

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS - CAMPUS SOROCABA
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA, TURISMO E HUMANIDADES
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE

LUCAS ALEXANDER NUNES

Insights sobre a evolução termo-tectônica da Ilha Alexander, Península Antártica, via Termocronologia por Traços de Fissão e geocronologia U-Pb em zircão

Sorocaba

2025

Lucas Alexander Nunes

Insights sobre a evolução termo-tectônica da Ilha Alexander, Península Antártica, via
Termocronologia por Traços de Fissão e geocronologia U-Pb em zircão

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Geografia, Turismo e Humanidades da Universidade Federal de São Carlos como requisito para a conclusão do curso de graduação na modalidade de Licenciatura Plena em Geografia.

Orientação: Prof. Dr. Erminio Fernandes
Coorientação: Prof. Dr. Airton Natanael Coelho Dias

Financiamento: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo nº 2023/13974-5

Sorocaba

2025

Nunes, Lucas Alexander

Insights sobre a evolução termo-tectônica da Ilha Alexander, Península Antártica, via Termocronologia por Traços de Fissão e geocronologia U-Pb em zircão / Lucas Alexander Nunes -- 2025.
56f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba
Orientador (a): Erminio Fernandes
Banca Examinadora: Airton Natanael Coelho Dias, Emerson Martins Arruda, Vinícius Queiroz
Bibliografia

1. Geologia. 2. Geocronologia. 3. Termocronologia. I. Nunes, Lucas Alexander. 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

Lucas Alexander Nunes

Insights sobre a evolução termo-tectônica da Ilha Alexander, Península Antártica, via
Termocronologia por Traços de Fissão e geocronologia U-Pb em zircão

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Licenciatura em Geografia para obtenção
do título de Licenciado em Geografia da
Universidade Federal de São Carlos – *campus*
Sorocaba. Sorocaba, 10 de julho de 2025.

Orientador

Prof. Dr. Erminio Fernandes
Universidade Federal de São Carlos – *Campus* Sorocaba

Coorientador

Prof. Dr. Airton Natanael Coelho Dias
Universidade Federal de São Carlos – *Campus* Sorocaba

Examinador

Prof. Dr. Emerson Martins Arruda
Universidade Federal de São Carlos – *Campus* Sorocaba

Examinador

Me. Vinicius Queiroz
Universidade Federal de São Carlos – *Campus* Sorocaba

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Alexandre e Josiane que, muitas vezes mesmo não entendendo quais eram meus sonhos e o que eu estava fazendo, nunca deixaram de me apoiar muito menos de me amar. Se sou quem sou, é por conta de vocês.

Ao amor da minha vida, Marcela. Você me inspirou e me inspira até hoje. Me fez acreditar que eu poderia estar no meio acadêmico. Companheira de estudos e de sonhos para toda a eternidade. Você é o meu maior *bem*.

Aos meus sogros, Andrea e Francisco, por terem acreditado em mim e me apoiado durante todo esse tempo. Sou grato pelos incentivos e conversas.

A minha família; tios, tias, avós e primos. Vocês sempre acreditaram demais em mim. Sou grato pela plena certeza que possuem das minhas capacidades.

Aos amigos e colegas que ajudaram a tornar os fins de semestre mais leves.

Ao professor Airton pela orientação não só da pesquisa, mas também da vida.

Ao professor Erminio, que aceitou me orientar para este trabalho de conclusão de curso.

Aos companheiros de laboratório, por terem tido paciência e vontade de me ajudar a me desenvolver no ambiente acadêmico.

A FAPESP, por ter financiado este projeto de iniciação científica que se tornou meu trabalho de conclusão de curso.

Por fim, preciso agradecer a Deus e também a Nossa Senhora. Mesmo estando afastado, nunca deixei de perceber as bênçãos sobre mim. Sou grato pelo amor e pela vida.

“Nós somos donos deste planeta ou ele de nós?”

Frank Herbert

***Insights* sobre a evolução termo-tectônica da Ilha Alexander, Península Antártica, via Termocronologia por Traços de Fissão e geocronologia U-Pb em zircão**

Lucas Alexander Nunes

RESUMO

A evolução termo-tectônica a oeste da Península Antártica ainda é pouco conhecida. Embora estudos geocronológicos já tenham sido realizados na região, com aplicação de métodos como U-Pb, Lu-Hf e outros, capazes de datar a origem e acomodação de rochas plutônicas, vulcânicas ou de depósitos sedimentares, ainda há uma carência significativa de dados em faixas de temperatura intermediária a baixa, que permitam identificar eventos ocorridos posteriormente à cristalização das rochas, como processos de denudação, soerguimento e exumação. Diante disso, este trabalho aplicou a Termocronologia por Traços de Fissão (TTF) e geocronologia U-Pb em zircão de amostras da Ilha Alexander, Península Antártica, com o objetivo de compreender sua evolução termo-tectônica. Trata-se de uma metodologia adequada para resolver algumas incertezas significativas quanto à idade dos componentes ígneos e sedimentares da ilha. Dessa forma. O zircão é um mineral acessório comum em rochas ígneas, sedimentares e metamórficas. É física e quimicamente resistente, podendo "sobreviver" a longos períodos geológicos e, em muitos casos, fornecer um registro de cada evento geológico ao qual foi submetido. Incorpora em sua estrutura elementos traço, como U, Th e Pb, o que é crucial para as análises geocronológicas, também aplicadas a este trabalho através da datação por U-Pb. Sua capacidade de reter informações sobre a história térmica de uma área fonte é de valor inestimável para elucidar os processos geológicos resultantes de uma variedade de configurações geodinâmicas. Em consequência, a TTF em zircão tem sido amplamente utilizada, associada a outros métodos de datação radiométrica, como os mencionados anteriormente. Dessa forma, obtiveram-se *insights* sobre a evolução da área, contribuindo para a compreensão dos processos tectônicos ocorridos durante o Mesozoico.

Palavras-chave: Zircão; Termocronologia por Traços de Fissão; U-Pb; Península Antártica; Ilha Alexander.

ABSTRACT

The thermo-tectonic evolution of the western Antarctic Peninsula remains poorly understood. Although geochronological studies have already been conducted in the region using methods such as U-Pb, Lu-Hf, and others—capable of dating the origin and emplacement of plutonic, volcanic, or sedimentary rocks—there is still a significant lack of data in intermediate to low-temperature ranges. Such data are essential for identifying geological events that occurred after the crystallization of the rocks, including processes such as denudation, uplift, and exhumation. In this context, this study applied Fission Track Thermochronology (FTT) and U-Pb geochronology in zircon from samples collected on Alexander Island, Antarctic Peninsula, aiming to better understand its thermo-tectonic evolution. This methodology is well-suited to addressing significant uncertainties regarding the age of igneous and sedimentary components of the island. Zircon is a common accessory mineral in igneous, sedimentary, and metamorphic rocks. It is physically and chemically resistant, capable of "surviving" long geological periods and, in many cases, preserving a record of each geological event it has undergone. It incorporates trace elements such as U, Th, and Pb into its crystal structure, which is crucial for geochronological analyses, including the U-Pb method also applied in this study. Its ability to retain thermal history information from the source area is invaluable for elucidating geological processes related to a variety of geodynamic settings. Consequently, FTT in zircon has been widely used in association with other radiometric dating methods, such as those mentioned above. As a result, new insights were obtained on the region's geological evolution, contributing to the understanding of tectonic processes that occurred during the Mesozoic.

Keywords: Zircon; Fission Track Thermochronology; U-Pb; Antarctic Peninsula; Alexander Island.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - A) Gondwana no Paleozoico-Mesozoico. B) Destacados em roxo, os blocos que hoje formam a Antártica Ocidental, onde a sigla PA denomina a Península Antártica. C) A localização da Península vista de cima do globo e a configuração atual da Antártica.....	14
Figura 2 - Mapa geológico da Península Antártica mostrando a distribuição das principais unidades geológicas.....	15
Figura 3 - Mapa geológico da Península Antártica mostrando a distribuição das principais unidades geológicas. Os pontos (1), (2), (3) e (4) na Ilha Alexander indicam o local exato da coleta de material durante o trabalho de campo.	23
Figura 4 - Destacada na imagem, a Ilha Alexander – Península Antártica.	25
Figura 5 - A) Vale Ablation marcado por gelo glacial. B) Vale Ablation e Lago Ablation vistos do ar. C) Vale Ablation com moreias glaciais.....	26
Figura 6 - Formação do traço latente.....	28
Figura 7 - Grão de zircão e seus traços de fissão visualizados através de microscopia óptica.	29
Figura 8 - Temperatura de fechamento de diferentes minerais sob métodos geotermocronológicos diferenciados.....	30
Figura 9 - Coleta e montagem dos grãos de zircão. A) Lupa eletrônica LEICA sendo utilizada para a coleta dos grãos. B) Grãos de zircão vistos e montados sob a lupa. C) Grãos montados e postos sob uma barra de metal. D) Equipamento para incrustação dos grãos.....	35
Figura 10 - Lixamento e polimento das amostras de zircão. A) Lixamento manual da amostra incrustada no teflon e na resina epóxi. B) Politriz utilizada nos polimentos das amostras. C) Pastas de diamante.....	36
Figura 11 - Preparação e ataque químico das amostras de zircão. A) Preparação do ataque químico com 12 gramas de hidróxido de sódio e de potássio. B) Forno utilizado para as altas temperaturas para o ataque químico. C) Retirada das amostras em teflon do forno.	37
Figura 12 Equipamento utilizado para a análise das densidades dos traços de fissão grão a grão.	38
Figura 13 - Kernel Density Estimation (KDE) das idades obtidas via TTF em zircão para cada amostra selecionada da Ilha Alexander. No inset o RadialPlotter das mesmas amostras.	42

Figura 14 - Kernel Density Estimation (KDE) das idades U-Pb em zircão para cada amostra selecionada da Ilha Alexander.....44

Figura 15 - Eventos registrados por U-Pb e TTF em zircão neste trabalho junto às fases de subducção da PA.47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Amostras coletadas no trabalho de campo	22
Tabela 2 – Informações sobre o ICP-MS, Laser e condições de operação.	32
Tabela 3 - Dados analíticos das análises TTF em zircão nas amostras SNSM.	41

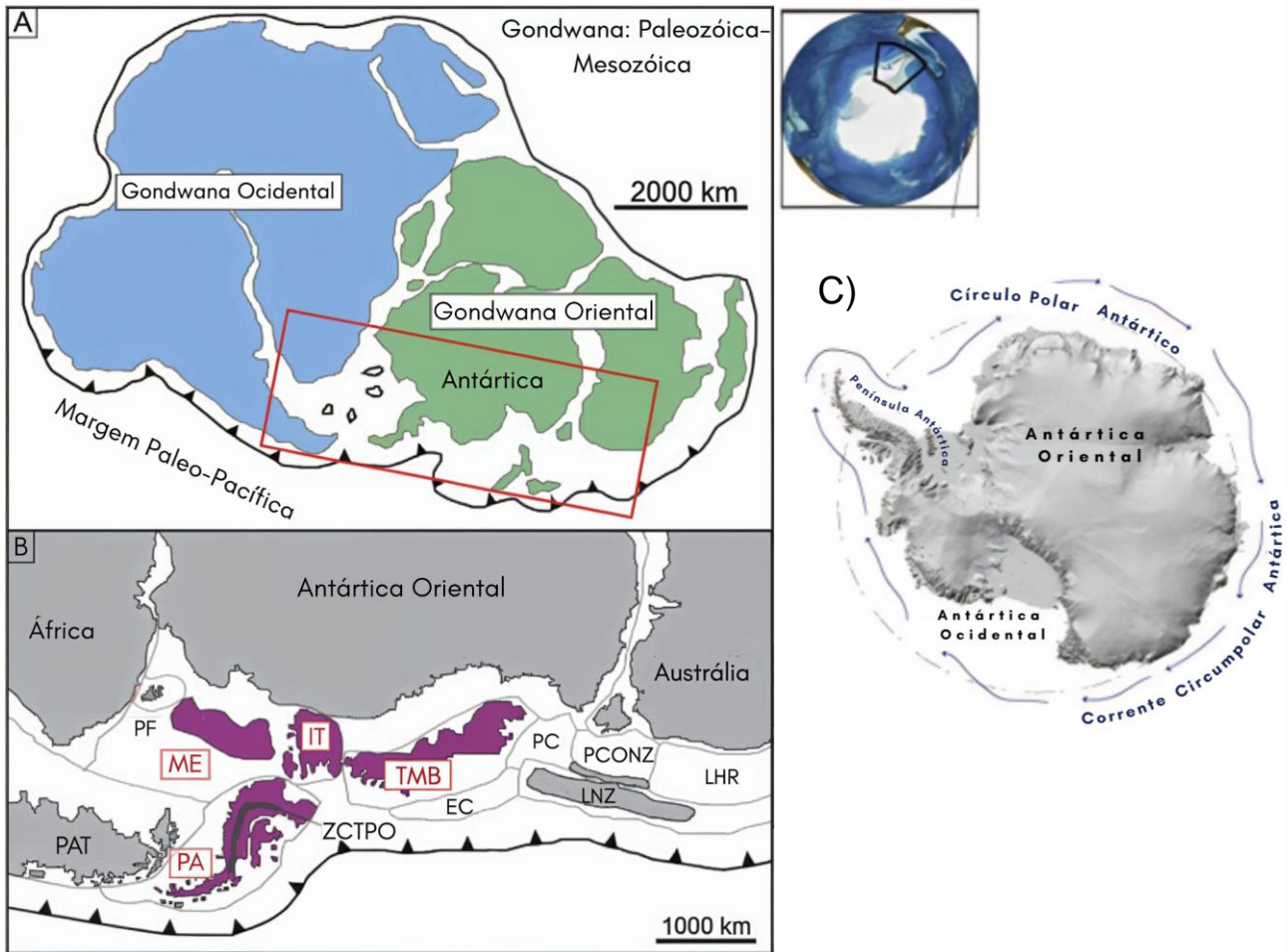
SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	17
2.1 Objetivos específicos:	17
3. FUNDAMETAÇÃO TEÓRICA.....	18
3.1 Conceitos físicos associados ao projeto.....	18
<i>3.1.1 Estrutura do átomo.....</i>	<i>18</i>
<i>3.1.2 Isótopo ^{238}U e ^{235}U.....</i>	<i>18</i>
<i>3.1.3 Radioatividade e decaimento.....</i>	<i>19</i>
<i>3.1.4 Fissão espontânea.....</i>	<i>19</i>
4. MATERIAIS E MÉTODOS	20
4.1 Área de estudo.....	20
<i>4.1.1 Geologia da área de estudo.....</i>	<i>21</i>
<i>4.1.2 Contexto geomorfológico da Península Antártica e da Ilha Alexander.....</i>	<i>24</i>
4.2 Termocronologia por traços de fissão.....	27
4.3 Análises U-Pb em zircão via LA-ICP-MS	31
4.4 Características do zircão e sua utilização dentro da geo/termocronologia	32
4.5 Montagem, polimento e ataque químico do zircão.....	34
<i>4.5.1 Montagem.....</i>	<i>34</i>
<i>4.5.2 Lixamento e polimento dos grãos.....</i>	<i>35</i>
<i>4.5.3 Ataque químico.....</i>	<i>36</i>
<i>4.5.4 Obtenção das imagens dos traços no grão.....</i>	<i>37</i>
4.6 Obtenção das idades.....	38
<i>4.6.1 Plotagem dos dados e obtenção da História Térmica.....</i>	<i>40</i>
<i>4.6.2 Obtenção do conteúdo de urânio (U).....</i>	<i>40</i>
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
5.1 TTF em zircão.....	41
5.2 U-Pb em zircão via LA-ICP-MS	44
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	48
REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

