                            | 144        | 2               | 9,1        | 1,2                |
| ELDORADO | 23   | 13  | 1,15E+06                                            | 115        | 1               | 3,5        | 0,5                |
| ELDORADO | 24   | 8   | 2,15E+06                                            | 156        | 2               | 4,8        | 0,9                |
| ELDORADO | 25   | 15  | 1,15E+06                                            | 71         | 1               | 5,7        | 0,7                |
| ELDORADO | 26   | 8   | 5,30E+06                                            | 283        | 3               | 6,6        | 1,2                |
| ELDORADO | 27   | 37  | 1,48E+07                                            | 591        | 7               | 8,8        | 0,7                |
| ELDORADO | 28   | 103 | 2,01E+06                                            | 97         | 1               | 7,3        | 0,4                |

| Amostra  | Grão | Ns | $\rho_s (\times 10^7)$<br>(traços/cm <sup>2</sup> ) | U<br>(ppm) | Erro U<br>(ppm) | Idade (Ma) | Erro Idade<br>(Ma) |
|----------|------|----|-----------------------------------------------------|------------|-----------------|------------|--------------------|
| ELDORADO | 30   | 12 | 1,43E+06                                            | 51         | 1               | 9,8        | 1,4                |
| ELDORADO | 31   | 10 | 1,15E+06                                            | 115        | 1               | 3,5        | 0,6                |
| ELDORADO | 32   | 8  | 1,43E+06                                            | 79         | 1               | 6,4        | 1,1                |
| ELDORADO | 33   | 10 | 1,72E+06                                            | 167        | 2               | 3,6        | 0,6                |
| ELDORADO | 35   | 13 | 1,39E+07                                            | 502        | 6               | 9,7        | 1,4                |
| ELDORADO | 36   | 97 | 6,59E+06                                            | 236        | 3               | 9,8        | 0,5                |
| ELDORADO | 37   | 46 | 2,01E+06                                            | 150        | 2               | 4,7        | 0,4                |
| ELDORADO | 38   | 14 | 3,58E+06                                            | 294        | 4               | 4,3        | 0,6                |
| ELDORADO | 40   | 38 | 3,73E+06                                            | 194        | 2               | 6,7        | 0,6                |
| ELDORADO | 41   | 26 | 2,01E+06                                            | 185        | 2               | 3,8        | 0,4                |
| ELDORADO | 42   | 14 | 1,86E+06                                            | 167        | 2               | 3,9        | 0,5                |
| ELDORADO | 43   | 13 | 1,00E+06                                            | 88         | 1               | 4,0        | 0,6                |
| NR24B    | 1    | 11 | 4,40E+06                                            | 919        | 11              | 1,68       | 0,25               |
| NR24B    | 2    | 23 | 3,30E+06                                            | 990        | 12              | 1,17       | 0,12               |
| NR24B    | 3    | 20 | 2,87E+06                                            | 857        | 10              | 1,18       | 0,13               |
| NR24B    | 4    | 36 | 5,16E+06                                            | 1329       | 16              | 1,36       | 0,12               |
| NR24B    | 5    | 13 | 1,86E+06                                            | 568        | 7               | 1,15       | 0,16               |
| NR24B    | 6    | 50 | 7,17E+06                                            | 1493       | 18              | 1,68       | 0,12               |
| NR24B    | 7    | 24 | 3,44E+06                                            | 915        | 11              | 1,32       | 0,14               |
| NR24B    | 8    | 45 | 6,45E+06                                            | 1406       | 17              | 1,61       | 0,12               |
| NR24B    | 9    | 15 | 2,15E+06                                            | 750        | 9               | 1,01       | 0,13               |
| NR24B    | 10   | 51 | 7,31E+06                                            | 1663       | 20              | 1,54       | 0,11               |
| NR24B    | 11   | 41 | 5,88E+06                                            | 1499       | 18              | 1,38       | 0,11               |
| NR24B    | 12   | 43 | 6,16E+06                                            | 1311       | 16              | 1,65       | 0,13               |
| NR24B    | 13   | 75 | 1,08E+07                                            | 1915       | 23              | 1,98       | 0,12               |
| NR24B    | 14   | 31 | 4,44E+06                                            | 914        | 11              | 1,70       | 0,15               |
| NR24B    | 15   | 52 | 7,45E+06                                            | 1605       | 19              | 1,63       | 0,12               |
| NR24B    | 16   | 54 | 7,74E+06                                            | 1653       | 20              | 1,64       | 0,11               |
| EY135A   | 1    | 53 | 7,60E+06                                            | 926        | 12              | 2,88       | 0,20               |
| EY135A   | 2    | 82 | 8,14E+06                                            | 935        | 12              | 3,06       | 0,17               |
| EY135A   | 3    | 22 | 8,14E+06                                            | 778        | 12              | 3,67       | 0,39               |
| EY135A   | 4    | 34 | 4,87E+06                                            | 723        | 0               | 2,36       | 0,21               |
| EY135A   | 5    | 38 | 5,45E+06                                            | 870        | 12              | 2,20       | 0,18               |
