

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA



**MELISSA JOHNER** 

## EVOLUÇÃO GEOLÓGICA DA PALEODUNA SANTA OTÍLIA - URUGUAIANA, RS: INTEGRAÇÃO DE DADOS PETROGRÁFICOS, GEOQUÍMICOS E ISOTÓPICOS

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Cassiana Roberta Lizzoni Michelin

Supervisor: Prof. Dr. Léo Afraneo Hartmann

Porto Alegre, 2023

## UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

MELISSA JOHNER

## EVOLUÇÃO GEOLÓGICA DA PALEODUNA SANTA OTÍLIA - URUGUAIANA, RS: INTEGRAÇÃO DE DADOS PETROGRÁFICOS, GEOQUÍMICOS E ISOTÓPICOS

Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia, Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, apresentado na forma de monografia, junto à disciplina Projeto Temático em Geologia III, como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Cassiana Roberta Lizzoni Michelin

Supervisor: Prof. Dr. Léo Afraneo Hartmann

Porto Alegre, 2023

CIP - Catalogação na Publicação

```
Johner, Melissa
EVOLUÇÃO GEOLÓGICA DA PALEODUNA SANTA OTÍLIA -
URUGUAIANA, RS: INTEGRAÇÃO DE DADOS PETROGRÁFICOS,
GEOQUÍMICOS E ISOTÓPICOS / Melissa Johner. -- 2023.
70 f.
Orientadora: Cassiana Roberta Lizzoni Michelin.
Coorientador: Léo Afraneo Hartmann.
Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Geociências, Curso de Geologia, Porto Alegre,
BR-RS, 2023.
1. Paleoerg. 2. Derrame Catalán. 3. Silicificação.
4. Diques de arenito. I. Lizzoni Michelin, Cassiana
Roberta, orient. II. Hartmann, Léo Afraneo, coorient.
III. Título.
```

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

## MELISSA JOHNER

## EVOLUÇÃO GEOLÓGICA DA PALEODUNA SANTA OTÍLIA - URUGUAIANA, RS: INTEGRAÇÃO DE DADOS PETROGRÁFICOS, GEOQUÍMICOS E ISOTÓPICOS

A comissão examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso apresentado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte das exigências para a obtenção do título de Bacharel em Geologia.

Porto Alegre, 29 de março de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra. Lauren da Cunha Duarte (UFRGS)

Prof. Dra. Amanda Goulart Rodrigues (UFRGS)

Prof. Dr. Ezequiel Galvão de Souza (UNIPAMPA)

Aos meus pais Leandro e Luciani; Aos meus avós Clarice, Geda e João Olavo; Ao vô Valdir, bisavó Alice e tio Miguel (*in memorian*).

#### AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho a todos que, ao longo desses últimos 5 anos, me apoiaram e torceram pelo meu sucesso.

Agradeço a minha mãe Luciani e meu pai Leandro por todo amor e incentivo ao longo de toda minha vida, em especial, ao momento que estou vivendo agora. Obrigada por terem me possibilitado sair de Cruzeiro do Sul e morar sozinha em Porto Alegre para cursar o curso que eu escolhi, na Universidade que sempre sonhei em estudar.

Aos meus avós, Clarice e Valdir (*in memorian*), Geda e João por torcerem pelo meu sucesso. À família Johner e Henz obrigada pelo apoio.

A Deus, que me ampara nos momentos de angústia e ansiedade.

À minha orientadora e professora, Dra. Cassiana Roberta Lizzoni Michelin, por toda dedicação, apoio e incentivo durante a elaboração desta monografia. Agradeço imensamente pelo conhecimento compartilhado todas as vezes que nos reunimos na sua sala e nas saídas de campo. Ao Prof. Dr. Léo Afraneo Hartmann pela bolsa de iniciação científica, conhecimento compartilhado e pelo entusiasmo em fazer pesquisa.

A todas as amigas e amigos de graduação, principalmente a /18. Um agradecimento especial aos amigos Leonardo, Stephanie, Juliana e Ingrid por estarem comigo durante a graduação. Ao João Vitor pela ajuda com o Abstract; e as gurias da Faixa 2: Stephanie, Andressa e Alana.

Agradeço aos professores do Mapeamento Básico, em especial, aos professores Carla Porcher, Éverton Bongiolo e Edinei Koester. Aproveito para agradecer também as Profs. Amanda Rodrigues e Lauren Duarte pelo conhecimento, disposição em ensinar, e ao Prof. De Ros pelo uso do microscópio para descrição e fotomicrografias.