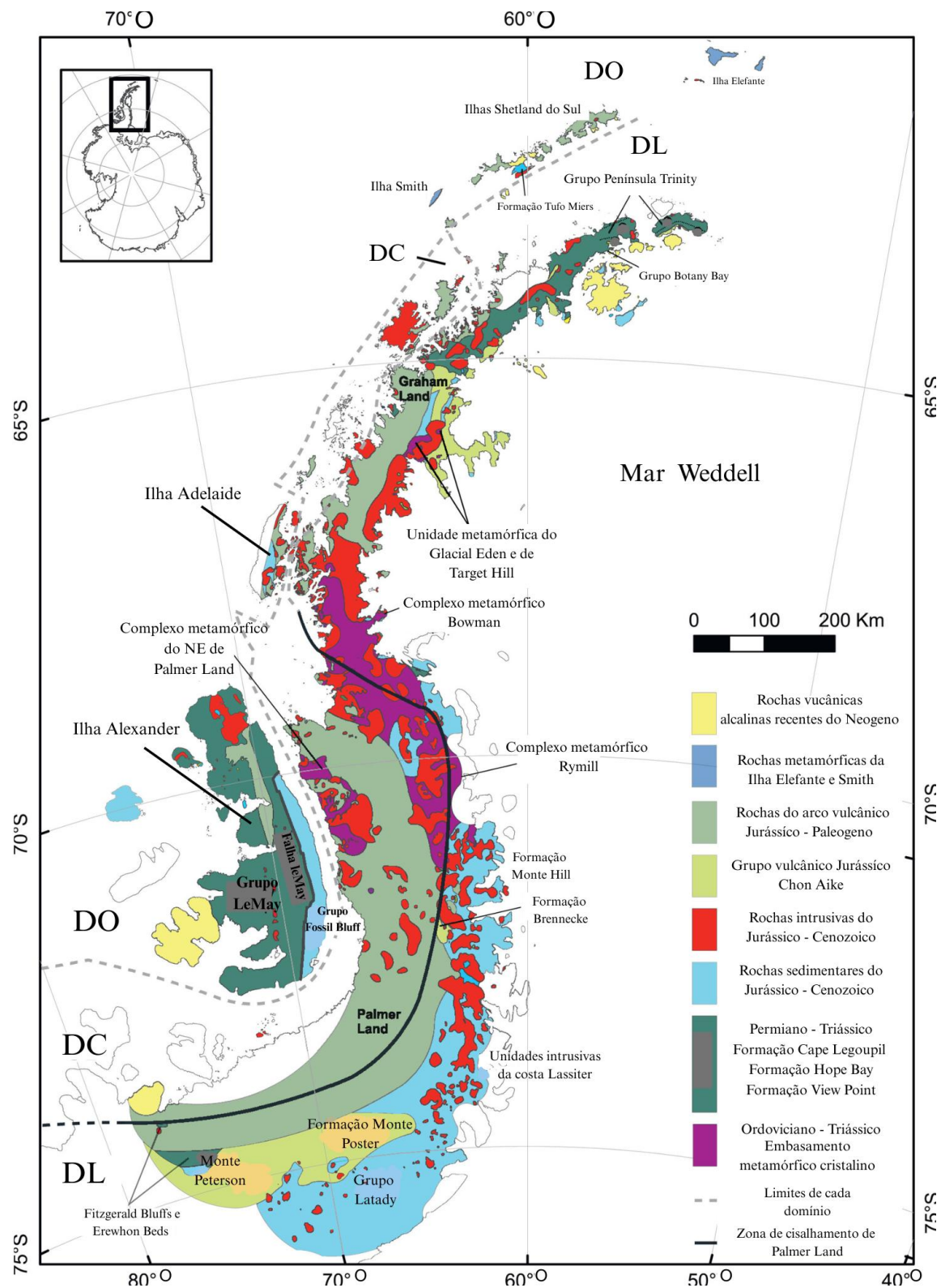
Estudos pioneiros da década de 80 e 90, como Storey et al. (1998) e Dalziel & Elliot (1982) afirmam que Antártica Ocidental é composta por um amálgama de vários blocos continentais, incluindo o bloco da Península Antártica, originalmente dispersos ao longo da margem sul do Gondwana, e possuem afinidades com a América do Sul, Zelândia e África Austral, como demonstra a figura 1. Neste trabalho, o foco está centrado na Península Antártica. Na figura 2 pode-se ver o mapa geológico da área com a distribuição das principais unidades geológicas. Notam-se as sucessões sedimentares e vulcânicas mesozoicas que estão amplamente expostas ao longo das áreas costeiras da Península Antártica. Segundo Siegert (2008), a península tem uma característica topográfica significativa, elevando-se de uma elevação média de 900 m ao norte para uma elevação média de 1800 m, cerca de 800 km ao sul. Esta região elevada da Península Antártica tem um grande impacto no clima regional e atua como uma barreira orográfica que provavelmente levou à nucleação da camada de gelo regional. No entanto, Twinn et al. (2022) afirmam que o tempo e o mecanismo de soergimento ao longo da Península permanecem mal resolvidos, especialmente para sua parte Sul.

Figura 1 - A) Gondwana no Paleozóico-Mesozóico. B) Destacados em roxo, os blocos que hoje formam a Antártica Ocidental, onde a sigla PA denomina a Península Antártica. C) A localização da Península vista de cima do globo e a configuração atual da Antártica.



Fonte: Adaptado de Bastias et al (2020); Exon et al (2000).

Figura 2 - Mapa geológico da Península Antártica mostrando a distribuição das principais unidades geológicas.



Fonte: Adaptado de Riley et al (2023).

Uma série de trabalhos tem sido desenvolvida na área, mas destacam-se os de Bastias et al. (2019, 2020, 2021a, 2021b) e Spikings et al. (2016) que puderam melhorar a compreensão de como a Península Antártica, posicionada ao sul do Gondwana pode ser mapeada a partir do *breakup* da Pangeia no início do Triássico denotado pela datação via U-Pb em zircão. Nestes importantes trabalhos, sugere-se que a Península Antártica fazia parte da margem ativa andina do Jurássico Superior - Cretáceo Inferior iniciada durante o Triássico. No entanto, o cenário tectônico Triássico da Península Antártica ainda não havia sido explorado em mais detalhes. Segundo Bastias et al. (2019) eles exibem evidências geológicas de mudanças tectônicas e globais do nível do mar, notavelmente registradas no flanco ocidental da Península Antártica do norte pelo surgimento de bacias marginais submarinas como parte de um arco vulcânico de ilha continental (veja ainda, por exemplo, Riley et al., 2012). Ainda, períodos de cessação, retomada e aumento da atividade do arco são registrados nas rochas ígneas do Cretáceo da Península Antártica e unidades associadas.

Entretanto, geocronologia associada à termocronologia (análises integradas) ainda são muito incipientes e precisavam serem realizadas, especialmente na área de interesse – Ilha Alexander, na Península Antártica. Evidentemente, existem estudos envolvendo análise por termocronologia ao longo do norte da Península (veja Anderson et al., 2011; Wellner et al., 2011; Clinger et al., 2020). Os registros sedimentares marinhos que indicam evidências de glaciação alpina¹ ao longo da Península Antártica já em 37-34 Ma, sugerindo que uma topografia significativa deve ter existido antes disso. Mas estes estão entre os poucos trabalhos que fazem uma análise termocronológica da área. Por isso, a Termocronologia por Traços de Fissão (TTF) em zircão pode cooperar na correlação potencial dessas unidades na Península Antártica. O que é crucial para entender a configuração dos processos tectônicos que ocorrem na margem e revelar *insights* de sua evolução durante o Mesozoico.

Diante do exposto, neste projeto, foi aplicado a TTF em zircão, que é uma ferramenta comumente usada no entendimento de diversos eventos geológicos e geomorfológicos, como estudos de proveniência, processos de exumação e taxas erosivas (e.g., Carter & Gallagher, 2004; Donelick et al., 2005). Essa técnica é baseada no acúmulo de traços — defeitos lineares na estrutura cristalina do mineral — gerados pela passagem de fragmentos devido à fissão²

¹A glaciação alpina ocorre quando o gelo se acumula em vales nas regiões montanhosas. Esse gelo desce lentamente pelas encostas das montanhas em direção às planícies. Ao se mover, ele esculpe o relevo, aprofundando os vales e tornando as cristas mais afiadas. Por isso, as áreas próximas às geleiras alpinas apresentam um terreno mais irregular e acidentado (Earle, 2015).

² Processo nuclear no qual um núcleo pesado se divide em dois núcleos menores (Tipler e Llewellyn, 2017).

espontânea do U-238. Trata-se da técnica mais utilizada na reconstrução da história térmica de rochas em tempos geológicos.

Especificamente, a TTF é aplicada ao zircão por se tratar de um mineral acessório comum em rochas ígneas, sedimentares e metamórficas, que é física e quimicamente resistente, podendo "sobreviver" durante muitos períodos geológicos. Diante disso, ele pode, em muitos casos, fornecer um registro de cada evento geológico ao qual foi submetido nesses períodos, elucidando os processos geológicos decorrentes de uma variedade de configurações geodinâmicas. Portanto, a TTF aplicada ao zircão permite compreender a evolução termo-tectônica a partir de uma análise de proveniência e da história térmica das rochas da área.

Vale constatar que as amostras analisadas fazem parte de um amplo projeto de pesquisa do Dr. Joaquin Bastias-Silva e do Prof. Dr. Richard Spikings, do Trinity College Dublin, na Irlanda, e da Universidade de Zurich, na Suíça – "*Constraining the age of the Cenozoic glaciation of Antarctica by high-precision geochronology, provenance and thermal modelling*".

2. OBJETIVOS

O objetivo deste estudo foi aplicar a Termocronologia por Traços de Fissão (TTF) e geocronologia U-Pb em zircões coletados na Ilha Alexander, localizada a oeste da Península Antártica. O que pôde fornecer alguns *insights* críticos sobre eventos ocorridos em temperaturas intermediárias e altas na região em questão.

2.1 Objetivos específicos

- Contribuir para uma melhor compreensão do vulcanismo e das sequências sedimentares nesta região;
- Reduzir incertezas cronológicas dos componentes ígneos e sedimentares presentes na Ilha Alexander.
- Cooperar na correlação potencial da Ilha Alexander com outras unidades na Península Antártica.

3. FUNDAMETAÇÃO TEÓRICA

3.1 Conceitos físicos associados ao projeto

No presente trabalho são apresentados alguns conceitos físicos, como a fissão de átomos de Urânio e também o de decaimento radioativo. Estes conceitos estão intimamente conectados com o método de datação por TTF, além da datação por U-Pb. Dessa forma, entenderemos primeiramente a estrutura do átomo.

3.1.1 Estrutura do átomo

O átomo é constituído por um núcleo e por partículas que orbitam ao seu redor, chamadas elétrons. O núcleo é formado por prótons, partículas com carga elétrica positiva, e por nêutrons, que possuem massa semelhante à dos prótons, mas não têm carga elétrica. O número de prótons no núcleo de um átomo determina seu número atômico, que identifica o elemento químico (Alves, 2010).

Átomos de um mesmo elemento químico podem apresentar diferentes massas atômicas, devido à variação no número de nêutrons — já que esses não afetam a carga elétrica. Esses átomos são chamados de isótopos. Nesta monografia, será abordado principalmente o isótopo ^{238}U , elemento crucial para a aplicação da termocronologia por traços de fissão e também o isótopo ^{235}U , essencial para o método U-Pb.

3.1.2 Isótopos ^{238}U e ^{235}U

O elemento químico urânio foi identificado pela primeira vez em 1789 por Klaproth, durante análises do mineral pechblenda. No entanto, apenas em 1896, com a descoberta da radioatividade por Henri Becquerel, tornou-se possível compreender que o urânio é progenitor de cadeias de decaimento que envolvem outros elementos igualmente radioativos (Mancini e Bonotto, 2021). Com os avanços da física nuclear ao longo do início do século XX, estabeleceu-se que o urânio natural é composto majoritariamente por dois isótopos: o ^{238}U , responsável por aproximadamente 99,28% de sua composição, e o ^{235}U , que representa cerca de 0,72% (Mancini e Bonotto, 2021). Ambos os isótopos são instáveis e atuam como núcleos progenitores em distintas séries de decaimento radioativo. Inclusive, na termocronologia por traços de fissão, a opção por focar nos traços gerados pela fissão espontânea do isótopo ^{238}U deve-se ao fato de que ele é consideravelmente mais abundante que outros isótopos do urânio, como mencionado

anteriormente (Malusá e Fitzgerald, 2019). O que resulta em uma produção mais significativa de traços naturais.

3.1.3 Radioatividade e decaimento

A radioatividade consiste em um processo natural pelo qual núcleos atômicos instáveis, geralmente pertencentes a elementos de alto número atômico (maiores do que 90), emitem espontaneamente partículas subatômicas e/ou radiação eletromagnética com o objetivo de alcançar maior estabilidade nuclear (Tipler e Llewellyn, 2017). Esse processo resulta em uma modificação na estrutura do núcleo original, conhecida como decaimento, que corresponde à transformação de um nuclídeo em outro.

Como mencionado anteriormente, durante o decaimento radioativo, um isótopo instável, também denominado isótopo pai, transforma-se em outro isótopo, chamado de isótopo filho ou radiogênico. Esse isótopo filho pode ser estável, não passando por novos decaimentos, ou ainda instável, continuando a decair até atingir a estabilidade. No caso do ^{238}U , o produto final estável desse processo é o isótopo ^{206}Pb .

O interesse pelos isótopos de urânio e por seu produto estável, o chumbo, deve-se à ampla aplicação desse processo de decaimento radioativo na datação de amostras geológicas por meio da técnica conhecida como U-Pb.

Além do uso da datação por traços de fissão espontâneos (que será melhor explicada nas seções 3.1.4 e 4.2), o uso do U-Pb se faz presente neste trabalho e se baseia na razão entre os isótopos-pai (^{238}U e ^{235}U) e seus respectivos produtos estáveis (^{206}Pb e ^{207}Pb), refletindo o tempo decorrido desde a formação do mineral. A datação torna-se possível porque, após a formação do mineral, o sistema isotópico permanece fechado, sem ganho ou perda de urânio ou chumbo. Para determinar com precisão essas razões isotópicas, são utilizadas técnicas como a LA-ICP-MS, que será detalhada na seção 4.3. Como os isótopos envolvidos possuem meias-vidas extremamente longas (4,5 bilhões de anos para o ^{238}U e 0,704 milhões de anos para o ^{235}U), o monitoramento direto de seus decaimentos é inviável. Por isso, a quantificação das razões isotópicas representa uma alternativa eficaz para estimar a idade do mineral.

3.1.4 Fissão espontânea

A fissão espontânea é um mecanismo de decaimento radioativo que pode ocorrer em núcleos atômicos muito pesados, especialmente aqueles com número atômico superior a 90, como o urânio (que possui 92) e o tório. Diferentemente da fissão induzida, esse processo não

requer a absorção de um nêutron para ocorrer; o núcleo pode se dividir espontaneamente em dois fragmentos menores, liberando energia no processo (Tipler e Llewellyn, 2017).

Os fragmentos gerados pela fissão espontânea danificam a estrutura cristalina do mineral, formando traços que se tornam visíveis após um ataque químico apropriado e visualizados sob um microscópio óptico (Malusà e Fitzgerald, 2019). Esses procedimentos serão detalhados na seção 4.5.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

A Península Antártica localizada ao sul da América do Sul é a porção mais setentrional do continente da Antártica. De acordo com Eagles (2004), a Península Antártica associado aos Andes, é um excelente exemplo de colisão oceano-contidente resultando em subducção. Estudos de Barker & Austin (1988) e McCarron & Larter (1998) indicam que a região experimentou subducção contínua por mais de 200 milhões de anos, mas mudanças nas configurações continentais durante a fusão e separação dos continentes mudaram a orientação da própria península.

Em termos de evolução tectônica e geológica, Dziak et. al. (2010) afirmam que a mesma ocorreu em três etapas: estágio de pré-subducção da deposição da bacia marginal, posteriormente separada pela orogenia Gondwanides³ durante o Permiano-Triássico Superior; a fase de subducção média, caracterizada pela formação dos arcos magmáticos da Península Antártica (interior) e das Ilhas Shetland do Sul (exterior), durante o Jurássico-Mioceno médio; e, a fase de subducção tardia, quando ocorre a abertura do Bransfield Rift. Tudo isso, seguido por atividades vulcânicas terrestres e submarinas desde o Oligoceno.

Ainda, dados geocronológicos de Riley et al. (2017a) indicam que a península protoantártica foi flanqueada pela Patagônia, Antártica Oriental e o restante dos terrenos da Antártica Ocidental durante o final do Paleozóico e Mesozoico. No entanto, a extensa cobertura de gelo e o afastamento geográfico levaram a uma escassez de dados quantitativos dos blocos da Antártica Ocidental que poderiam restringir suas histórias dentro de Gondwana, sua subsequente desmontagem e reagrupamento para formar a Antártica Ocidental. Mais ao sul,

³ Processo tectônico convergente na margem sul do antigo Supercontinente Gondwana (UFRJ, 2016).

dados recentes de Twinn et. al. (2022) mostram que o pico do magmatismo ocorreu entre 120 e 90 Ma.