| EY135A   | 6    | 48 | 6,88E+06                                            | 937        | 12              | 2,58       | 0,19               |
| EY135A   | 7    | 14 | 2,01E+06                                            | 946        | 12              | 0,75       | 0,10               |
| EY135A   | 8    | 33 | 4,73E+06                                            | 978        | 12              | 1,70       | 0,15               |
| EY135A   | 9    | 49 | 7,02E+06                                            | 805        | 12              | 3,06       | 0,22               |
| EY135A   | 10   | 48 | 6,88E+06                                            | 1132       | 14              | 2,13       | 0,16               |
| EY135A   | 11   | 32 | 4,59E+06                                            | 1078       | 14              | 1,49       | 0,13               |
| EY135A   | 12   | 42 | 6,02E+06                                            | 770        | 26              | 2,74       | 0,21               |
| EY135A   | 13   | 36 | 5,16E+06                                            | 968        | 26              | 1,87       | 0,16               |
| EY135A   | 14   | 64 | 9,17E+06                                            | 850        | 26              | 3,79       | 0,24               |
| EY135A   | 15   | 57 | 8,17E+06                                            | 867        | 9               | 3,31       | 0,22               |

| Amostra | Grão | Ns | $\rho_s (\times 10^7)$<br>(traços/cm <sup>2</sup> ) | U<br>(ppm) | Erro U<br>(ppm) | Idade (Ma) | Erro Idade<br>(Ma) |
|---------|------|----|-----------------------------------------------------|------------|-----------------|------------|--------------------|
| EY135A  | 16   | 72 | 1,03E+07                                            | 979        | 9               | 3,69       | 0,22               |
| EY135A  | 17   | 69 | 9,89E+06                                            | 1089       | 9               | 3,19       | 0,20               |
| EY135A  | 18   | 58 | 8,31E+06                                            | 1126       | 9               | 2,59       | 0,17               |
| EY135A  | 19   | 47 | 6,74E+06                                            | 981        | 9               | 2,41       | 0,18               |
| EY135A  | 20   | 67 | 9,60E+06                                            | 989        | 9               | 3,41       | 0,21               |
| EY135A  | 21   | 54 | 7,74E+06                                            | 859        | 8               | 3,16       | 0,22               |
| EY135A  | 22   | 64 | 9,17E+06                                            | 861        | 19              | 3,74       | 0,24               |

**Tabela C2:** Idades individuais de traços de fissão em monazita (MFT), densidades superficiais de traços de fissão em monazita e conteúdo de U das amostras provenientes do Brasil.

| Amostra | Grão | Ns  | $\rho_s (\times 10^7)$<br>(traços/cm <sup>2</sup> ) | U<br>(ppm) | Erro U<br>(ppm) | Idade<br>(Ma) | Erro<br>Idade<br>(Ma) |
|---------|------|-----|-----------------------------------------------------|------------|-----------------|---------------|-----------------------|
| NCC-05A | 1    | 8   | 1,83E+07                                            | 2583       | 28              | 2,49          | 0,44                  |
| NCC-05A | 2    | 23  | 2,93E+07                                            | 1410       | 16              | 7,29          | 0,77                  |
| NCC-05A | 5    | 23  | 2,93E+07                                            | 2213       | 24              | 4,65          | 0,49                  |
| NCC-05A | 7    | 8   | 1,53E+07                                            | 2030       | 22              | 2,64          | 0,47                  |
| NCC-05A | 8    | 7   | 1,34E+07                                            | 978        | 11              | 4,80          | 0,91                  |
| NCC-05A | 11   | 69  | 6,09E+07                                            | 3068       | 34              | 6,96          | 0,43                  |
| NCC-05A | 12   | 10  | 1,43E+07                                            | 1472       | 16              | 3,42          | 0,54                  |
| NCC-05A | 14   | 12  | 2,29E+07                                            | 1490       | 16              | 5,40          | 0,78                  |
| NCC-05A | 15   | 21  | 2,68E+07                                            | 1529       | 17              | 6,14          | 0,68                  |
| NCC-05A | 17   | 31  | 3,23E+07                                            | 2151       | 24              | 5,27          | 0,48                  |
| NCC-05A | 18   | 52  | 6,63E+07                                            | 2328       | 26              | 9,98          | 0,71                  |
| NCC-05A | 19   | 111 | 7,96E+07                                            | 2978       | 33              | 9,37          | 0,46                  |
| NCC-05A | 23   | 103 | 7,38E+07                                            | 2437       | 27              | 10,62         | 0,54                  |
| NCC-05A | 24   | 32  | 4,59E+07                                            | 2441       | 27              | 6,59          | 0,59                  |
| NCC-05A | 25   | 80  | 5,73E+07                                            | 3544       | 39              | 5,68          | 0,33                  |
| NCC-05A | 27   | 25  | 2,87E+07                                            | 1564       | 17              | 6,43          | 0,65                  |
| NCC-05A | 28   | 15  | 2,15E+07                                            | 1551       | 17              | 4,86          | 0,63                  |
| NCC-05A | 29   | 7   | 2,01E+07                                            | 2706       | 30              | 2,60          | 0,49                  |