Aos amigos que a geologia me trouxe, Marcos Bicca e Cristiane Bahi dos Santos por ter me apresentado a Fronteira Oeste do RS. Ao Profs. Viter Pinto e Felipe Padilha Leitzke pela ajuda em campo e nas análises isotópicas.

Aos técnicos e funcionários do IGEO, representados aqui, pela Denise Moreira Canarim, Daniel Triboli Vieira e Lucas Bonan Gomes. Ao Jarson pelo cuidado e empenho com toda a frota de carros que sempre nos leva em segurança aos trabalhos de campo.

À UFRGS, uma universidade pública, gratuita e de qualidade, por contribuir com a minha formação acadêmica. Ao CNPq pela bolsa de iniciação científica.

No final, sempre vale a pena! Muito obrigada, Geologia!

#### RESUMO

Nos últimos anos, os estudos na região da Fronteira Oeste do Estado do Rio Grande do Sul têm revelado o potencial econômico da região que abriga promissores depósitos de ágata e ametista. Nesse sentido, vê-se a necessidade de ampliar a integração de dados petrográficos, geoquímicos e isotópicos. A área de estudo é a Paleoduna Santa Otília que está localizada no município de Uruguaiana (RS), inserida na Bacia do Paraná, onde ocorrem arenitos da Formação Botucatu e rochas vulcânicas do Grupo Serra Geral. O objetivo deste trabalho é caracterizar a paleoduna afim de aprimorar o entendimento das relações de contato entre as rochas vulcânicas e sedimentares além de compreender a distribuição da silicificação na paleoduna e relação com processos hidrotermais que afetaram a área. Para o desenvolvimento desse estudo foram realizados trabalho de campo, análises petrográficas, geoquímicas e isotópicas U-Pb, além do estudo de proveniência sedimentar. O trabalho de campo permitiu identificar feições de interação entre lava e sedimentos, estabelecer aorientação preferencial do fraturamento para NW, e, subordinadamente, NE. Em análise petrográfica foi possível diferencia duas petrofácies no arenito, de acordo como grau de silicificação. As análises guímicas permitiram classificar a rocha vulcânica como um andesito basáltico. A idade U-Pb em zircão desta rocha é de 137.3 ± 7,6 Ma.A partir de análises de proveniência obtidas em zircões detríticos conclui-se que os arenitos têm idades coerentes com Paleoproterozoicas ao Ordoviano Superior demonstrando as múltiplas fontes dos sedimentos. Conclui-se que o Derrame Catalán recobriu dunas ativas do paleoerg Botucatu, gerando confinamento dos arenitos, o que fez com que a água contida no aquífero atingisse pressão de fluidos e ascendesse entre os sedimentos do paleoerg, promovendo a silicificação heterogênea dos arenitos, formação de bowls nos arenitos e injeções de areia nas rochas vulcânicas. Os resultados obtidos neste trabalho auxiliam no entendimento dos processos geológicos que ocorrem na paleoduna Santa Otília.

Palavras-Chave: paleoerg; derrame Catalán; silicificação, diques de arenito.

#### ABSTRACT

In the last few years, studies in the western Rio Grande do Sul State have revealed the economic potential of the region, which is home to promise agate and amethyst deposits. In this case, there is a need to expand the integration of petrographic, geochemical and isotopic datas. The study area is the Santa Otília Paleodune, which is located in the municipality of Uruguaiana (RS), inserted in Paraná Basin, where sandstone of Botucatu Formation and volcanic rocks of Serra Geral Group occurs. The object of this work is to characterize the paleodune in order to improve the understanding about the contact relations between the volcanic and sedimentary rocks, in addition to understand the silicification distribution in the paleodune and the relation with hydrothermal processes that affected the area. For the development of this study, field work, petrographic, geochemical and U-Pb isotopic analyzes were carried out in addition to the study of sedimentary provenance. The field work allowed identifying features of interaction between lava and sediments, establishing the preferential orientation of fracturing towards NW and subordinately NE. In petrographic analysis it was possible to differentiate types of sandstones, according to the degree of silicification. Chemical analyzes allowed classifying the volcanic rocks as a basaltic andesite. The zircon U-Pb age of this rock is  $37.3 \pm 7.6$  My. Based on provenance analyzes obtained from detrital zircons, it is concluded that the sandstones have ages consistent with the Paleoproterozoic to the Upper Ordovician, demonstrating the multiple sources of the sediments. It is concluded that the Catalán Flow covered active dunes of the Botucatu paleoerg, generating confinement of the sandstones, which made the water contained in the aquifer reach fluid pressure and ascend between the sediments of the paleoerg, promoting the heterogeneous silicification, bowls formation in the sandstones and sand injections in volcanic rocks. The results obtained in this work help to understand the geological processes that occur in the Santa Otília paleodune.