4.1.1 Geologia da área de estudo

Especificamente, dentro da Península Antártica, o projeto focou na região da Ilha Alexander. De acordo com Leat e Riley (2021), a Ilha Alexander contém um registro de vulcanismo na margem continental que se estende desde o Jurássico até os tempos recentes. A subducção da litosfera oceânica do Pacífico abaixo da margem continental desenvolveu-se após o vulcanismo do Jurássico Superior na Ilha Alexander, que estava relacionado à extensão da margem continental. Os basaltos mesozoicos do fundo do oceano colocados no complexo de acréscimo na ilha têm composições derivadas do manto do Pacífico. O arco vulcânico da Península Antártica esteve ativo desde o início do Cretáceo até o início do Mioceno. A região foi afetada por alteração hidrotermal e por metamorfismo regional, sendo que grupos geoquímicos distintos reconhecidos nas rochas vulcânicas sugerem processos variados de geração de magma relacionados a mudanças na dinâmica de subducção.

Há ainda um entendimento por parte de alguns pesquisadores que a Ilha Alexander poderia apresentar dados geocronológicos bem caracterizados na Ilha Adelaide ao norte. Segundo Griffiths e Oglethorpe (1998), o arco vulcânico Mesozoico-Cenozoico da Península Antártica é representado na Ilha Adelaide por uma sucessão sedimentar e vulcânica invadida por plútons. Nela estão bem marcados a: i) sedimentação durante o Mesozoico; ii) plutonismo no Cretáceo Inferior (~141 Ma); iii) vulcanismo no Cretáceo e Terciário Inferior; iv) sedimentação do Cretáceo Superior (possivelmente Terciário); e, v) vulcanismo intermediário no Eoceno e deposição de conglomerados derivados de arco. De acordo com os autores, este vulcanismo foi possivelmente contemporâneo do vulcanismo no norte da Ilha Alexander e nas Ilhas Shetland do Sul.

Com estas considerações claras, há questões levantadas por Bastias et al. (2019) que são a base deste projeto. Os autores afirmam que as sucessões sedimentares e vulcânicas mesozóicas, como a da Ilha Alexander, que estão expostas ao longo das áreas costeiras da Península Antártica, exibem evidências geológicas de mudanças tectônicas registradas pelo surgimento de bacias marginais submarinas. É sabido que unidades litoestratigráficas relevantes estão expostas e a potencial correlação destas unidades na Península Antártica é crucial para compreender a configuração dos processos tectônicos que ocorrem na margem. No entanto, o artigo afirma que existem incertezas significativas na idade dos seus componentes ígneos e sedimentares e, portanto, a aplicação do TTF em zircão poderá resolver estas incertezas

cronológicas e por fim, revelar *insights* da evolução da área e cooperar na compreensão dos processos tectônicos ocorridos durante o Mesozoico. Abaixo, a tabela 1 apresenta as amostras selecionadas para este projeto.

Tabela 1 - Amostras coletadas no trabalho de campo

Amostras Coletadas	Tipo de rocha	Altitude (m)	Coordenadas	
			S	O
(1) 19JB35	Rochas vulcano-sedimentares	1176	70°36'36''	69°17'24''
(2) 19JB33	Rochas vulcano-sedimentares	919	70°44'24''	69°34'48''
(3) 19JB26	Rochas vulcano-sedimentares	899	71°19'48''	68°48'00''
(4) 19JB30	Rochas vulcano-sedimentares	1002	71°19'12''	70°14'12''

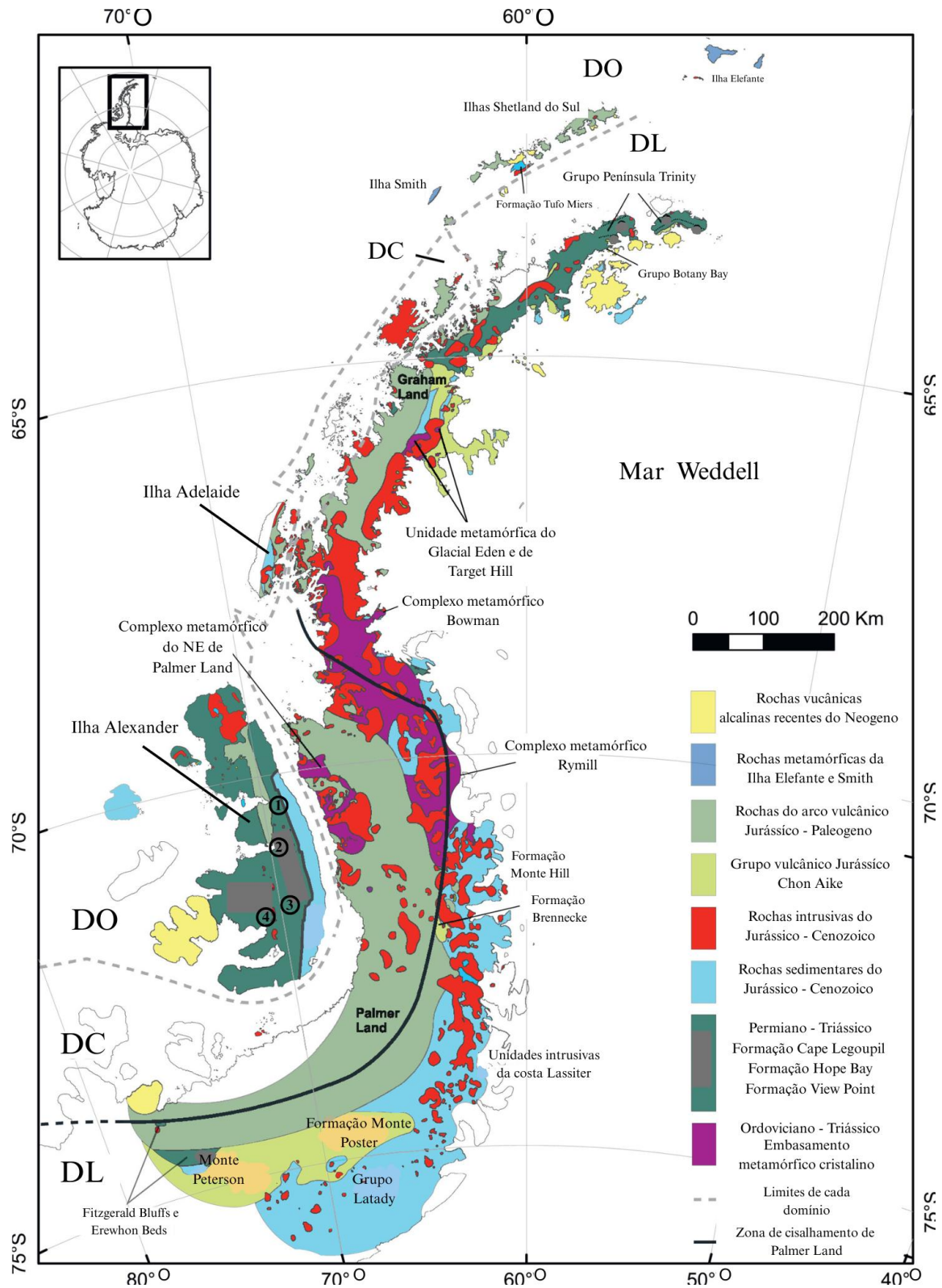
Fonte: Elaborado pelo autor.

Como indicam a tabela 1 e a figura 3 todos os grãos de zircão utilizados neste trabalho são provenientes de rochas vulcano-sedimentares pertencentes ao Grupo LeMay. Ainda, a litologia do grupo é composta por arenitos, conglomerados e rochas vulcânicas máficas.

De forma mais específica, Riley et al (2023) irá indicar que o grupo LeMay é constituído por um espesso conjunto de rochas sedimentares e ígneas, com cerca de 4 km de espessura, interpretado como parte de um complexo acrescionário desenvolvido ao longo da margem convergente do Paleo-Pacífico, demonstrando que litologia do grupo é variada e reflete a complexa história tectônica da região. Onde nela predominam sequências turbidíticas compostas por arenitos que ocorrem em camadas espessas e intercaladas, muitas vezes apresentando estruturas sedimentares preservadas, embora comumente deformadas por foliações, dobras e pelas zonas de cisalhamento como a de Palmer Land.

Ainda, estão presentes na litologia do grupo conglomerados polimíticos, com clastos de quartzo, chert, rochas vulcânicas e plutônicas (Riley et al., 2023). Onde, associadas a essas unidades sedimentares ocorrem rochas vulcânicas máficas, como basaltos, cuja geoquímica indica afinidade tanto com basaltos de dorsais oceânicas quanto com basaltos de ilhas oceânicas, sugerindo que parte dessas rochas representa fragmentos oceânicos alóctones incorporados ao complexo acrescionário (Doubleday et al., 1994; Riley et al., 2023).

Figura 3 - Mapa geológico da Península Antártica mostrando a distribuição das principais unidades geológicas. Os pontos (1), (2), (3) e (4) na Ilha Alexander indicam o local exato da coleta de material durante o trabalho de campo.



Fonte: Adaptado de Riley et al (2023).

4.1.2 Contexto geomorfológico da Península Antártica e da Ilha Alexander

A geomorfologia da Península Antártica resulta de uma complexa interação entre processos tectônicos, evolução crustal e glaciações de longa duração. Estruturalmente, a região é subdividida em três grandes domínios geológicos; Ocidental, Central e Oriental, definidos com base em características litológicas, estruturais e isotópicas distintas (Bastias et al., 2020). O Domínio Ocidental (onde se localiza a Ilha Alexander) é interpretado como um antigo complexo acrecionário formado por subducção e colisão de fragmentos crustais, enquanto os domínios Central e Oriental consistem principalmente em segmentos de arco magmático desenvolvidos durante o Mesozoico e Cenozoico. Essas unidades foram articuladas ao longo de zonas de cisalhamento profundas, como a Zona de Cisalhamento de Palmer Land, ativa desde o Triássico, que desempenhou papel essencial na reorganização crustal e compartimentação estrutural da península (Bastias et al., 2020; 2021b).

Além da base estrutural, a morfologia superficial da península foi amplamente modificada por processos glaciares. Dados termocronológicos obtidos por Clinger et al. (2020) indicam que a atual paisagem da Península Antártica, que é marcada por fiordes sobreescavados, vales em U, vertentes íngremes e platôs elevados de baixo relevo, começou a se desenvolver entre 30 e 12 milhões de anos atrás, bem antes do resfriamento climático do Plio-Pleistoceno (~2,6 Ma). Ao contrário do que se observa em regiões montanhosas de latitudes médias, onde a glaciação pleistocênica foi o principal agente erosivo, na Península Antártica os processos erosivos glaciares teriam sido menos intensos durante este período, devido à prevalência de geleiras de base fria⁴ nas áreas mais elevadas (Clinger, 2020). Essas condições teriam limitado a incisão glacial, permitindo a preservação de morfologias mais antigas, inclusive porções da topografia pré-glacial.

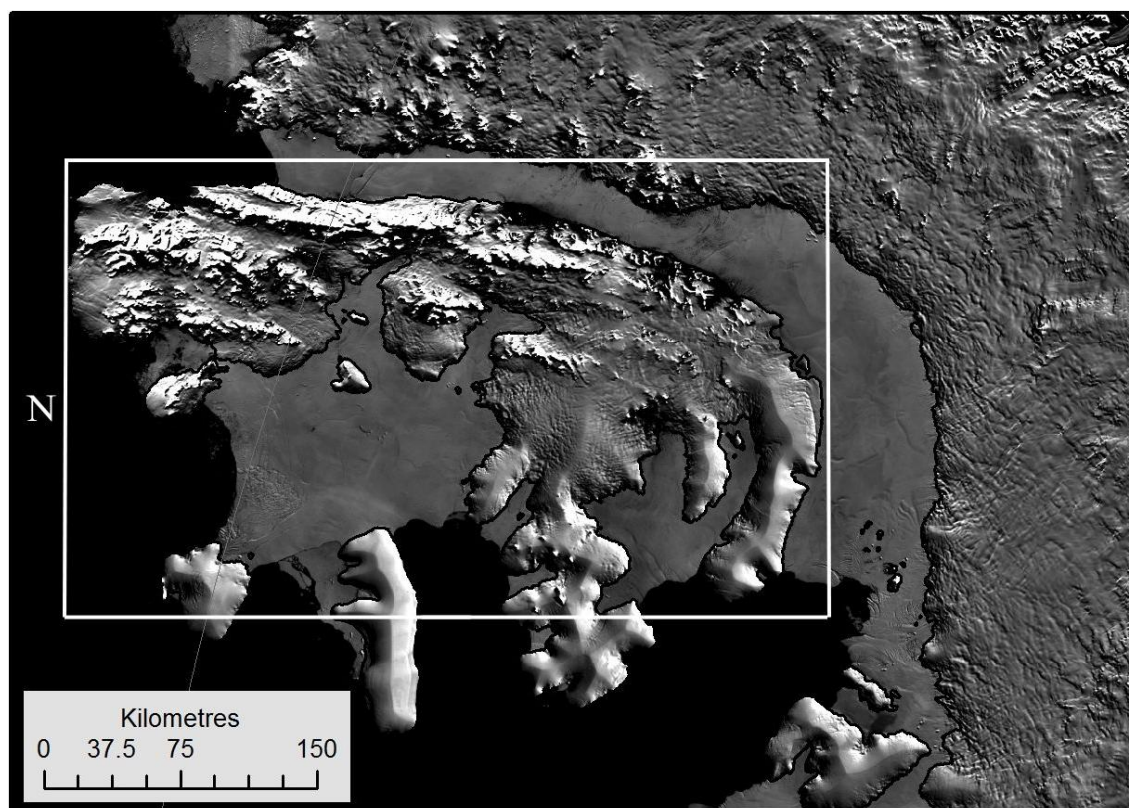
Ainda, o centro da Península é dominado por um extenso platô de elevada altitude e baixa declividade, interpretado como uma superfície pouco modificada pela glaciação. Em contraste, as partes oeste e leste da península são intensamente dissecados, com indícios de erosão localizada potencialmente intensificada por processos periglaciais modernos ou pelo aumento do fluxo de água de derretimento subglacial (Clinger et al., 2020).

Até o momento da realização deste trabalho, há uma escassez de publicações que tratem especificamente das características geomorfológicas, topográficas e geográficas, de forma mais abrangente, da Ilha Alexander. No entanto, para esta seção, é possível basear-se no estudo de Davies et al. (2017). Com isso, podemos afirmar que a área de estudo possui uma extensão

⁴ Se referem à geleiras congeladas no leito rochoso, fazendo com que não haja movimentação por deslizamento basal (Menzies e Van der Meer, 2017).

longitudinal de aproximadamente 430 km e área total de 48.300 km², onde a ilha apresenta marcantes contrastes altimétricos (figura 4). No setor norte, são notáveis os picos montanhosos, que emergem do manto de gelo sob a forma de nunataks⁵, atingindo altitudes de até 2.500 metros, ao passo que as porções meridionais da ilha alcançam altitudes superiores a 500 metros acima do nível do mar. Ademais, um alinhamento topográfico elevado, com orientação norte-sul, percorre o eixo central da ilha e constitui o atual divisor de gelo. Na costa leste, onde as condições climáticas são mais secas, ocorrem diversos afloramentos rochosos e áreas livres de gelo ao nível do mar, incluindo o Maciço de Ablation Point, Fossil Bluff e Two Steps Cliffs, destacando-se como importantes zonas de exposição geológica e paleoclimática (figura 5) (Davies et al., 2017).