| NCC-05A | 31   | 3   | 1,72E+07                                            | 696        | 8               | 8,66          | 2,50                  |
| NCC-05A | 34   | 53  | 4,34E+07                                            | 1514       | 17              | 10,06         | 0,70                  |
| NCC-05A | 36   | 8   | 1,53E+07                                            | 1049       | 12              | 5,11          | 0,91                  |
| NCC-05A | 37   | 10  | 2,29E+07                                            | 1816       | 20              | 4,43          | 0,70                  |
| NCC-05A | 39   | 8   | 1,53E+07                                            | 1287       | 14              | 4,17          | 0,74                  |
| NCC-05A | 41   | 8   | 1,53E+07                                            | 1534       | 17              | 3,50          | 0,62                  |
| NCC-05A | 43   | 13  | 2,98E+07                                            | 2468       | 27              | 4,24          | 0,59                  |
| NCC-05A | 45   | 22  | 2,80E+07                                            | 1785       | 20              | 5,51          | 0,59                  |
| NCC-05A | 46   | 25  | 3,58E+07                                            | 1667       | 18              | 7,54          | 0,76                  |
| NCC-05A | 48   | 55  | 4,85E+07                                            | 2036       | 22              | 8,36          | 0,58                  |
| NCC-05A | 49   | 17  | 1,95E+07                                            | 1886       | 21              | 3,63          | 0,44                  |

| Amostra | Grão | Ns  | $\rho s (\times 10^7)$<br>(traços/cm <sup>2</sup> ) | U<br>(ppm) | Erro U<br>(ppm) | Idade<br>(Ma) | Erro<br>Idade |
|---------|------|-----|-----------------------------------------------------|------------|-----------------|---------------|---------------|
| NCC-05A | 50   | 44  | 3,60E+07                                            | 1737       | 19              | 7,28          | 0,56          |
| NCC-05A | 52   | 18  | 2,06E+07                                            | 1313       | 14              | 5,51          | 0,65          |
| NCC-05A | 53   | 4   | 1,53E+07                                            | 1975       | 22              | 2,72          | 0,68          |
| NCC-05A | 54   | 9   | 1,72E+07                                            | 1564       | 17              | 3,86          | 0,65          |
| NCC-05A | 55   | 6   | 1,72E+07                                            | 2600       | 29              | 2,32          | 0,47          |
| NCC-05A | 58   | 5   | 9,56E+06                                            | 1243       | 14              | 2,70          | 0,60          |
| NCC-05A | 59   | 8   | 1,53E+07                                            | 1800       | 20              | 2,98          | 0,53          |
| NCC-05A | 63   | 9   | 1,72E+07                                            | 1948       | 21              | 3,10          | 0,52          |
| NCC-05A | 65   | 5   | 1,43E+07                                            | 529        | 6               | 9,51          | 2,13          |
| NCC-05A | 67   | 85  | 7,50E+07                                            | 2423       | 27              | 10,85         | 0,61          |
| NCC-05A | 69   | 14  | 2,01E+07                                            | 1370       | 15              | 5,14          | 0,69          |
| NCC-05A | 71   | 3   | 1,15E+07                                            | 1789       | 20              | 2,25          | 0,65          |
| NCC-05A | 72   | 4   | 2,29E+07                                            | 1573       | 17              | 5,12          | 1,28          |
| NCC-05A | 73   | 7   | 2,01E+07                                            | 2389       | 26              | 2,95          | 0,56          |
| NCC-05A | 75   | 5   | 1,15E+07                                            | 1186       | 13              | 3,39          | 0,76          |
| NCC-05A | 76   | 11  | 1,58E+07                                            | 1807       | 20              | 3,06          | 0,46          |
| NCC-05A | 77   | 13  | 1,86E+07                                            | 2609       | 29              | 2,51          | 0,35          |
| NCC-05A | 78   | 7   | 1,34E+07                                            | 1331       | 15              | 3,53          | 0,67          |
| NCC-05A | 79   | 15  | 2,46E+07                                            | 3544       | 39              | 2,43          | 0,32          |
| NCC-05A | 80   | 8   | 1,31E+07                                            | 670        | 7               | 6,86          | 1,22          |
| NCC-05A | 82   | 5   | 1,15E+07                                            | 785        | 9               | 5,13          | 1,15          |
| NCC-05A | 83   | 7   | 1,61E+07                                            | 890        | 10              | 6,33          | 1,20          |
| NCC-05A | 85   | 4   | 1,53E+07                                            | 1551       | 17              | 3,46          | 0,87          |
| NCC-05A | 86   | 20  | 1,91E+07                                            | 1543       | 17              | 4,35          | 0,49          |
| NCC-05A | 87   | 128 | 9,17E+07                                            | 3582       | 39              | 8,98          | 0,42          |
| NCC-05A | 91   | 13  | 1,86E+07                                            | 1763       | 19              | 3,71          | 0,52          |
| NCC-05A | 92   | 4   | 1,15E+07                                            | 485        | 5               | 8,30          | 2,08          |
| NCC-05A | 93   | 10  | 2,87E+07                                            | 1631       | 18              | 6,17          | 0,98          |