Keywords: paleoerg; Catalán Flow; silicification; sandstones dykes.

#### LISTA DE FIGURAS

FIGURA 13: ESTEREOGRAMA DAS FRATURAS MEDIDAS NO ARENITO DA PALEODUNA ....... 40

**FIGURA 14**: FOTOMICROGRAFIA DA PETROFÁCIES 1. A) VISÃO GERAL DA LÂMINA EVIDENCIANDO A ORIENTAÇÃO SUB-PARALELA DOS GRÃOS (XP- POLARIZADORES CRUZADOS). B) DETALHE DO PROCESSO DIAGENÉTICO DEMOSTRADO PELO CRESCIMENTO DE FRANJAS DE CALCEDÔNIA (XP-POLARIZADORES CRUZADOS). C) GRAU DE EMPACOTAMENTO FROUXO E LITOCLASTOS VULCÂNICOS E GRANÍTICOS (//P-POLARIZADORES DESCRUZADOS). D) POROSIDADE INTERGRANULAR E ÓXIDO DE FERRO (//P- POLARIZADORES DESCRUZADOS). E E F) DETALHE DO PROCESSO DIAGENÉTICO DE CRESCIMENTO DE OPALA E ÓXIDO DE FERRO (//P- POLARIZADORES DESCRUZADOS)........42

**FIGURA 22:** DIAGRAMA ELEMENTOS TERRAS RARAS (ETR) OBTIDO A PARTIR DA NORMATIZAÇÃO PELO CONDRITO DE AMOSTRAS DO BASALTO ANDESÍTICO CATALÁN ...... 53

**FIGURA 25:** MODELO ESQUEMÁTICO EVOLUTIVO DA PALEODUNA SANTA OTÍLIA. A) ESTÁGIO INICIAL DA PALEODUNA SANTA OTÍLIA, FORMADA POR ARENITOS COMPOSTOS POR SEDIMENTOS DE DIFERENTES IDADES. B) O DERRAME CATALÁN RECOBRE A REGIÃO DA PALEODUNA SANTA OTÍLIA TORNANDO INATIVAS AS DUNAS DO PALEOERG BOTUCATU. C) O DERRAME CATALÁN ATUA COMO UM SELO IMPEDINDO QUE ÁGUA ATINGE A PALEOSUPERFÍCIE. D) A PERCOLAÇÃO DE FLUIDOS HIDROTERMAIS OCORRE NO INTERNAMENTE NO ARENITO. ESSA PERCOLAÇÃO É RESPONSÁVEL PELA HETEROGENEIDADE DA SILICIFICAÇÃO DA PALEODUNA SANTA OTÍLIA. NESSE ESTÁGIO, OCORRE A PRECIPITAÇÃO DA CALCEDÔNIA E DA OPALA, E DO SOBRECRESCIMENTO DE 

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1: ANÁLISE QUANTITATIVA DE ELEMENTOS MAIORES EM PORCENTAGEM (%)	DA
ROCHA VULCÂNICA AFLORANTE NO ENTORNO DA PALEODUNA SANTA OTÍLIA	. 48
TABELA 2: ANÁLISE QUANTITATIVA DE ELEMENTOS MENORES (EM PPM) DAS ROCHAS VULCÂNICAS AFLORANTES NO ENTORNO DA PALEODUNA SANTA OTÍLIA	. 49