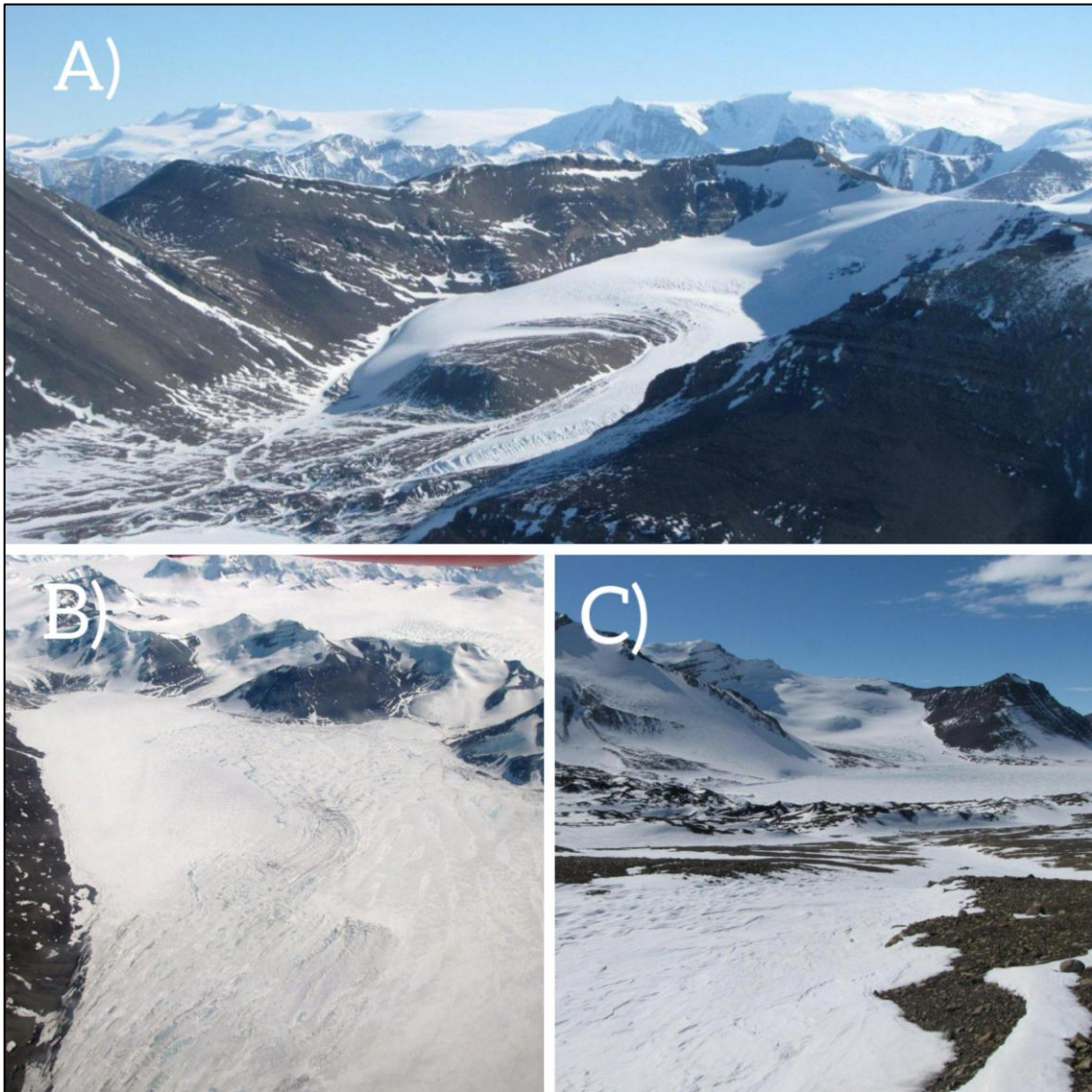
Figura 4 - Destacada na imagem, a Ilha Alexander – Península Antártica.



Fonte: Adaptado de Davies (2020).

⁵ Nunataks são picos de montanhas localizadas em campos glaciais, que não estão cobertos de neve ou gelo (Elias e Mock, 2013).

Figura 5 - A) Vale Ablation marcado por gelo glacial. B) Vale Ablation e Lago Ablation vistos do ar. C) Vale Ablation com moreias glaciais.



Fonte: Adaptado de Davies (2020).

Diante do exposto, a geomorfologia da Ilha Alexander reflete uma complexa interação entre a herança estrutural resultante de antigos processos tectônicos e as modificações impostas por períodos de glaciação. Inserida no Domínio Ocidental da Península Antártica, a ilha apresenta um relevo marcado por fortes contrastes, com picos montanhosos que se elevam como nunataks no setor norte e planaltos mais suaves ao sul. Ainda, a existência de áreas livres de gelo na costa leste, como o Maciço de Ablation Point e Fossil Bluff, possibilita a realização de estudos geológicos e termocronológicos como o apresentado neste trabalho.

4.2 Termocronologia por traços de fissão

A Termocronologia por Traços de Fissão, TTF, como dito anteriormente, é uma ferramenta comumente usada no entendimento de diversos eventos geológicos e geomorfológicos como estudos de proveniência, processos de exumação e taxas erosivas (e.g., Carter & Gallagher, 2004; Donelick et al., 2005). A Termocronologia por Traços de Fissão (TTF) é baseada no acúmulo de traços formados pela passagem de fragmentos energéticos, resultantes da fissão espontânea do isótopo urânio-238 (^{238}U). Cada traço corresponde à um momento único na história térmica da amostra, através da fissão de um único núcleo atômico, evento natural que libera partículas energéticas capazes de danificar a estrutura cristalina do mineral.

Através da figura 6, é possível observar o modelo “*Ion Explosive Spike*”, proposto primeiramente por Fleischer et al., (1965h), onde podemos visualizar de forma gráfica o rearranjo dos elementos iônicos através da estrutura cristalina do mineral em decorrência da fissão espontânea, onde: (A) ocorre a ionização dos átomos da rede cristalina devido à fissão nuclear e, (B) por repulsão Coulombiana⁶, ocorre um afastamento desses átomos. Em seguida, (C) há um relaxamento da rede cristalina que resulta na formação do traço latente com aproximadamente 11 μm no zircão. O diâmetro é da ordem de alguns angstroms. Em relação ao zircão, Wagner e Van der Haute (1992) afirmam que: i) Os átomos fissionados são distribuídos homogeneamente no volume do detector; ii) Todos os traços possuem comprimento l igual e o início da fissão é o centro de cada traço; iii) Os traços são isotropicamente distribuídos, sem nenhuma orientação preferencial, cuja probabilidade de formação no detector é a mesma em todas as direções (Dias, 2012).

Além disso, é importante destacar que o modelo “*Ion Explosive Spike*” não é o único utilizado para explicar o rearranjo da estrutura cristalina do mineral causado pela fissão espontânea. Outros modelos, como o “*Thermal Spike*” e o “*Compound Spike*”, também são reconhecidos e podem ser utilizados pela comunidade termocronológica para interpretar a formação do traço latente. A escolha do modelo “*Ion Explosive Spike*” neste trabalho deve-se ao fato de ser o mais frequentemente adotado na literatura, embora os demais modelos também sejam considerados válidos e aceitos como explicações alternativas para o mesmo fenômeno.

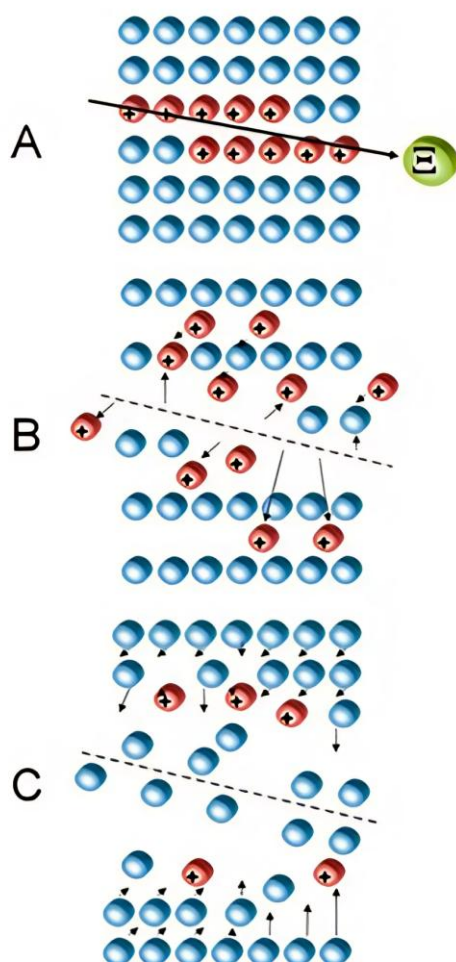
Os danos causados pelos fragmentos de fissão na estrutura do mineral são visíveis apenas em nanoescala. Quando expostos a um reagente, geralmente uma base ou ácido, num

⁶ Forças eletrostáticas são forças atrativas ou repulsivas entre partículas carregadas. Elas são geralmente denominadas forças Coulombianas (UFRGS, 2001).

processo denominado “ataque químico”, existe uma tendência de que o reagente atue primeiramente na corrosão do defeito, ou seja, do traço, tornando-o visível em microscopia óptica (Malusá & Fitzgerald, 2019). Para o zircão, o “ataque químico” é feito com uma mistura de NaOH:KOH (1:1), denominada “eutectic” na literatura, a uma temperatura de 225 ± 2 °C.

Além do zircão, a TTF é uma das técnicas mais utilizadas para a reconstrução das histórias térmicas de rochas em tempos geológicos e também para a obtenção das idades de resfriamento de outros minerais que contenham urânio em sua composição, como a apatita, titanita e a monazita (Gleadow et al., 2002; Curvo et al., 2013; Malusà e Fitzgerald, 2019; Dias et al., 2017b; 2020b; 2021; Jones et al., 2023).

Figura 6 - Formação do traço latente.



Fonte: Adaptado de Wagner e Van der Haute, (1992).

Comparado com outras técnicas de datação baseadas em radioisótopos naturais, a TTF é diferente porque ele não se baseia na medição da abundância isotópica por espectrometria de massas, mas sim, na contagem individual de traços de fissão sob uma determinada área (Wagner

& Van der Haute, 1992). Portanto, o que se estima é o tempo decorrido desde o início do acúmulo dos traços de fissão, com base na densidade desses traços observados na superfície do mineral, conforme demonstra a figura 7 (Tagami e O’Sullivan, 2005).

Figura 7 - Grão de zircão e seus traços de fissão visualizados através de microscopia óptica.



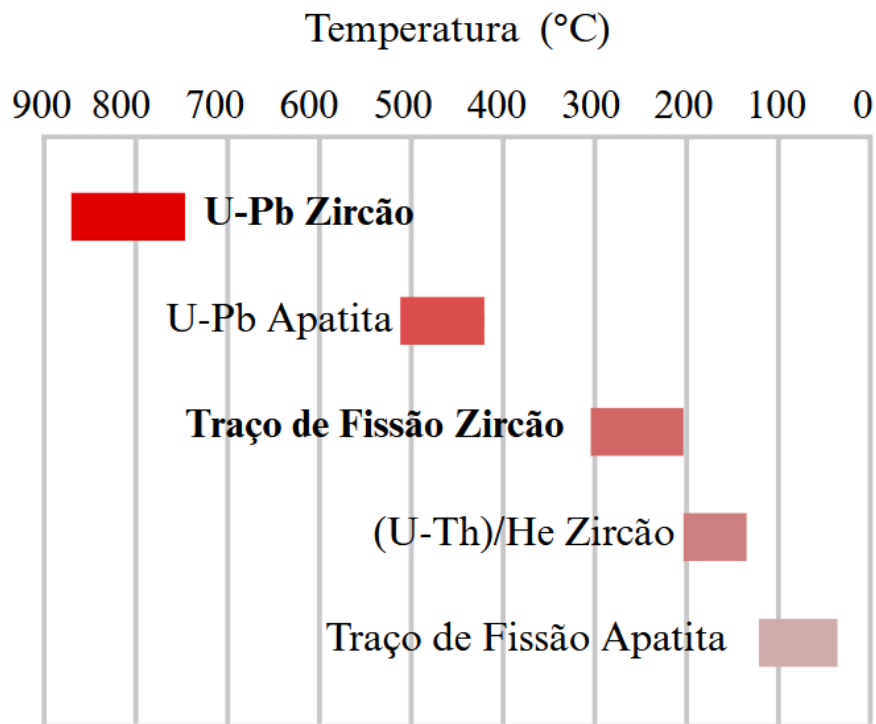
Fonte: Elaborado pelo autor.

A capacidade do mineral de acumular traços de fissão dependerá de sua respectiva temperatura de fechamento (ou temperatura de retenção de traços). No caso do zircão, por exemplo, essa temperatura está entre 200 °C e 320 °C para o método TTF (figura 8). Isso significa que os traços começam a se acumular quando o mineral esfria até essa faixa. Acima desse intervalo (valores acima de 320 °C), os traços são “apagados” totalmente — ou seja, a rede cristalina do mineral passa pelo processo de *annealing* total. (Fleischer, 1975; Tagami e O’Sullivan, 2005).

Ainda na perspectiva do conceito de temperatura de fechamento, entre 200 °C e 320 °C ocorre o processo de recuperação térmica parcial para o zircão (processo esse também conhecido como *annealing* parcial), onde os traços começam a ser acumulados e termicamente encurtados ao mesmo tempo.

O *annealing* é um processo natural complexo, governado pela difusão térmica e que está associado ao encurtamento ou ao apagamento completo dos traços espontâneos. Esse fenômeno ocorre em temperaturas elevadas e varia com o tempo de exposição. No caso do zircão, sua cinética pode variar conforme diferentes fatores, como o grau de dano acumulado por radiação alfa (Tagami e Matsu'ura, 2019). Dessa forma, a análise direta do comprimento desses traços estará relacionada a reconstrução da história térmica de uma amostra através de modelos de *annealing* (Sales et al., 2023). Em suma, esse é um fenômeno importante para a definição da temperatura de fechamento da técnica (TTF) e explica relações importantes com interpretações geológicas.

Figura 8 - Temperatura de fechamento de diferentes minerais sob métodos geo/termocronológicos diferenciados.



Fonte: Adaptado de Doepke (2017).

Naturalmente, o aquecimento ou resfriamento da amostra e, conseqüentemente, a perda ou o acúmulo dos traços de fissão nos grãos, ocorre em resposta aos processos geodinâmicos que a rocha sofreu ao longo do tempo geológico. Devido a essa sensibilidade térmica, pode-se afirmar que a redução e retenção dos traços de fissão é uma função tanto da temperatura quanto do tempo de exposição a essa temperatura (Tagami e O'Sullivan, 2005). Por isso, a idade obtida através da datação por traços de fissão nem sempre corresponde à idade de cristalização dos grãos. Em muitos casos, os dados refletem o momento em que o mineral resfriou abaixo de uma determinada temperatura crítica a partir da qual os traços passam a ser preservados. Assim, o

que obtemos é uma idade aparente que irá refletir a história térmica do mineral após ele se cristalizar (Dias, 2012).

Como mencionado anteriormente, cada mineral e método possui sua própria temperatura de fechamento. A análise multi-método, baseada na integração da datação via U-Pb e TTF em zircão proporcionará uma interpretação em amplo intervalo de temperatura, correspondendo uma a análise em baixa, média e alta temperatura. Assim, a vantagem de se trabalhar com faixas de temperatura abrangentes é que elas podem fornecer informações únicas, tanto sobre a idade e estrutura da fonte de sedimentos, bem como da evolução da própria bacia (ver por exemplo; Lu et al., 2020; Mansour et al., 2021; Girault et al., 2023).

Dessa forma, a TTF possibilita o entendimento de i) processos de denudação nas diferentes situações tectônicas, ii) na estimativa da idade deposicional máxima, iii) estudo de proveniência ou origem sedimentar, iv) mapear correlação de sequencias sedimentares, dentre outros.

4.3 Análises U-Pb em zircão via LA-ICP-MS

A datação de amostras geológicas pelo método U-Pb é uma das técnicas mais utilizadas para determinar a idade de cristalização e/ou metamorfismo de minerais que contêm urânio em sua composição. Como visto anteriormente, diferente da termocronologia por traços de fissão, que é aplicada a processos geológicos de média a baixa temperatura, a datação por U-Pb está relacionada a eventos de alta temperatura. Isso significa que, por meio desse método, geralmente obtemos idades mais antigas, permitindo junto a TTF, reconstruir uma história térmica ainda mais completa dessas amostras. Essa técnica de datação possui base no decaimento radioativo do U para Pb traçando-se uma curva (concordia) com as razões isotópicas de $^{235}\text{U} / ^{207}\text{Pb}$ e $^{238}\text{U} / ^{206}\text{Pb}$.

Apesar de estudos metodológicos anteriores (ver por exemplo; Burton-Johnson e Riley, 2015 e Burton-Johnson et al, 2023), as primeiras tentativas bem sucedidas do uso de LA-ICP-MS para a datação isotópica de zircões foram relatadas por Feng et al., (1993) e Fryer et al., (1993). Recentemente, tem havido uma série de tentativas bem sucedidas de datar zircões e outros minerais acessórios por LA-ICP-MS (Chemale et al., 2012; Mansour et al., 2021; Balkanska et al., 2021; Cardozo, Vasquez e Toro, 2025). A utilização de LA-ICP-MS permite a obtenção das razões isotópicas de U e Pb por meio de análises pontuais no mineral, fundamentais para cristais com mais de uma fase de crescimento, como o zircão. Tal

metodologia possibilita datações mais rápidas e sem risco de contaminação, porém com menor precisão, em relação à metodologia tradicional de dissolução isotópica de grão a grão com TIMS (Espectrômetro de Massa com Ionização Térmica). Essa precisão é compensada por análises em um grande número de grãos, permitindo obter idades de boa confiabilidade. Para este trabalho, contabilizando todas as quatro amostras, foram analisados cerca de 203 grãos.