| NCC-05A | 94   | 6   | 1,15E+07                                            | 1507       | 17              | 2,67          | 0,55          |
| NCC-05A | 95   | 12  | 2,75E+07                                            | 2045       | 22              | 4,72          | 0,68          |
| NCC-05A | 97   | 5   | 1,15E+07                                            | 1569       | 17              | 2,56          | 0,57          |
| NCC-05A | 98   | 7   | 1,34E+07                                            | 1588       | 17              | 2,96          | 0,56          |
| NCC-05A | 99   | 5   | 1,43E+07                                            | 1317       | 14              | 3,82          | 0,86          |
| NCC-05A | 101  | 13  | 2,13E+07                                            | 2856       | 31              | 2,62          | 0,36          |
| NCC-05A | 102  | 7   | 1,15E+07                                            | 855        | 9               | 4,71          | 0,89          |
| NCC-05A | 105  | 7   | 1,34E+07                                            | 1375       | 15              | 3,41          | 0,65          |
| NCC-05A | 106  | 10  | 1,64E+07                                            | 1296       | 14              | 4,44          | 0,70          |
| NCC-05A | 107  | 8   | 1,31E+07                                            | 1851       | 20              | 2,48          | 0,44          |
| NCC-05A | 108  | 12  | 1,53E+07                                            | 758        | 8               | 7,08          | 1,03          |
| NCC-05A | 109  | 20  | 2,09E+07                                            | 2451       | 27              | 2,99          | 0,34          |
| NCC-05A | 110  | 6   | 1,38E+07                                            | 1005       | 11              | 4,80          | 0,98          |
| NCC-05A | 111  | 9   | 1,72E+07                                            | 1384       | 15              | 4,36          | 0,73          |
| NCC-05A | 112  | 7   | 1,61E+07                                            | 846        | 9               | 6,66          | 1,26          |

| Amostra  | Grão | Ns | $\rho s (\times 10^7)$<br>(traços/cm <sup>2</sup> ) | U<br>(ppm) | Erro U<br>(ppm) | Idade<br>(Ma) | Erro<br>Idade |
|----------|------|----|-----------------------------------------------------|------------|-----------------|---------------|---------------|
| NCC-05A  | 113  | 4  | 1,53E+07                                            | 934        | 10              | 5,74          | 1,44          |
| NCC-05A  | 114  | 3  | 1,15E+07                                            | 1340       | 15              | 3,00          | 0,87          |
| NCC-05A  | 115  | 9  | 1,47E+07                                            | 1102       | 12              | 4,69          | 0,79          |
| NCC-05A  | 117  | 9  | 2,58E+07                                            | 1410       | 16              | 6,42          | 1,07          |
| NCC-05A  | 118  | 42 | 3,71E+07                                            | 1331       | 15              | 9,76          | 0,77          |
| NCC-05A  | 119  | 13 | 2,13E+07                                            | 1507       | 17              | 4,96          | 0,69          |
| NCC-05A  | 120  | 7  | 1,34E+07                                            | 1251       | 14              | 3,75          | 0,71          |
| NCC-310  | 2    | 19 | 2,98E+07                                            | 860        | 8               | 12,15         | 1,40          |
| NCC-310  | 3    | 12 | 1,72E+07                                            | 1388       | 12              | 4,35          | 0,63          |
| NCC-310  | 4    | 10 | 1,43E+07                                            | 1363       | 12              | 3,69          | 0,59          |
| NCC-310  | 5    | 23 | 2,20E+07                                            | 1150       | 10              | 6,70          | 0,70          |
| NCC-310  | 6    | 52 | 3,98E+07                                            | 1299       | 12              | 10,73         | 0,76          |
| NCC-310  | 8    | 41 | 3,13E+07                                            | 1101       | 10              | 9,99          | 0,79          |
| NCC-310  | 9    | 14 | 1,61E+07                                            | 1161       | 10              | 4,85          | 0,65          |
| NCC-310  | 10   | 26 | 2,48E+07                                            | 941        | 8               | 9,26          | 0,92          |
| NCC-310  | 11   | 37 | 3,03E+07                                            | 1015       | 9               | 10,47         | 0,87          |
| NCC-310  | 14   | 10 | 2,87E+07                                            | 2558       | 23              | 3,93          | 0,62          |
| NCC-310  | 15   | 9  | 1,29E+07                                            | 965        | 9               | 4,69          | 0,78          |
| NCC-310  | 16   | 15 | 1,91E+07                                            | 1265       | 11              | 5,30          | 0,69          |
| NCC-310  | 17   | 10 | 1,64E+07                                            | 1299       | 12              | 4,43          | 0,70          |
| NCC-310  | 18   | 17 | 1,95E+07                                            | 1053       | 9               | 6,50          | 0,79          |
| NCC-310  | 20   | 23 | 2,20E+07                                            | 920        | 8               | 8,38          | 0,88          |
| NCC-310  | 21   | 22 | 2,10E+07                                            | 869        | 8               | 8,48          | 0,91          |
| NCC-310  | 22   | 32 | 2,62E+07                                            | 1035       | 9               | 8,88          | 0,79          |
| NCC-310  | 23   | 13 | 1,24E+07                                            | 758        | 7               | 5,75          | 0,80          |