A obtenção do conteúdo de U e datação U-Pb em zircão para este trabalho foi realizada no Department of Earth Sciences, ETH, em Zurique, junto ao Dr. Joaquin Bastias-Silva. A descrição do ICP-MS, laser e condições de análise são apresentadas na Tabela 2, a seguir.

Tabela 2 – Informações sobre o ICP-MS, Laser e condições de operação.

ASI Resolution155 Laurin Technics 193 nm	Laser output power: ~2 J/cm ² ; Shot repetition rate: 5 Hz; Laser spot: 30 μm Pulse: 25 ns
Thermo Element XR SF-ICP-MS	Forward power 1500 W; Reflected power < 5 W; Masses measured: 202, 204, 206, 207, 208, 232, 235, 238 Integration time per peak: 12 ms (masses 202, 204), 20 ms (masses 208, 232, 235, 238), 40 ms (masses 206, 207) Gas input: Carrier flow ~ 0.95 l/min Ar (Ar) + 0.7 l/min (He); Acquisition 50 cycles of 1.048 s.

Fonte: Elaborado pelo autor.

As análises de U-Pb foram realizadas usando a amostra padrão GJ-1. Além disso, outras amostras foram usadas como padrão secundário: Temora2, 91500, OD-3 e, por fim, a amostra padrão de idade (para o TTF), FCT (Fish Canyon Tuff)⁷.

4.4 Características do zircão e sua utilização dentro da geo/termocronologia

Especificamente, o mineral zircão desempenha um papel importante na interpretação da composição e história dos sedimentos antigos e modernos. Por ocorrer em praticamente todos os depósitos sedimentares, fornece um elo crítico na compreensão na história de origem de um depósito. Além disso, o zircão é um mineral acessório comum em rochas ígneas, sedimentares

⁷ Amostras padrão, como a FCT, funcionam como uma referência a fim de corrigir possíveis desvios no processo analítico, como variações na sensibilidade dos espectrômetros (Malusà e Fitzgerald, 2019).

e metamórficas. É física e quimicamente resistente, podendo "sobreviver" a longos períodos geológicos e, em muitos casos, fornecer um registro de cada evento geológico ao qual foi submetido. Incorpora em sua estrutura elementos traço, como U, Th e Pb, o que é crucial para as análises geocronológicas e termocronológicas.

Desde o trabalho de Twenhofel (1941), o zircão é reconhecido como uma ferramenta poderosa na compreensão de proveniência e de sistemas de dispersão sedimentar. Como dito anteriormente, uma das vantagens do zircão, frente a outros minerais, é que seus grãos podem ser datados por TTF e U-Pb, que, devido às suas diferentes sensibilidades térmicas, podem fornecer informações únicas, tanto sobre a idade e estrutura da fonte de sedimentos, bem como da evolução da própria bacia.

Por isso, dentre os diversos minerais que podem ser utilizados nesta metodologia, este projeto focou na aplicação no mineral zircão, $ZrSiO_4$. As razões para isto são muitas, dentre elas: i) a necessidade da inserção e aprimoramento da TTF em zircão. A maioria da comunidade utiliza o mineral apatita como fonte de informações termocronológicas, no entanto, este interesse está muito mais relacionado com sua aplicação na prospecção de hidrocarbonetos, do que no seu potencial termocronológico. Por esta razão a TTF em apatita avançou tanto, em detrimento da aplicação em outros minerais; ii) o mineral zircão tornou-se um dos mais importantes para o estudo de proveniência de sedimentos e da história de exumação de áreas de interesse geológico. Ainda, o zircão é resistente ao desgaste e à abrasão, e pode ser datado com vários métodos isotópicos com razoáveis concentrações de urânio e tório (U-Pb via LA-ICP-MS), possibilitando uma datação integrada; iii) o zircão tem a capacidade de reter informações sobre a história térmica mais recente de uma área fonte, o que possui valor inestimável para elucidar os processos geológicos decorrentes de uma variedade de configurações geodinâmicas.

Por fim, no zircão, a metodologia por TTF é aplicada a análises de processos geológicos de intermediária/baixa temperatura, 200-320 °C (Garver & Brandon, 1994; Tagami et al., 1998; Carter & Moss, 1999; Bernet et al., 2001).

Diversos estudos empregam métodos radiométricos em zircão para determinar idades geológicas. Entre eles, o sistema U-Pb se consolidou como o mais usado pela comunidade geo/termocronológica (Davis et al., 2003), enquanto técnicas como U-Th/He (Reiners, 2005) também têm sido amplamente aplicadas. Combinados à TTF, esses métodos permitem decifrar a história térmica de rochas em diversos contextos: desde a história térmica de rochas dos embasamentos orogênicos, até investigações de proveniência com grãos detríticos em rochas sedimentares, além da reconstrução térmica de áreas situadas em, ou próximas a, zonas de falha

(Carter, 1999; Garver et al., 1999; Spikings et al., 2001; Hasebe & Watanabe, 2004; Bernet et al., 2004a; Dias et al., 2010; 2011; 2012).

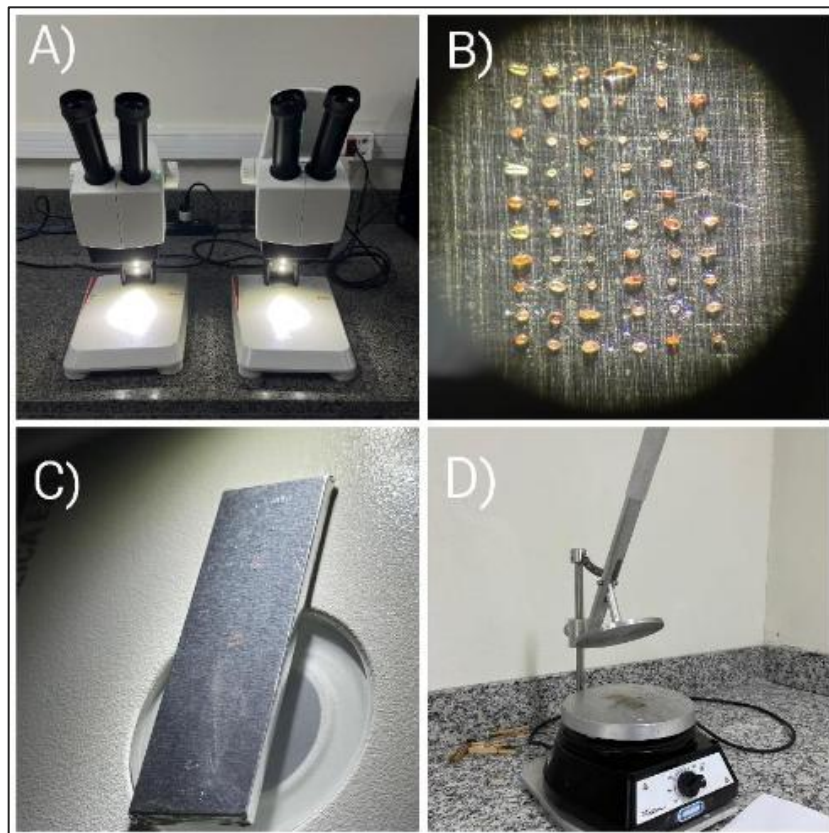
4.5 Montagem, polimento e ataque químico do zircão

Como mencionado anteriormente, para a visualização dos traços gerados pela fissão espontânea se faz necessário a preparação dos grãos. Estas etapas também são descritas por Tagami (1987; 2005). Os passos a seguir foram realizados no laboratório de pesquisa do Grupo TRACKs, na UFSCar, *campus* Sorocaba.

4.5.1 Montagem

Para observar os traços de fissão ao microscópio óptico é necessário que os grãos de zircão sejam montados (incrustados) em um teflon PFA especial transparente que suporta até 330 °C de temperatura. O tempo para realizar esta montagem a esta temperatura é da ordem de minutos. A lâmina contendo os grãos é colocada em uma estufa até atingir a temperatura de ~320 °C. Finalmente se exerce uma pressão sobre o teflon até que os grãos de zircão fiquem incrustados totalmente nele.

Figura 9 - Coleta e montagem dos grãos de zircão. A) Lupa eletrônica LEICA sendo utilizada para a coleta dos grãos. B) Grãos de zircão vistos e montados sob a lupa. C) Grãos montados e postos sob uma barra de metal. D) Equipamento para incrustação dos grãos.

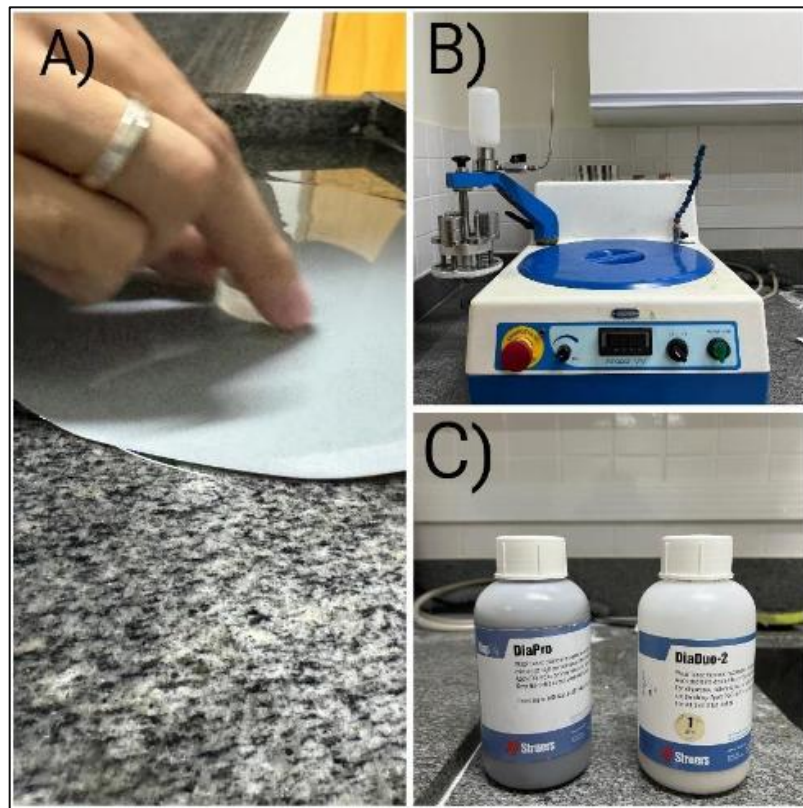


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5.2 Lixamento e polimento dos grãos

Após a montagem no teflon, a amostra é lixada em três etapas: lixa 1200, manualmente; lixa 2400, por 4 minutos a 70 rpm na politriz; e, por último, lixa 4000, por 6 minutos a 60 rpm na politriz. É importante frisar que o lixamento deve ser feito com muito cuidado, pois qualquer descuido no tempo e pressão sobre a amostra pode ocasionar a perda de grãos de zircão. Posteriormente, a amostra é polida com pastas de diamante de granulometria de 1 e de $\frac{1}{4}$ μm durante 10 minutos, a 60 rpm na politriz – Figura 10.

Figura 10 - Lixamento e polimento das amostras de zircão. A) Lixamento manual da amostra incrustada no teflon e na resina epóxi. B) Politriz utilizada nos polimentos das amostras. C) Pastas de diamante.

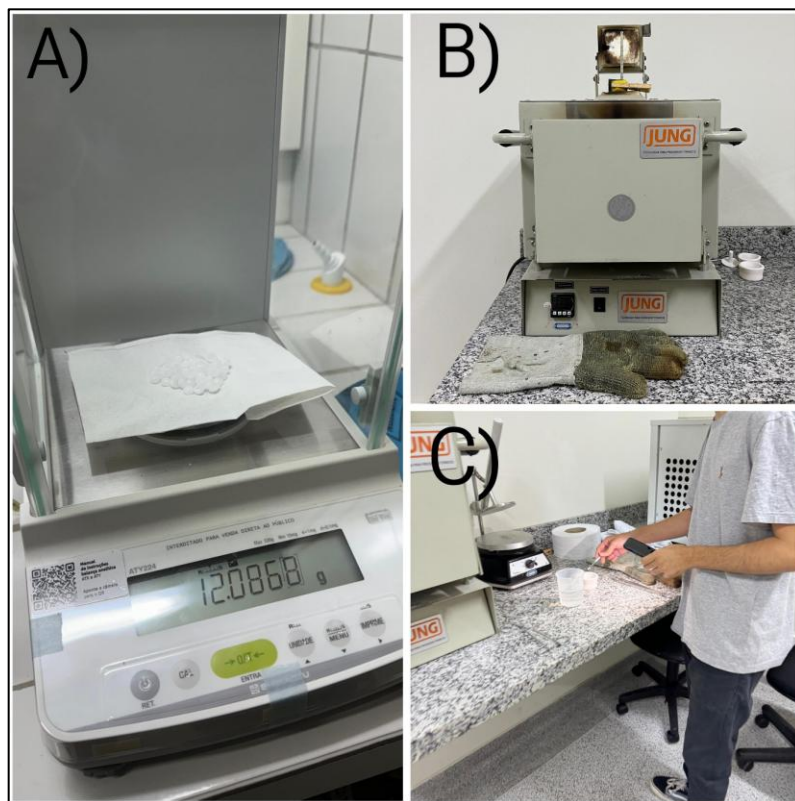


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5.3 Ataque químico

O ataque químico é feito com uma mistura de NaOH:KOH (1:1), denominada “eutectic” na literatura, a uma temperatura de 225 ± 2 °C. Coloca-se esta mistura em um béquer de teflon de forma cilíndrica com tampa e paredes largas, altamente resistentes à temperatura. O teflon contendo os grãos de zircão é colocado no béquer, na superfície do “eutectic”, e levado ao forno a 225 ± 2 °C durante tempos que podem chegar a 72 horas (Garver, 2003). O critério utilizado para atingir o tempo de ataque ideal é fazê-lo até que os diâmetros dos traços confinados meçam aproximadamente 2 μm (Yamada et al., 1998).

Figura 11 - Preparação e ataque químico das amostras de zircão. A) Preparação do ataque químico com 12 gramas de hidróxido de sódio e de potássio. B) Forno utilizado para as altas temperaturas para o ataque químico. C) Retirada das amostras em teflon do forno.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5.4 Obtenção das imagens dos traços no grão

A contagem dos traços, para obter a densidade dos traços de fissão espontâneos, é realizada em uma área específica denominada campo, escolhida aleatoriamente na parte central de cada grão. Aqui, as respectivas densidades foram medidas sob um microscópio LEICA 2700DM, com um aumento de 1500× a seco e com o auxílio do software LAS Core, também desenvolvido pela Leica (figura 12).

Após a datação via TTF, a montagem dos grãos de zircão incrustados no Teflon PFA é acoplada em resina epóxi para obtenção do conteúdo de U via LA-ICP-MS. A definição do ponto e do diâmetro exato para o spot do laser é determinada a partir da área usada para obter a densidade de traços superficiais em cada grão de zircão. Essa área é definida durante a datação via TTF.

Figura 12 - Equipamento utilizado para a análise das densidades dos traços de fissão grão a grão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.6 Obtenção das idades

A idade de retenção dos traços pode ser obtida através do conhecimento sobre a meia-vida por fissão espontânea do ^{238}U , o conteúdo de urânio da amostra, a quantidade de decaimentos ocorridos e a densidade de traços espontâneos (Bernet, 2009; Azevedo, 2021).

Especificamente em relação à obtenção da idade, vários pesquisadores desde 2004 (ver Hasebe et al., 2004; Donelick et al., 2005; Hadler et al., 1995; Chew e Donelick, 2012; Soares et al., 2014) trazem a utilização de um LA-ICP-MS para se obter o conteúdo de urânio. Outra ferramenta disponível é o uso de Microsonda Eletrônica. Esta metodologia é chamada de Electron Microprobe-Fission-Track (EMPA-TF) e foi desenvolvida inicialmente por Gombosi et al., (2014) e aprimorada por nosso grupo de pesquisa (Dias et al., 2017a).

A seguir, será demonstrada a equação mais geral da TTF:

$$t = \frac{1}{\lambda_{\alpha}} \ln \left[1 + \frac{\rho_s \lambda_{\alpha}}{\varepsilon_{238} N_U C_{238} \lambda_f} \right], \quad (1)$$

Onde ρ_s é a densidade de traços de fissão espontânea; ε_{238} é a eficiência de detecção mineral, isto é, a razão entre o número de traços de fissão espontânea observados por unidade de área e os traços de fissão espontânea por unidade de volume do mineral; N_U é o número de ^{238}U por unidade de volume no mineral; C_{238} é a concentração isotópica do ^{238}U (0,99275); λ_α é a constante de decaimento alfa ($1,55125 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$ - Lederer e Shirley, 1978); λ_f é a constante de fissão espontânea do ^{238}U ($8,5 \times 10^{-17} \text{ a}^{-1}$ - Holden e Hoffman, 2000) e t é a idade em Ma.