| NCC-310  | 25   | 25 | 2,39E+07                                            | 1215       | 11              | 6,90          | 0,70          |
| NCC-310  | 26   | 3  | 1,15E+07                                            | 1667       | 15              | 2,41          | 0,70          |
| NCC-310  | 27   | 19 | 1,98E+07                                            | 1035       | 9               | 6,71          | 0,78          |
| NCC-310  | 28   | 10 | 7,65E+06                                            | 758        | 7               | 3,54          | 0,56          |
| NCC-310  | 29   | 22 | 2,29E+07                                            | 1215       | 11              | 6,62          | 0,71          |
| NCC-358A | 21   | 8  | 4,59E+07                                            | 2104       | 25              | 7,65          | 1,36          |
| NCC-358A | 22   | 21 | 2,19E+07                                            | 2530       | 30              | 3,04          | 0,33          |
| NCC-358A | 23   | 18 | 2,06E+07                                            | 2476       | 30              | 2,93          | 0,35          |
| NCC-358A | 26   | 64 | 4,59E+07                                            | 1666       | 20              | 9,66          | 0,62          |
| NCC-358A | 27   | 8  | 1,83E+07                                            | 1419       | 17              | 4,54          | 0,80          |
| NCC-358A | 28   | 58 | 4,75E+07                                            | 1820       | 22              | 9,16          | 0,61          |
| NCC-358A | 29   | 27 | 2,38E+07                                            | 2154       | 26              | 3,88          | 0,38          |
| NCC-358A | 30   | 50 | 3,82E+07                                            | 2592       | 31              | 5,18          | 0,37          |
| NCC-358A | 31   | 11 | 2,10E+07                                            | 3024       | 36              | 2,44          | 0,37          |
| NCC-358A | 33   | 15 | 2,15E+07                                            | 2758       | 33              | 2,74          | 0,36          |
| NCC-358A | 34   | 35 | 3,34E+07                                            | 3980       | 48              | 2,95          | 0,25          |
| NCC-358A | 35   | 23 | 2,20E+07                                            | 2869       | 34              | 2,69          | 0,28          |
| NCC-358A | 36   | 34 | 3,25E+07                                            | 2826       | 34              | 4,03          | 0,35          |

| Amostra  | Grão | Ns | $\rho s (\times 10^7)$<br>(traços/cm <sup>2</sup> ) | U<br>(ppm) | Erro U<br>(ppm) | Idade<br>(Ma) | Erro<br>Idade |
|----------|------|----|-----------------------------------------------------|------------|-----------------|---------------|---------------|
| NCC-358A | 37   | 20 | 3,28E+07                                            | 4147       | 50              | 2,77          | 0,31          |
| NCC-358A | 38   | 23 | 2,40E+07                                            | 1975       | 24              | 4,26          | 0,45          |
| NCC-358A | 39   | 25 | 2,39E+07                                            | 3091       | 37              | 2,71          | 0,27          |
| NCC-358A | 40   | 60 | 4,30E+07                                            | 3190       | 38              | 4,73          | 0,31          |
| NCC-358A | 41   | 50 | 5,21E+07                                            | 2320       | 28              | 7,88          | 0,57          |
| NCC-358A | 42   | 60 | 5,29E+07                                            | 3129       | 38              | 5,94          | 0,39          |
| NCC-358A | 43   | 12 | 2,29E+07                                            | 1487       | 18              | 5,41          | 0,78          |
| NCC-358A | 46   | 38 | 3,96E+07                                            | 5038       | 60              | 2,76          | 0,23          |
| NCC-358A | 47   | 68 | 5,20E+07                                            | 3264       | 39              | 5,59          | 0,35          |
| NCC-358A | 48   | 31 | 2,73E+07                                            | 3783       | 45              | 2,54          | 0,23          |
| NCC-358A | 49   | 18 | 2,58E+07                                            | 2487       | 30              | 3,64          | 0,43          |
| NCC-358A | 50   | 8  | 1,31E+07                                            | 680        | 8               | 6,76          | 1,20          |
| NCC-358A | 51   | 14 | 2,01E+07                                            | 2450       | 29              | 2,87          | 0,39          |
| NCC-358A | 52   | 10 | 1,64E+07                                            | 2199       | 26              | 2,61          | 0,41          |
| NCC-358A | 53   | 8  | 1,83E+07                                            | 1950       | 23              | 3,30          | 0,59          |
| NCC-358A | 54   | 14 | 2,68E+07                                            | 3743       | 45              | 2,51          | 0,34          |
| NCC-358A | 55   | 56 | 4,28E+07                                            | 1543       | 19              | 9,73          | 0,66          |
| NCC-358A | 56   | 69 | 5,65E+07                                            | 3573       | 43              | 5,55          | 0,34          |
| NCC-358A | 57   | 42 | 4,38E+07                                            | 2511       | 30              | 6,12          | 0,48          |
| NCC-358A | 58   | 63 | 8,03E+07                                            | 2887       | 35              | 9,75          | 0,63          |
| NCC-358A | 59   | 39 | 4,97E+07                                            | 2370       | 28              | 7,36          | 0,60          |
| NCC-358A | 60   | 3  | 1,15E+07                                            | 1428       | 17              | 2,82          | 0,81          |
| NCC-358A | 61   | 21 | 3,01E+07                                            | 4153       | 50              | 2,54          | 0,28          |
| NCC-358A | 62   | 17 | 2,15E+07                                            | 1560       | 19              | 4,84          | 0,59          |
| NCC-358A | 63   | 32 | 2,82E+07                                            | 2265       | 27              | 4,37          | 0,39          |
| NCC-358A | 65   | 3  | 1,15E+07                                            | 876        | 11              | 4,59          | 1,33          |
| NCC-358A | 66   | 14 | 2,01E+07                                            | 2879       | 35              | 2,45          | 0,33          |
| NCC-358A | 67   | 41 | 3,36E+07                                            | 2407       | 29              | 4,90          | 0,39          |
| NCC-358A | 68   | 9  | 1,72E+07                                            | 1111       | 13              | 5,43          | 0,91          |
| NCC-358A | 69   | 7  | 1,34E+07                                            | 1444       | 17              | 3,25          | 0,62          |
| NCC-358A | 70   | 15 | 1,72E+07                                            | 2137       | 26              | 2,82          | 0,37          |
| NCC-358A | 71   | 7  | 2,01E+07                                            | 2178       | 26              | 3,23          | 0,61          |
| NCC-358A | 73   | 35 | 3,34E+07                                            | 3147       | 38              | 3,73          | 0,32          |
| NCC-358A | 74   | 57 | 4,67E+07                                            | 2444       | 29              | 6,70          | 0,45          |
| NCC-358A | 75   | 41 | 3,62E+07                                            | 3338       | 40              | 3,80          | 0,30          |
| NCC-358A | 76   | 17 | 2,17E+07                                            | 2456       | 29              | 3,10          | 0,38          |
| NCC-358A | 77   | 81 | 5,81E+07                                            | 2684       | 32              | 7,59          | 0,43          |
| NCC-358A | 78   | 16 | 2,04E+07                                            | 1685       | 20              | 4,25          | 0,53          |
| NCC-358A | 79   | 30 | 3,13E+07                                            | 1148       | 14              | 9,56          | 0,88          |
| NCC-358A | 80   | 12 | 2,29E+07                                            | 1919       | 23              | 4,19          | 0,61          |
| NCC-358A | 81   | 11 | 1,58E+07                                            | 1980       | 24              | 2,79          | 0,42          |
| NCC-358A | 82   | 10 | 1,64E+07                                            | 1356       | 16              | 4,24          | 0,67          |
| NCC-358A | 83   | 4  | 1,15E+07                                            | 1272       | 15              | 3,16          | 0,79          |

| Amostra  | Grão | Ns | $\rho s (\times 10^7)$<br>(traços/cm <sup>2</sup> ) | U<br>(ppm) | Erro U<br>(ppm) | Idade<br>(Ma) | Erro<br>Idade |
|----------|------|----|-----------------------------------------------------|------------|-----------------|---------------|---------------|
| NCC-358A | 84   | 10 | 1,64E+07                                            | 1320       | 16              | 4,35          | 0,69          |
| NCC-358A | 85   | 12 | 1,97E+07                                            | 2505       | 30              | 2,75          | 0,40          |
| NCC-358A | 86   | 16 | 2,29E+07                                            | 2978       | 36              | 2,70          | 0,34          |
| NCC-358A | 87   | 34 | 3,54E+07                                            | 2518       | 30              | 4,94          | 0,43          |
| NCC-358A | 88   | 14 | 2,29E+07                                            | 2684       | 32              | 3,00          | 0,40          |
| NCC-358A | 89   | 80 | 6,55E+07                                            | 2302       | 28              | 9,99          | 0,57          |
| NCC-358A | 90   | 31 | 3,56E+07                                            | 3567       | 43              | 3,50          | 0,32          |
| NCC-358A | 91   | 7  | 1,61E+07                                            | 2181       | 26              | 2,58          | 0,49          |
| NCC-358A | 92   | 64 | 4,89E+07                                            | 4437       | 53              | 3,87          | 0,25          |
| NCC-358A | 93   | 16 | 2,62E+07                                            | 2530       | 30              | 3,64          | 0,46          |
| NCC-358A | 94   | 34 | 3,54E+07                                            | 3554       | 43              | 3,50          | 0,30          |
| NCC-358A | 95   | 61 | 7,00E+07                                            | 3100       | 37              | 7,92          | 0,52          |
| NCC-358A | 96   | 17 | 2,17E+07                                            | 1230       | 15              | 6,18          | 0,75          |
| NCC-358A | 97   | 15 | 2,15E+07                                            | 2599       | 31              | 2,90          | 0,38          |
| NCC-358A | 99   | 6  | 1,38E+07                                            | 1431       | 17              | 3,37          | 0,69          |
| NCC-358A | 100  | 4  | 1,53E+07                                            | 1574       | 19              | 3,41          | 0,85          |
| NCC-358A | 101  | 54 | 4,13E+07                                            | 2814       | 34              | 5,15          | 0,36          |
| NCC-126  | 1    | 45 | 5,97E+07                                            | 2001       | 22              | 10,46         | 0,79          |
| NCC-126  | 3    | 57 | 4,67E+07                                            | 2389       | 26              | 6,86          | 0,46          |