Um dos fatores mais complexos de se obter no TTF a partir do LA-ICP-MS (ou EMPA) é a eficiência de detecção mineral (ataque químico e eficiências de observação) na superfície interna do mineral. Estudos desenvolvidos por Hasebe et al., (2004) determinam a idade de TTF em amostras padrão, considerando as eficiências de ataque e de observação de aproximadamente 1. Soares et al. (2014) utilizam o comprimento projetado dos traços de fissão de modo a obter o valor ηq , o que permite alcançar diretamente tal eficiência. Assim, uma possibilidade de atingir diretamente essa eficiência é a utilização de uma amostra padrão de idade conhecida. Assim, a equação (1) pode ser reescrita como:

$$\varepsilon_{238} = \frac{\rho_s \lambda_\alpha}{N_U C_{238} \lambda_f (e^{\lambda_\alpha t} - 1)}. \quad (2)$$

Na equação (2), a eficiência de detecção de mineral pode ser determinada utilizando, por exemplo, a Fish Canyon Tuff, amostra padrão de idade na TTF, com a idade de $27,55 \pm 0,24$ Ma datada com K-Ar em biotita (Lanphere e Baadsgaards, 1997). Por outro lado, quando a concentração de U é medida diretamente, a relação entre U e o fator de eficiência deve ser considerada. Esta relação pode ser feita a partir de:

$$K(\text{ppm}) = \varepsilon_{238} N_U. \quad (3)$$

Na equação (3), ppm é a concentração de urânio dada em $\mu\text{g. g}^{-1}$. Assim, a partir das equações (1) e (3), uma nova equação da idade é obtida. Uma vez que a constante K é determinada, a idade de TTF pode ser determinada através de medições de concentração de U subsequentes e pela equação abaixo:

$$t = \frac{1}{\lambda_\alpha} \ln \left[1 + \frac{\rho_s \lambda_\alpha}{K(ppm)C_{238}\lambda_f} \right]. \quad (4)$$

4.6.1 Plotagem dos dados e obtenção da História Térmica

Os resultados foram plotados e graficados a partir do software IsoplotR de Vermeesch (2018). Este software é gratuito e pode ser aplicado em análises geocronológicas tais como, U-Pb, Pb-Pb, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, Rb-Sr, Sm-Nd, Lu-Hf, Re-Os, U-Th-He e TTF. O software pode: i) implementar regressão isócrona em duas e três dimensões; ii) visualizar conjuntos de dados de múltiplas alíquotas como distribuições de idade cumulativas; iii) faz estimativas de densidade de kernel e gráficos radiais; e, iv) calcula idades médias ponderadas (Vermeesch, 2018). Uma das vantagens do IsoplotR é porque ele monitora as correlações de erro das medições da razão isotópica em alíquotas das mesmas amostras.

4.6.2 Obtenção do conteúdo de urânio (U)

Os métodos de datação radioativa são baseados na determinação dos átomos pai e seus produtos, comumente chamados de átomos filho, seguindo uma taxa de decaimento dada pela lei de decaimento radioativo, cujo principal parâmetro é a constante de decaimento. A TTF tradicional não difere destes outros métodos, considerando que o núcleo pai (^{238}U) tem certa probabilidade de decair por fissão espontânea, produzindo os traços de fissão (que fazem o papel de átomos filhos, considerando que, para cada fissão ocorrida, um traço é gerado). Para se obter as idades do mineral, o número de traços de fissão e o conteúdo do ^{238}U devem ser determinados. Na TTF tradicional, amostras são irradiadas com nêutrons térmicos em um reator nuclear. O objetivo desta irradiação é induzir as fissões do ^{235}U presentes no mineral. Como a razão $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ é constante da natureza, a medida dos traços induzidos permite determinar o conteúdo do ^{238}U .

A grande desvantagem de se utilizar a irradiação com nêutrons é o período longo de espera necessária para o decaimento radioativo desses materiais irradiados. Em uma situação ótima, o tempo de espera para se manusear uma amostra radioativa é por volta de 3-4 meses. Outro problema ao se manusear amostras irradiadas é a necessidade de licenças especiais para recebê-las no laboratório, uma vez que são considerados materiais radioativos. Há também, devido especialmente a eventos de acidentes nucleares como o ocorrido no Japão, uma pressão da sociedade para a diminuição do uso de reatores nucleares e materiais radioativos. Sendo assim, como adiantado na seção 4.3, a utilização do LA-ICP-MS para se obter o conteúdo de urânio é um caminho importante para superar tal dificuldade e, desta forma, tornou-se um

objetivo primordial de pesquisadores da área (Hasebe et al., 2004; Donelick et al., 2005; Chew & Donelick, 2012; Soares et al., 2014).

Como adiantado na tabela 2, os conteúdos de ^{202}Hg , ^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb , ^{232}Th , ^{235}U e ^{238}U foram adquiridos para este trabalho sob supervisão do Dr. Joaquín Bastias-Silva, parceiro deste trabalho.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados os resultados obtidos. Primeiramente os resultados de TTF em zircão, e, posteriormente, os resultados de U-Pb em zircão.

5.1 TTF em zircão

São apresentados resultados das quatro amostras de zircão identificadas na Tabela 1 e Figura 3 da Ilha Alexander. Os dados analíticos reduzidos estão apresentados na Tabela 3 abaixo.

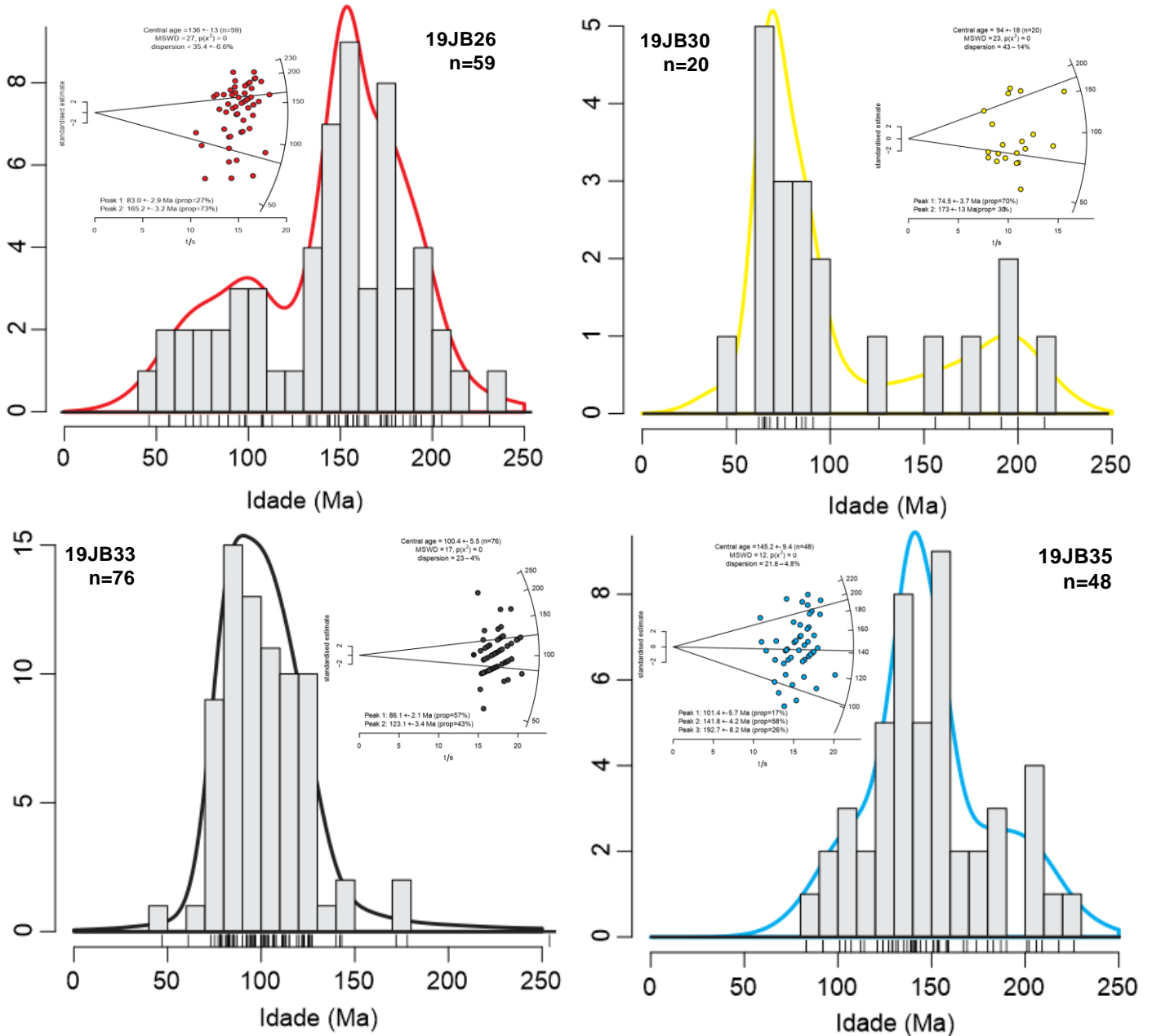
Tabela 3 - Dados analíticos das análises TTF em zircão nas amostras.

Amostra	U (ppm)	n	N _s	ρ _s (× 10 ⁷) (traços/c m ²)	Idades TF (Ma)			
					Idade Central ± σ	P1	P2	P3
(1) 19JB35	263	48	1338	2,00	145 ± 10	101 ± 4	141 ± 6	193 ± 8
(2) 19JB33	322	20	556	1,46	100 ± 5	86 ± 2	123 ± 3	-
(3) 19JB26	303	59	1243	1,99	136 ± 13	83 ± 3	165 ± 3	-
(4) 19JB30	322	20	556	1,46	94 ± 18	75 ± 4	173 ± 13	-

U, concentração de ^{238}U obtido via LA-ICP-MS; n, número de grãos analisados; N_s, número de traços contados; ρ_s, densidade superficial de traços; P1, P2, P3, população de idades obtidas via *RadialPlotter*.
Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 13 apresenta os gráficos KDE e no *inset*, RadialPlotter, ambos obtidos via RadialPlot (Vermeesch, 2018) das quatro amostras analisadas.

Figura 13 - Kernel Density Estimation (KDE) das idades obtidas via TTF em zircão para cada amostra selecionada da Ilha Alexander. No inset o RadialPlotter das mesmas amostras.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram analisados 203 grãos de zircão via TTF. A amostra 19JB26 apresenta idades variando de 231 a 46 Ma, com idade central de 136 ± 13 Ma; a amostra 19JB30 apresenta idades entre de 214 a 62 Ma, com idade central de 94 ± 18 Ma; a amostra 19JB33 apresenta idades entre de 254 a 47 Ma, com idade central de 100 ± 5 ; e finalmente, a amostra 19JB35 apresenta

idades entre de 226 a 83 Ma, com idade central de 145 ± 10 Ma. As idades centrais foram obtidas em Vermesch (2018).

Em análise geral, tem-se: i) sedimentação durante o Mesozoico; ii) plutonismo no Cretáceo Inferior; iii) vulcanismo no Cretáceo; iv) sedimentação do Cretáceo Superior (no início do Terciário). As rochas magmáticas, que representam um terço da margem ocidental do arco magmático Península Antártica, são críticas para a compreensão da fase final da subducção ao longo da margem sul da Península Antártica. No centro e norte da Ilha Alexander as rochas magmáticas podem ser distinguidas pela proporção, alcance e tipos de litofácies presentes e pelos períodos de magmatismo representados (veja McCarron et al., 1997). Os resultados apresentados aqui demonstram que as sequências magmáticas na Ilha Alexander migraram para o norte ao longo do comprimento da ilha.

Em análise mais específica, as idades Mesozoicas podem ser interpretadas como efeito da formação das estruturas transtensionais dextrais na Ilha Alexander quando o forearc estava em extensão e pelas estruturas transpressionais sinistrais nas sequências do Grupo LeMay (região onde estão inseridas as amostras selecionadas). Este mesmo regime cinemático também é evidente ao longo da ampla margem de Gondwana durante o Cretáceo (veja McCaffrey, 1992; Chemenda et al., 2000; Doubleday & Storey, 1998; Twinn et al., 2022 e referências correlatas). Ainda no caso das idades mais altas, nossos resultados mostram idades desde o Permiano com proeminência ao redor de 170 Ma o que, segundo Riley et al. (2023), reflete sua idade deposicional mais jovem.

A idade central de 145 ± 10 Ma pode estar representando o momento de plutonismo ocorrido no Cretáceo Inferior. Tal interpretação é validada também através de Griffiths e Oglethorpe (1998) e referências correlatas.

Sobre as idades em torno de 100 Ma obtidas neste projeto, Riley et al. (2020) interpretam que estas idades são coerentes com a convergência entre a Placa Phoenix (à norte) e a Península Antártica que foram soerguidas 135 e 100 Ma. Ainda, segundo Vaughan et al. (2012), essas idades podem ser relacionadas ao evento compressivo pré-100 Ma à fase 1 do evento tectônico Palmer Land (à leste - principal ilha da Península Antártica adjacente a Ilha Alexander).

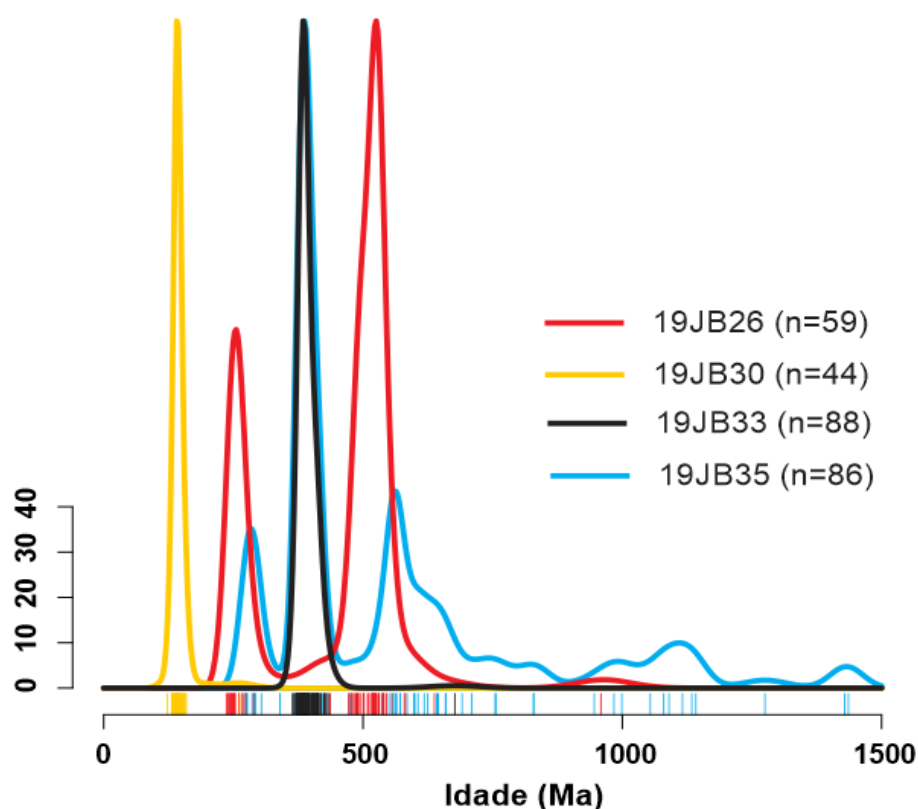
As idades mais jovens são encontradas nas amostras 19JB30 e 19JB33 e indicam o início do magmatismo é registrado por rochas vulcânicas mal expostas no Cretáceo tardio a partir de 80 Ma. Apesar de ser encontrada nas quatro amostras, como já dito, essa faixa de idades destaca-se nas amostras 19JB30 e 19JB33. As rochas vulcânicas da amostra 19JB33 (nas coordenadas das Montanhas Colbert) com idades ao redor de 70 Ma, são interpretados como depósitos de preenchimento de caldeira. Idades menores entre 70 e 50 Ma validam cronologia de depósitos

piroclásticos e lavas menos evoluídas. Em trabalho recente, esta nossa interpretação é validada (Riley et al., 2023). Os autores também acrescentam que essa faixa de idade ainda inclui lavas andesíticas com alto número de Mg.

5.2 U-Pb em zircão via LA-ICP-MS

As análises por U-Pb foram realizadas nas mesmas amostras datadas via TTF. Além disso, a figura 14 apresenta os gráficos KDE via RadialPlotter (Vermeesch, 2018) das quatro amostras analisadas.

Figura 14 - Kernel Density Estimation (KDE) das idades U-Pb em zircão para cada amostra selecionada da Ilha Alexander.



O aspecto mais marcante dos dados é a variação significativa das idades na região central (pontos de amostras coletadas) da Ilha Alexander. A amostra 19JB26 apresenta dois picos de idade primários em cerca de 260 Ma e 525 Ma, juntamente com uma distribuição de idades Neoproterozóicas. A amostra 19JB30 apresenta um único pico principal de idade em torno de 130 Ma. A amostra 19JB33 também apresenta um pico proeminente em cerca de 400

Ma. E finalmente, a amostra 19JB35 apresenta uma distribuição mais ampla de idades com pico principal em 400 Ma e idades subordinadas em 290 Ma, 530 Ma e outros no Neo-Mesoproterozóico.

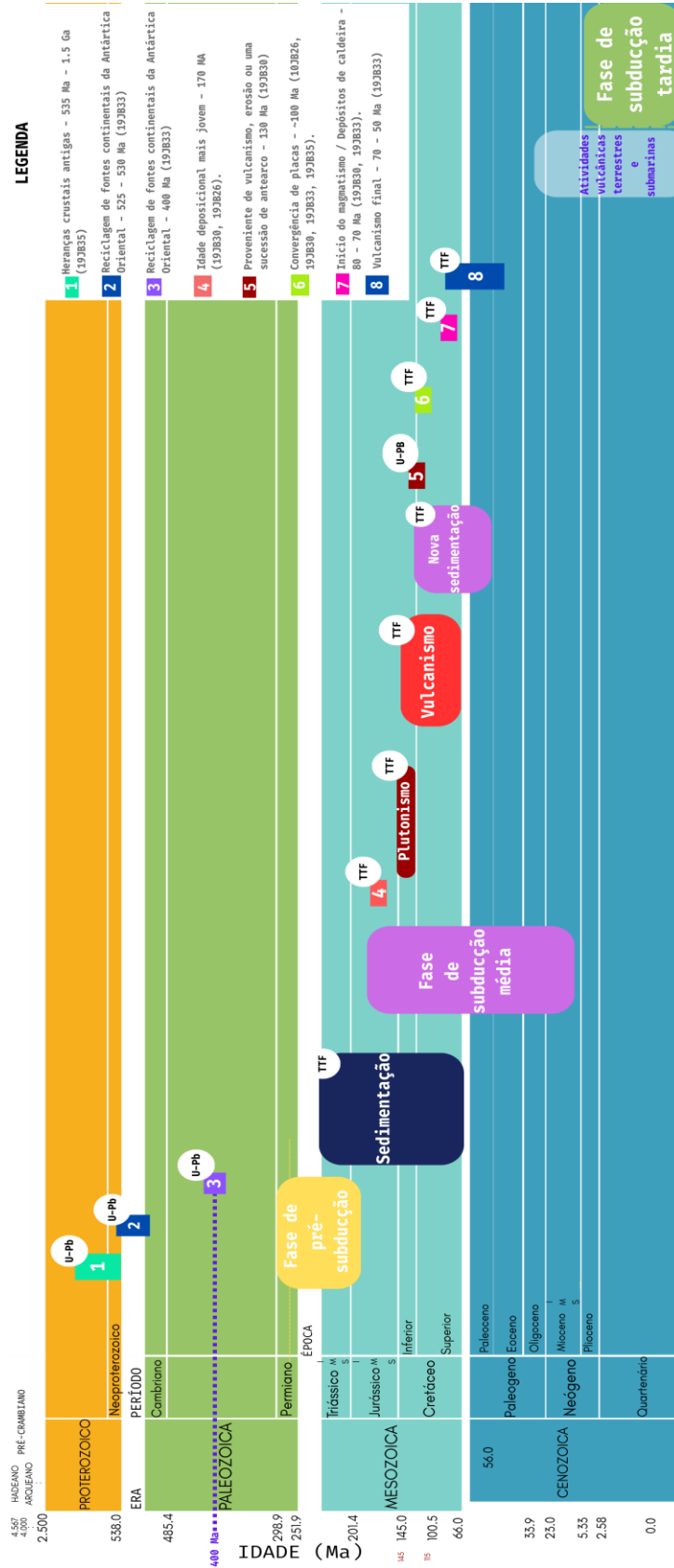
Diferente do feito com os dados de TTF em zircão, os resultados de U-Pb em zircão serão analisados por amostra. Assim, em análise mais específica, a amostra 19JB26 apresenta dois picos de idade primários em cerca 260 Ma e 525 Ma. A população ao redor de 525 Ma, é interpretada por Riley et al. (2023) como tendo significância direta com Bruce Bank (situada a noroeste da Ilha Alexander) e os autores fazem essa conexão a partir, pois as rochas metassedimentares ao longo de sua margem sul têm um perfil de idade de zircão detrítico muito semelhante ao obtido para esta amostra – com 262 Ma e 520 Ma. Não temos dados suficientes para validar ou discordar desta afirmação, mas entendemos que com análise de mais amostras será possível obter informações para fortalecer ou discordar dos autores. As idades <300 Ma, trazem informações de proveniência mais valiosas do que examinar toda a população de idade detrítica, particularmente porque a margem de Gondwana é caracterizada pela reciclagem multifásica de zircões do Ordoviciano e do Cambriano (veja, por exemplo, Andersen et al., 2018 e Riley et al., 2023). Essas idades que também podem ser encontradas nas amostras 19JB30 e 19JB35, entendemos que há potencial correlação com o bloco crustal da Ilha Thurston (ao sul da Ilha Alexander). Essa também é a interpretação de Riley et al. (2017) que ainda acrescenta que essa relação é válida mesmo que não seja possível identificar facilmente a preservação de sucessão sedimentar.

A amostra 19JB30 apresenta um único pico principal de idade em torno de 130 Ma. Estes são os primeiros dados obtidos em zircões detríticos nesta região e por isso é necessário cautela quanto à interpretação do resultado. Isso porque a idade pode ser entendida de três (talvez mais) formas diferentes. Uma delas, mais simples e direta é que a amostra indica a idade do vulcanismo ocorrido em Gannon Nunatak. A outra possibilidade é que essa idade é correlata ao Grupo Bluff (região dentro da Ilha Alexander onde esta amostra foi coletada) que apresenta idade de deposição do Jurássico médio ao Cretáceo e é definido como sendo uma sucessão de *fore-arc* (Butterworth et al.; 1988 e Hervé et al., 2006) na Ilha Alexander. Neste contexto, esta população de idade representaria as assinaturas no Cretáceo médio para as partes superiores da sucessão. Ainda, de acordo com Twinn et al. (2022) essas idades correspondem a rochas vulcânicas que cobriam a Ilha Alexander, mas que foram potencialmente removidas durante a rápida elevação e erosão do Cenozóico. Enfim, está claro que algo conclusivo carece de mais estudos, mas um primeiro passo está sendo dado.

A amostra 19JB33 apresenta uma única população de idade ao redor de 400 Ma provavelmente refletem a entrada de uma fonte reciclada da Antártica Oriental/Gondwana na região.

Por fim, as idades obtidas para a amostra 19JB35 apresentam idades semelhantes as publicadas por Simões Pereira et al. (2018) e Riley et al. (2023) para os arenitos da Ilha Palmer (oeste - principal ilha da Península Antártica adjacente a Ilha Alexander). Os picos mais proeminentes ao redor de 400 Ma e 530 Ma, provavelmente refletem a entrada de uma fonte reciclada da Antártica Oriental/Gondwana na região (assim como interpretado para a amostra 19JB33). Em outra linha de pensamento, os resultados alinham-se a uma fonte derivada do extenso cinturão magmático Famatiano, descrito por Castillo et al. (2017), mas não iremos por esse caminho. As idades < 300 M são interpretadas da mesma forma que para a amostra 19JB26. Quanto às idades Neo Mesoproterozóicas não é possível afirmar nada de forma definitiva, mas Riley et al. (2023) sugere que este complexo perfil de idades poderia refletir uma matriz que incorporou as assinaturas de clasto de áreas adjacentes a ilha.

Figura 15 - Eventos registrados por U-Pb e TTF em zircão neste trabalho junto às fases de subducção da PA.



Fonte: Adaptado de International Commission on Stratigraphy (2023).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As idades centrais obtidas através da TTF em zircão variaram entre 94 ± 18 Ma e 145 ± 10 Ma. Seguindo nossa interpretação em colaboração com a literatura disponível, é possível compreender, através da ampla faixa de idades nas amostras, um processo de sedimentação durante o Mesozoico, visto que tais idades sugerem a contribuição de fontes diversas ao longo do tempo geológico, passando por plutonismo registrado no Cretáceo inferior, vulcanismo ainda no Cretáceo e uma nova sedimentação no Cretáceo Superior/início do Terciário.

Com relação as idades obtidas através do U-Pb, é clara a grande variação entre as idades das amostras, refletindo uma história térmica complexa, com múltiplas fontes crustais e processos tectono-sedimentares. Dessa forma, há clareza de que ainda há trabalho a fazer. Em linhas gerais, os picos de idades variaram principalmente do Cambriano até o Cretáceo Inferior, onde refletiram uma complexa história de magmatismo, sedimentação, reciclagem crustal e tectônica de margem ativa.

Ainda, mesmo com o conhecimento sobre a complexidade geológica da região da Península Antártica, nossos resultados e interpretações foram coerentes com a literatura disponível, o que também reforça a confiabilidade do presente estudo.

Por fim, fica claro como a Termocronologia por Traços de Fissão, junto a outras técnicas, como o U-Pb, podem contribuir significativamente para o estudo de evolução de regiões de interesse geológico.

REFERÊNCIAS

Alves, W. B. Sobre a datação por decaimento radioativo. n. 5. ISSN 1980-7341, 2010.

Andersen, T., Elburg, M. A., van Niekerk, H. S., & Ueckermann, H. Successive sedimentary recycling regimes in southwestern Gondwana: Evidence from detrital zircons in Neoproterozoic to Cambrian sedimentary rocks in southern Africa. **Earth-Science Reviews**, 181, 43–60, 2018.

Azevedo, M. 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. 123 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2021.

Balkanska, E.; Georgiev, S.; Kounov, A.; Tagami, T.; Sueoka, S. Fission-track analysis using LA-ICP-MS: techniques and procedures adopted at the new low-temperature thermochronology laboratory in Bulgaria. **Comptes Rendus de l'Académie Bulgare des Sciences**, Sofia, v. 74, n. 1, p. 102-113, 2021.

Barker, D. H. N. & Austin, J. A. Rift propagation, detachment faulting, and associated magmatism in Bransfield Strait, Antarctic Peninsula. **Journal of Geophysical Research**, 103, 24017-24043, 1998.

Bastias, J., Calderon, M., Israel, L., Herve, F., Spikings, R., Pankhurst, R., Castillo, P., Fanning, M., Ugalde, R. The Byers Basin: Jurassic-Cretaceous tectonic and depositional evolution of the forearc deposits of the South Shetland Islands and its implications for the northern Antarctic Peninsula. **International Geology Review**, 1-19.498, 2019.

Bastias, J., Spikings, R., Ulianov, A., Riley, T., Burton-Johnson, A., Chiaradia, M., Baumgartner, L., Hervé, F., Bouvier, A. The Gondwanan margin in West Antarctica: Insights from Late Triassic magmatism of the Antarctic Peninsula. **Gondwana Research**, 81, 1-20, 2020.

Bastias, J., Spikings, R., Riley, T., Ulianov, A., Grunow, A., Chiaradia, M. and Hervé, F. A revised interpretation of the Chon Aike magmatic province: Active margin origin and implications for the opening of the Weddell Sea: **Lithos**. p. 106013, 2021a.

Bastias, J., Spikings, R., Riley, T., Ulianov, A., Grunow, A., Chiaradia, M., Hervé, F. Data on the Arc Magmatism Developed in the Antarctic Peninsula and Patagonia During the Late Triassic – Jurassic: A Compilation of New and Previous Geochronology, Geochemistry and Isotopic Tracing Results. Data in Brief, 2021b.

Bernet, M.; Zattin, M.; Garver, J.I.; Brandon, M. T.; Vance, J. A. Steady-state exhumation of the European Alps. **Geology** 29, 35-38, 2001.

Bernet, M.; Brandon, M. T.; Garver, J. I.; Molito, B. R. Downstream changes of Alpine zircon fission-track ages in the Rhône and Rhine rivers, **Journal of Sedimentary Research**., 74, 82-94, 2004a.

Bernet, M. A field-based estimate of the zircon fission-track closure temperature. **Chemical Geology**, 259(3-4), 181–189, 2009.

Burton-Johnson, A., and Riley, T. R. Autochthonous V. accreted terrane development of continental margins: a revised in situ tectonic history of the Antarctic Peninsula. **Journal of the Geological Society of London**, 172, 822-835, 2015.

Burton-Johnson, A., Bastias, J., & Kraus, S. Breaking the ring of fire: How ridge collision, slab age, and convergence rate narrowed and terminated the Antarctic continental arc. **Tectonics**, 42, e2022TC007634, 2023.

Butterworth, P. J., Crame, J. A., Howlett, P. J., & Macdonald, D. I. M. Lithostratigraphy of upper jurassic-lower Cretaceous strata of eastern Alexander-island. **Cretaceous Research**, 9(3), 249–264, 1988.

Carter, A. Present status and future avenues of source region discrimination and characterization using fission track analysis. **Sedimentary Geology**, 124, 31-45, 1999.

Carter, A. & Moss, S. J. Combined detrital-zircon fission-track and U-Pb dating: A new approach to understanding hinterland evolution. **Geology**, 27(3), 235-238, 1999.

Carter, A. & Gallagher, K. Characterising the significance of provenance on the inference of thermal history models from apatite fission track data – A synthetic data study. In: Detrital thermochronology – Provenance analysis, exhumation, and landscape evolution of mountain belts. (Editors: Bernet, M. and Spiegel, C.). **GSA Special Paper** 378, 7-23, 2004.

Castillo, P., Fanning, C. M., Fernandez, R., Poblete, F., & Hervé, F. Provenance and age constraints of Palaeozoic siliciclastic rocks from the Ellsworth Mountains in West Antarctica, as determined by detrital zircon geochronology. **The Geological Society of America Bulletin**, 129, 1568–1584, 2017.

Cardozo, J. A. O.; Vasquez, M.; Toro, M. A. G. LA-ICP-MS U-Pb zircon dating of rocks of the Jacareacanga Group, Tapajós Domain, Amazon Craton, Brazil. **Brazilian Journal of Geology**, v. 55, e20240021, 2025.

Chemale Jr, F., Dussin, I. A., Alkmim, F. F., Martins, M. S., Queiroga, G., Armstrong, R., Santos, M. N. Unraveling a Proterozoic basin history through detrital zircon geochronology: the case of the Espinhaço Supergroup, Minas Gerais, Brazil. **Gondwana Research**, 22(1), 200-206, 2012.

Chemenda, A., Lallemand, S. and Bokun, A. Strain partitioning and interplate friction in oblique subduction zones: constraints provided by experimental modeling. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 105, 5567–5581, 2000.

Chew, D. M. & Donelick, R. A. Combined apatite fission track and U-Pb dating by LA-ICP-MS and its application in apatite provenance analysis. **Mineralogical Association of Canada Short Course**, 42, 219-247, 2012.

Clinger, A. E., Fox, M., Balco, G., Cuffey, K., Shuster, D. L. Detrital thermochronometry reveals that the topography along the Antarctic Peninsula is not a Pleistocene landscape. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, 125, 2020.

Curvo, E. A. C., Tello, C. A. S., Dias, A.N.C., et al. Zircon fission track and U-Pb dating methods applied to São Paulo and Taubaté Basins located in the southeast Brazil. **Radiation Measurements**, 50, 172-180, 2013.

Dalziel, I., Elliot, D. West Antarctica: problem child of Gondwanaland. **Tectonics**, 11(3), 3–19, 1982.

Davies, B. J.; Hambrey, M. J.; Glasser, N. F.; Holt, T.; Rodès, Á.; Smellie, J. L.; Carrivick, J. L.; Blockley, S. P. E. Ice-dammed lateral lake and epishelf lake insights into Holocene dynamics of Marguerite Trough Ice Stream and George VI Ice Shelf, Alexander Island, Antarctic Peninsula. **Quaternary Science Reviews**, v. 177, p. 189–219, 2017.

Davies, B. Alexander Island Project. *AntarcticGlaciers.org*, 22 jun. 2020. Disponível em: <https://www.antarcticglaciers.org/glacial-geology/antarctic-ice-sheet/alexander-island/alexander-island-project/>. Acesso em: 21 maio 2025.