| NCC-126  | 4    | 25 | 2,61E+07                                            | 3735       | 41              | 2,45          | 0,25          |
| NCC-126  | 5    | 16 | 2,29E+07                                            | 2028       | 22              | 3,97          | 0,50          |
| NCC-126  | 6    | 47 | 4,15E+07                                            | 1948       | 21              | 7,47          | 0,55          |
| NCC-126  | 7    | 16 | 2,04E+07                                            | 1923       | 21              | 3,72          | 0,47          |
| NCC-126  | 8    | 12 | 1,72E+07                                            | 1737       | 19              | 3,48          | 0,50          |
| NCC-126  | 9    | 4  | 1,15E+07                                            | 1244       | 14              | 3,23          | 0,81          |
| NCC-126  | 10   | 10 | 1,64E+07                                            | 2539       | 28              | 2,26          | 0,36          |
| NCC-126  | 11   | 34 | 3,00E+07                                            | 2274       | 25              | 4,63          | 0,40          |
| NCC-126  | 12   | 5  | 1,43E+07                                            | 970        | 11              | 5,19          | 1,16          |
| NCC-126  | 13   | 25 | 2,39E+07                                            | 2133       | 23              | 3,93          | 0,40          |
| NCC-126  | 14   | 15 | 1,72E+07                                            | 2530       | 28              | 2,39          | 0,31          |
| NCC-126  | 15   | 28 | 2,47E+07                                            | 3462       | 38              | 2,50          | 0,24          |
| NCC-126  | 16   | 28 | 2,47E+07                                            | 3006       | 33              | 2,88          | 0,28          |
| NCC-126  | 17   | 17 | 2,17E+07                                            | 1699       | 19              | 4,47          | 0,55          |
| NCC-126  | 18   | 36 | 2,95E+07                                            | 3843       | 42              | 2,69          | 0,23          |
| NCC-126  | 19   | 13 | 1,49E+07                                            | 1676       | 18              | 3,12          | 0,43          |
| NCC-126  | 20   | 13 | 1,36E+07                                            | 1984       | 22              | 2,40          | 0,33          |
| NCC-126  | 21   | 16 | 1,83E+07                                            | 2512       | 28              | 2,56          | 0,32          |
| NCC-126  | 22   | 39 | 7,45E+07                                            | 2627       | 29              | 9,95          | 0,81          |
| NCC-126  | 24   | 13 | 1,66E+07                                            | 2138       | 24              | 2,72          | 0,38          |
| NCC-126  | 25   | 27 | 2,81E+07                                            | 3605       | 40              | 2,74          | 0,27          |
| NCC-126  | 26   | 17 | 2,17E+07                                            | 2268       | 25              | 3,35          | 0,41          |
| NCC-126  | 27   | 20 | 2,09E+07                                            | 3226       | 35              | 2,27          | 0,26          |
| NCC-126  | 29   | 7  | 2,01E+07                                            | 1340       | 15              | 5,26          | 1,00          |



| Amostra | Grão | Ns | $\rho s (\times 10^7)$<br>(traços/cm <sup>2</sup> ) | U<br>(ppm) | Erro U<br>(ppm) | Idade<br>(Ma) | Erro<br>Idade |
|---------|------|----|-----------------------------------------------------|------------|-----------------|---------------|---------------|
| NCC-126 | 30   | 14 | 1,34E+07                                            | 1103       | 12              | 4,26          | 0,57          |
| NCC-126 | 31   | 11 | 1,80E+07                                            | 2274       | 25              | 2,78          | 0,42          |
| NCC-126 | 32   | 9  | 1,72E+07                                            | 2010       | 22              | 3,00          | 0,50          |
| NCC-126 | 33   | 16 | 1,83E+07                                            | 2398       | 26              | 2,69          | 0,34          |
| NCC-126 | 34   | 16 | 1,83E+07                                            | 2870       | 32              | 2,24          | 0,28          |
| NCC-126 | 35   | 8  | 2,29E+07                                            | 1578       | 17              | 5,10          | 0,90          |
| NCC-126 | 37   | 6  | 1,72E+07                                            | 1842       | 20              | 3,28          | 0,67          |
| NCC-126 | 38   | 3  | 1,15E+07                                            | 1821       | 20              | 2,21          | 0,64          |
| NCC-126 | 39   | 19 | 1,82E+07                                            | 2548       | 28              | 2,50          | 0,29          |
| NCC-126 | 40   | 21 | 2,68E+07                                            | 3879       | 43              | 2,42          | 0,27          |
| NCC-126 | 41   | 59 | 4,23E+07                                            | 2424       | 27              | 6,12          | 0,41          |
| NCC-126 | 42   | 15 | 1,91E+07                                            | 1745       | 19              | 3,84          | 0,50          |
| NCC-126 | 43   | 4  | 1,53E+07                                            | 1856       | 20              | 2,89          | 0,72          |
| NCC-126 | 44   | 15 | 1,72E+07                                            | 2177       | 24              | 2,77          | 0,36          |
| NCC-126 | 47   | 18 | 1,72E+07                                            | 1870       | 21              | 3,23          | 0,38          |
| NCC-126 | 48   | 15 | 1,56E+07                                            | 1750       | 19              | 3,14          | 0,41          |
| NCC-126 | 49   | 30 | 5,73E+07                                            | 2313       | 25              | 8,70          | 0,80          |
| NCC-126 | 50   | 15 | 1,56E+07                                            | 1543       | 17              | 3,56          | 0,46          |
| NCC-126 | 51   | 16 | 2,04E+07                                            | 2182       | 24              | 3,28          | 0,41          |
| NCC-126 | 52   | 10 | 1,27E+07                                            | 1789       | 20              | 2,50          | 0,40          |
| NCC-126 | 53   | 13 | 1,86E+07                                            | 1553       | 17              | 4,21          | 0,59          |
| NCC-126 | 54   | 5  | 1,43E+07                                            | 2054       | 23              | 2,45          | 0,55          |
| NCC-126 | 55   | 31 | 2,96E+07                                            | 3182       | 35              | 3,27          | 0,30          |
| NCC-126 | 56   | 20 | 2,29E+07                                            | 3350       | 37              | 2,40          | 0,27          |
| NCC-126 | 57   | 11 | 1,58E+07                                            | 1891       | 21              | 2,93          | 0,44          |
| NCC-126 | 58   | 12 | 1,72E+07                                            | 2614       | 29              | 2,31          | 0,33          |
| NCC-126 | 59   | 4  | 1,53E+07                                            | 2029       | 22              | 2,64          | 0,66          |
| NCC-126 | 60   | 16 | 1,83E+07                                            | 1666       | 18              | 3,86          | 0,49          |
| NCC-126 | 61   | 4  | 2,29E+07                                            | 2653       | 29              | 3,03          | 0,76          |
| NCC-126 | 62   | 21 | 4,01E+07                                            | 5712       | 63              | 2,47          | 0,27          |
| NCC-126 | 63   | 13 | 1,49E+07                                            | 2403       | 26              | 2,18          | 0,30          |
| NCC-126 | 64   | 13 | 1,86E+07                                            | 1235       | 14              | 5,29          | 0,74          |
| NCC-126 | 65   | 41 | 4,70E+07                                            | 3623       | 40              | 4,55          | 0,36          |
| NCC-126 | 66   | 14 | 1,78E+07                                            | 2336       | 26              | 2,68          | 0,36          |
| NCC-126 | 67   | 4  | 1,53E+07                                            | 1414       | 16              | 3,79          | 0,95          |
| NCC-126 | 68   | 8  | 1,31E+07                                            | 1517       | 17              | 3,03          | 0,54          |
| NCC-126 | 69   | 15 | 1,72E+07                                            | 2508       | 28              | 2,41          | 0,31          |
| NCC-126 | 70   | 17 | 1,77E+07                                            | 2565       | 28              | 2,42          | 0,30          |
| NCC-126 | 71   | 21 | 2,19E+07                                            | 3051       | 34              | 2,52          | 0,28          |
| NCC-126 | 72   | 27 | 2,38E+07                                            | 2759       | 30              | 3,03          | 0,29          |
| NCC-126 | 73   | 10 | 1,64E+07                                            | 2152       | 24              | 2,67          | 0,42          |
| NCC-126 | 74   | 29 | 3,02E+07                                            | 3605       | 40              | 2,94          | 0,28          |
| NCC-126 | 75   | 12 | 2,29E+07                                            | 3020       | 33              | 2,67          | 0,39          |

| <b>Amostra</b> | <b>Grão</b> | <b>Ns</b> | <b><math>\rho_s (\times 10^7)</math><br/>(traços/cm<sup>2</sup>)</b> | <b>U<br/>(ppm)</b> | <b>Erro U<br/>(ppm)</b> | <b>Idade<br/>(Ma)</b> | <b>Erro<br/>Idade</b> |
|----------------|-------------|-----------|----------------------------------------------------------------------|--------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|
| NCC-126        | 76          | 18        | 2,06E+07                                                             | 2323               | 26                      | 3,12                  | 0,37                  |
| NCC-126        | 77          | 32        | 3,34E+07                                                             | 2971               | 33                      | 3,94                  | 0,35                  |
| NCC-126        | 78          | 10        | 1,91E+07                                                             | 2993               | 33                      | 2,24                  | 0,36                  |
| NCC-126        | 79          | 18        | 2,06E+07                                                             | 3457               | 38                      | 2,10                  | 0,25                  |
| NCC-126        | 80          | 19        | 2,18E+07                                                             | 2662               | 29                      | 2,87                  | 0,33                  |
| NCC-126        | 81          | 49        | 5,11E+07                                                             | 2507               | 28                      | 7,15                  | 0,52                  |
| NCC-126        | 82          | 29        | 2,77E+07                                                             | 3270               | 36                      | 2,97                  | 0,28                  |
| NCC-126        | 83          | 16        | 1,83E+07                                                             | 2001               | 22                      | 3,22                  | 0,40                  |