Davis, D. W.; Williams, I. S.; Krogh, T. E. Historical development of zircon geochronology. **Reviews in Mineralogy & Geochemistry**, 53, 145-181, 2003.

Dias, A. N. C. Zircon fission track and U-Th-Pb in situ dating of Rio Parana Formation, Parana Basin, Brazil. **Revista Mexicana de Física**. 56. 16–21, 2010.

Dias, A. N. C.;Tello, Carlos.; Chemale Junior, Farid.; Godoy, M.C.T.F.; Guadagnin, Felipe.; Iunes, P.J.; Soares, Cleber.; Osório, A.M.A.; Bruckmann, M.P. Fission track and U-Pb in situ dating applied to detrital zircon from the Vale do Rio do Peixe Formation, Bauru Group, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**. 31. 298-305, 2011.

Dias. A. N. C. Análise integrada pelo método U-Pb e traços de fissão em zircão: caracterização, datação e interpretação. Tese – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, 2012.

Dias, A.N.C.; Chemale J. F.; Soares, C.; Guedes, S. A new approach for electron microprobe zircon fission track thermochronology. **Chemical Geology**. 459. 10.1016/j.chemgeo, 2017a.

Dias, A. N. C., Moura C. A. V., Milhomem Neto, J.M., F. Chemale Jr., Girelli, T. J. Geochronology and thermochronology of the basement gneisses of the Brasiliano/Pan-African, 2017b.

Dias, A. N. C.; Guadagnin, F., Rangel, C. V. G. T., Chemale, F., Oliveira, T. R. P., Moura, C. A., Pereira, V. Q., Alves, J. S. E. Provenance of Neogene deposits of Barreiras Formation in the southeastern Brazilian continental margin. **International Journal Of Earth Sciences**, 110, 233-249, 2020b.

Dias, A. N. C., Chemale, F., Candeiro, C. R. A., Lana, C. C., Guadagnin, F., Sales, A. S. W. Unraveling multiple tectonic events and source areas in the intracratonic Bauru Basin through

combined zircon geo and thermochronological studies. **Journal Of South American Earth Sciences**, 106, 103061, 2021.

Donelick, R. A.; Ketcham, R. A.; O'Sullivan, P. B. Apatite Fission-Track Analysis. **Reviews in Mineralogy & Geochemistry**, 58, 49-94, 2005.

Döpke, D. Modelling the thermal history of onshore Ireland, Britain and its offshore basins using low-temperature thermochronology. Tese – Trinity College Dublin, Dublin, Irlanda, 2017.

Doubleday, P. A., Leat, P. T., Alabaster, T., Nell, P. A. R., & Tranter, T. H. Allochthonous oceanic basalts within the Mesozoic accretionary complex of Alexander island, Antarctica: Remnants of proto-Pacific oceanic crust. **Journal of the Geological Society**, 151(1), 65–78, 1994.

Doubleday, P.A. and Storey, B.C. Deformation history of a Mesozoic forearc basin sequence on Alexander Island, Antarctic Peninsula. **Journal of South American Earth Sciences**, 11, 1–21, 1998.

Dziak, R. P.; Park, M.; Lee, W. S.; Matsumoto, H.; Bohnenstiehl, D. R.; Haxel, J. H. Tectonomagmatic activity and ice dynamics in the Bransfield Strait back-arc basin, **Antarctica**. **Journal of Geophysical Research**, 115, 1102, 2010.

Eagles, G. Tectonic evolution of the Antarctic–Phoenix plate system since 15 Ma. **Earth and Planetary Science Letters**, 217 (1–2), 97–109, 2004.

Earle, S. (2015). *Geologia Física*. Victoria, BC: BCcampus. Disponível em: <https://opentextbc.ca/geology/>. E-book ISBN: 978-1-989623-71-8.

Elias, Scott A.; Mock, Cary J. (ed.). (2013). *Encyclopedia of Quaternary Science*. 2. ed. Amsterdam: **Elsevier**. 4 v. ISBN 978-0-444-53642-6. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/referencework/9780444536426/encyclopedia-of-quaternary-science>.

Fleischer, R. L.; Price, P. B.; Walker, R. M. Tracks of charged particles in solids. **Science**, New Series, v. 149, n. 3682, p. 383–393, 23 jul, 1965.

Fleischer R.L, Price P.B, Walker R.M. *Nuclear Tracks in Solids: Principles and Applications*. **University of California Press**, Berkeley, 1975.

Fryer, Brian & Jackson, Simon & Longerich, Henry. The Application of Laser Ablation Microprobe-inductively Coupled Plasma-mass Spectrometry (LAM-ICP-MS) to in situ (U)-Pb Geochronology. **Chemical Geology**. 109. 1-8, 1993.

Garver, J. & Brandon, M. Fission-track ages of detrital zircons from Cretaceous strata, southern British Columbia: Implications for the Baja BC hypothesis. **Tectonics**, 13 (2), 401-420, 1994.

Garver, J.I.; Brandon, M.T.; Roden-Tice, M.K.; Kamp, P.J.J. Exhumation history of orogenic highlands determined by detrital fission track thermochronology. In: *Exhumation processes:*

Normal faulting, ductile flow, and erosion. Ring U, Brandon MT, Willett SD, Lister GS (eds) **Geol. Soc. London Spec. Pub.**, 154, 283–304, 1999.

Garver, J. I. Etching zircon age standards for fission-track analysis. **Radiation Measurements**, 37, 47-53, 2003.

Girault, J.; Basile, C.; Bernet, M.; Paquette, J. L.; Heuret, A.; Loncke, L.; Poetisi, E.; Balvay, M. Thermochronology and U-Pb dating of detrital zircons from the Demerara Plateau (French Guiana-Suriname): Implications for the provenance of the Early Cretaceous syn-rift sedimentation. **Basin Research**, v. 35, p. 1386-1406, 2023.

Gleadow, Andrew J. W.; Belton, David X.; Kohn, Barry P.; Brown, Roderick W. Fission track dating of phosphate minerals and the thermochronology of apatite. In: *Phosphates: geochemical, geobiological and materials importance*. Chantilly: **Mineralogical Society of America**. v. 48, p. 579–630. (Reviews in Mineralogy and Geochemistry), 2002.

Gombosi, D. J., Garver, J. I. Garver, Baldwin, S. L. On the development of electron microprobe zircon fission-track geochronology. **Chemical Geology**, 363:312–32, 2014.

Gondwana Project. Geologia da porção central de Madagascar – segunda expedição. Disponível em: <https://gondwana.geologia.ufrj.br/pt/geologia-da-porcao-central-de-madagascar-segunda-expedicao/>. Acesso em: 21 maio 2025.

Griffiths, C. J. & Oglethorpe, R. D. J. The stratigraphy and geochronology of Adelaide Island. **Antarctic Science**, 10(4):462-475, 1998.

G. Twinn, T. Riley, M. Fox, A. Carter; Thermal history of the southern Antarctic Peninsula during Cenozoic oblique subduction. **Journal of the Geological Society**; 179 (6): jgs2022–008, 2022.

Hadler, J. C., Iunes, P. J., Paulo, S. R. and Tello, C. A. Obtainment of thermal histories for sets of geologically compatible localities by using apatite fission track analysis. **Revista de Física Aplicada e Instrumentação**, 10(1), 1-10, 1995.

Hasebe, N. & Watanabe, H. (2004). Heat influx and exhumation of the Shimanto accretionary complex: Miocene fission track ages from the Kii Peninsula, southwest Japan. *Island Arc.*, 13, 533-543, 2004.

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

Hervé, F., Faundez, V., Brix, M., & Fanning, C. M. Jurassic sedimentation of the Miers Bluff Formation, Livingston Island, Antarctica: Evidence from SHRIMP U-Pb ages of detrital and plutonic zircons. **Antarctic Science**, 18(2), 229–238, 2006.

Holden, N.E. & Hoffman, D.C. Spontaneous fission half-lives for ground-state nuclides (Technical report). **Pure and Applied Chemistry**, 72:1525-1562, 2000.

Jones, S.; Kohn, B.; Gleadow, A.; Skrzypek, E.; Tagami, T. Low-temperature thermochronology of Ryoke belt granitoids, SW Japan: New insights into the recent cooling history from monazite fission-track dating. **Tectonophysics**, v. 864, 229998, 2023.

Lanphere, M.A. and Baadsgaard, H. AGU Spring Meeting Program with Abstracts, p.326, 1997.

Leat, P. T. & Riley, T. R. Antarctic Peninsula and South Shetland Islands: petrology. In: Volcanism in Antarctica: 200 Million Years of Subduction, Rifting and Continental Break-up. Smellie, J. L.; Panter, K. S.; Geyer, A. (eds) **Geol. Soc. London**, 2021.

Lederer C. M. and Shirley V. S. Tables of Isotopes. Wiley, New York, 1978.

Lu, Gang; Fellin, M. G.; Winkler, W.; Rahn, M.; Guillong, M.; Von Quadt, A.; Willet, S. D. Revealing exhumation of the central Alps during the Early Oligocene by detrital zircon U–Pb age and fission-track double dating in the Taveyannaz Formation. **International Journal of Earth Sciences**, v. 109, p. 2425–2446, 2020.

Malusá, Marco G.; Fitzgerald, Paul G. (ed.). Fission-track thermochronology and its application to geology. Cham: Springer. Springer Textbooks in Earth Sciences, **Geography and Environment**, 2019.

Mancini, L. H.; Bonotto, D. M. (2021). Contribuição dos isótopos naturais de urânio no estudo da movimentação das águas subterrâneas. **Derbyana**, São Paulo, v. 42, e746, 2021.

Mansour, S.; Hasebe, N.; Azab, E.; Elnaggar, A. Y.; Tamura, A. 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. 12, p. 1341, 2021.

McCaffrey, R. Oblique plate convergence, slip vectors, and forearc deformation. *Journal of Geophysical Research*: **Solid Earth**, 97, 8905–8915, 1992.

McCarron, Joe J.; Millar, Ian L. The age and stratigraphy of fore-arc magmatism on Alexander Island, Antarctica. **Geological Magazine**, 134 (4). 507-522, 1997.

McCarron, J. J. & Larter, R. D. (1998). Late Cretaceous to early Tertiary subduction history of the Antarctic Peninsula". **Journal of the Geological Society**, 155(2), 255, 1998.

Menzies, J.; Van der Meer, J.J.M. Past glacial environments. 2.ed. **Elsevier**, 2017.

Press, F.; Silver, R.; Grotzinger, J.; Jordan, T.H. Para entender a Terra. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

Reiners, P. W. Zircon (U-Th)/He thermochronometry. **Reviews in Mineralogy & Geochemistry**, 58, 151-179, 2005.

Riley, T. R., Flowerdew, M. J., Whitehouse, M. J. Chrono- and lithostratigraphy of a Mesozoic–Tertiary foreto intra-arc basin: Adelaide Island, Antarctic Peninsula: **Geological Magazine**, 149, 768-782, 2012.

- Riley, T. R., Flowerdew, M. J., Pankhurst, R. J., Curtis, M. L., Millar, I. L., Fanning, C. M., Whitehouse, M. J. Early Jurassic magmatism on the Antarctic Peninsula and potential correlation with the Subcordilleran plutonic belt of Patagonia. **Journal of Geological Society London**, 174(2), 365-376, 2017a.
- Riley, T. R., Flowerdew, M. J., Burton-Johnson, A., Leat, P. T., Millar, I. L., & Whitehouse, M. J. Cretaceous arc volcanism of Palmer Land, Antarctic Peninsula: Zircon U-Pb geochronology, geochemistry, distribution and field relationships. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, 401, 106969, 2020.
- Riley, T. R., Millar, I. L., Carter, A., Flowerdew, M. J., Burton-Johnson, A., Bastias, J., et al. Evolution of an accretionary complex (LeMay Group) and terrane translation in the Antarctic Peninsula. **Tectonics**, 42, e2022TC007578, 2023.
- Rui Feng, Nuno Machado, John Ludden. Lead geochronology of zircon by Laser Probe-inductively coupled plasma mass spectrometry (LP-ICPMS), **Geochimica et Cosmochimica Acta**, Volume 57, Issue 14, 1993, Pages 3479-3486, ISSN 0016-7037, 1993.
- Sales, A.S.W; Dias, A.N.C; Pereira, V. Q; Guedes, S. A novel comparison between the annealing kinetics of induced and spontaneous fission tracks in zircon. **Chemical Geology**, v. 641, 2023.
- Siegert, M. J. Antarctic subglacial topography and ice-sheet evolution. **Earth Surface Processes and Landforms**, 33, 646–660, 2008.
- Simões Pereira, P., van de Fliedrt, T., Hemming, S. R., Hammond, S. J., Kuhn, G., Brachfeld, S., et al. Geochemical fingerprints of glacially eroded bedrock from West Antarctica: Detrital thermochronology, radiogenic isotope systematics and trace element geochemistry in Late Holocene glacial-marine sediments. **Earth-Science Reviews**, 182, 204–232, 2018.
- Soares, C. J., Guedes, S., Hadler, J.C., Mertz-Kraus, R., Zack, T., Iunes, P.J. Novel calibration for LA-ICP-MS-based fission-track thermochronology. **Physics and Chemistry of Minerals**, 41, 65-73, 2014.
- Spikings, R. A.; Foster, D. A.; Kohn, B. P.; O’Sullivan, P. B. Late Neoproterozoic to Holocene thermal history of the Precambrian Georgetown Inlier, northeast Australia. **Australian Journal of Earth Sciences**, v. 48, p. 9–24, 2001.
- Spikings, R., Rietsma, M., Boekhout, F., Mišković, A., Ulianov, A., Chiaradia, M., Gerdes, A., Schaltegger, U. Characterisation of Triassic rifting in Peru and implications for the early disassembly of western Pangaea. **Gondwana Research**, 35, 124–143, 2016.
- Storey, B. C., Dalziel, I. W. D., Garrett, S. W., Grunow, A. M., Pankhurst, R. J., Vennum, W. R. West Antarctica in Gondwanaland: crustal blocks, reconstruction and breakup processes. **Tectonophysics** 155, 381–390, 1998.
- Tagami, T., Galbraith, R. F., Yamada, R., Laslett, G. M. Revised annealing kinetics of fission tracks in zircon and geological implications. In: P. Van den haute and F. De Corte, Editors, *Advances in Fission-Track Geochronology*, **Kluwer Academic Publishers**, Dordrecht, The Netherlands, 99–112, 1998.

Tagami, T.; O'Sullivan, P. B. Fundamentals of fission-track thermochronology. In: *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*. Chantilly: **Mineralogical Society of America**. v. 58, p. 19–47. DOI: <https://doi.org/10.2138/rmg.2005.58.2>, 2005.

Tagami, T; Matsu'ura, S. Thermal annealing characteristics of fission tracks in natural zircons of different ages. **Terra Nova**, v. 31, p. 257–262, 2019.

Tipler, Paul A.; Liewellyn, Ralph A. Física moderna. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.
Twenhofel, W. H. The frontiers of sedimentary mineralogy and petrology. **Journal of Sedimentary Petrography**, 11, 53-63, 1941.

Vaughan, A.P.M., Eagles, G. and Flowerdew, M.J. Evidence for a two-phase Palmer Land event from crosscutting structural relationships and emplacement timing of the Lassiter Coast Intrusive Suite, Antarctic Peninsula: implications for mid-Cretaceous Southern Ocean plate configuration. **Tectonics**, 31, 1–19, 2012.

Vermeesch, P. Dissimilarity measures in detrital geochronology. **Earth-Science Reviews**. 178. 10.1016/j.earscirev.2017.11.027, 2018.

Wagner, G. A. & Van Den Haute, P. Fission-track dating. **Kluwer Acad.**, Norwell, Mass., 6, 285, 1992.

Wellner, J. S., Anderson, J. B., Ehrmann, W., Weaver, F. M., Kirshner, A., Livsey, D., Simms, A. R. History of an evolving ice sheet as recorded in SHALDRIL cores from the northwestern Weddell Sea, Antarctica. In: Anderson, J.B. and Wellner, J.S. (eds) **Tectonic, Climatic, and Cryospheric Evolution of the Antarctic Peninsula**, 63, 131–152, 2011.

Williams I. S. U–Th–Pb geochronology by ion microprobe. In: McKibben MA, Shanks III WC and Rydley WI (Eds), *Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes*. Rev **Econ Geol** 7: 1–35, 1998.

Yamada R., Yoshioka T., Watanabe K., Tagami T., Nakamura H., Hashimoto T., Nishimura S. Comparison of experimental techniques to increase the number of measurable confined fission tracks in zircon. **Chemical Geology, Isotopic Geoscience Section**, 149, 99-107, 1998.