## LISTA DE ABREVIATURAS

- BSE Elétrons Retroespalhados
- CPGq Centro de Estudos em Petrologia e Geoquímica
- DEMIPE Departamento de Mineralogia e Petrologia
- DRX Difração de Raios X
- EDS "Energy Dispersive Spectrometry" Espectrometria por Energia em Dispersão
- ETR Elementos Terras Raras
- FRX Fluorescência de Raios X
- ICP MS Espectrometria de Massa por Plasma Indutivamente Acoplado
- ICP OES Espectrometria de Emissão Ótica com Plasma Indutivamente Acoplado
- IGEO Instituto de Geociências
- LOI "Loss on Ignition" Perda ao Fogo
- LGI Laboratório de Geologia Isotópica
- MEV Microscopia Eletrônica de Varredura
- ppm Partes por Milhão
- UFOP Universidade Federal de Ouro Preto
- UFRGS Universidade Federal do Rio Grande do Sul
- XP Polarizadores cruzados
- //P Polarizadores descruzados

1.	INTRODUÇÃO	15
	1.1 Localização e vias de acesso	. 15
2.	OBJETIVOS	. 17
	2.1 Objetivo Geral	. 17
	2.2 Objetivos Específicos	. 17
3.	JUSTIFICATIVA	. 18
4	ESTADO DA ARTE	19
	4.1 Contexto Geológico.	. 19
	4 1 1 Bacia do Paraná	19
	4 1 1 1 Formação Botucatu	22
	4 1 1 2 Grupo Serra Geral	23
	4.2 Silicificação: processos e fatores condicionantes	24
5.	MÉTODOS	. 25
	5.1 ETAPA PRÈ – CAMPO	. 25
	5.1.1 Revisão Bibliográfica	25
	5.1.2 Análise de imagens de satélite	26
	5.2 ETAPA DE CAMPO	. 26
	5.3 ETAPA PÓS-CAMPO	. 27
	5.3.1 Seleção e Preparação das amostras	27
	5.3.1.1 Separação de mineral de zircão	27
	5.3.2 Petrografia	. 29
	5.3.3 Difração de Raios X	29
	5.3.4 Geoquímica de rocha total	30
	5.3.4.1 Fluorescência de Raio X	. 30
	5.3.5 Ablação a Laser por Espectrometria de Massa com Plasma Indutivamente Acopla	do
		30
	5.3.5.1 Isotopos radiogenicos U-Pb	. 31
6.	RESULTADOS	33
	6.1 Trabalho de campo	33
	6.1.1 Análise Estrutural	. 39
	6.2 Petrografia	40
	6.2.1 Arenitos	40
	6.2.1.1 Petrofácies 1	40
	6.2.1.1.2 Petrofácies 2	42
	6.2.2 Rocha vulcânica	44
	6.2.2.1 Derrame Catalán	44
	6.3 Difração de Raios X	45

# SUMÁRIO

	6.4 Análises químicas	. 47
	6.4.1 Análises químicas de rocha total	. 47
	6.5 Datação U-Pb	. 53
	6.6 Proveniência U-Pb	54
7. D	DISCUSSÃO	. 56
8. C	CONCLUSÕES	. 61
R	EFERÊNCIAS	. 62
A١	NEXO	. 67
AN téo	NEXO A – Planilha com as informações dos pontos, coordenada, cotas altimétricas, amostras con cnica aplicada.	e . 67

## 1. INTRODUÇÃO

O recente interesse e o desenvolvimento de estudos realizados na região da Fronteira Oeste do Brasil no Rio Grande do Sul mostram o potencial econômico da região (Bergmann et al., 2020; Hartmann et al.,2021). Esta região é conhecida pelos garimpos de ágata anteriormente descritos por Augustin (2004). Duarte et al.,(2009) relacionam derrames mineralizados a ágata e ametista no Uruguai com ocorrências nas proximidades de Quaraí e Santana do Livramento. Para alguns autores, como Heemann (1997, 2005) e Michelin (2014), as feições de interação entre lavas e sedimentos têm relação com as mineralizações de minerais silicosos. Nesse sentido, com base em imagens de satélite e trabalhos de campo foram selecionadas paleodunas que estão em contato com derrames vulcânicos do Grupo Serra Geral. Para este estudo, a Paleoduna Santa Otília foi selecionada, com objetivo de estabelecer relações entre as rochas vulcânicas, do Grupo Serra Geral e rochas sedimentares da Formação Botucatu afim de aprimorar o entendimento da gênese e evolução dos processos geoquímicos e hidrotermais que atuaram na região estudada.

Algumas paleodunas da Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul veem sendo estudadas por Hartmann et al.,(2022) como feições geomorfológicas formadas por arenitos da Formação Botucatu. Esses locais foram recobertos pelos derrames vulcânicos do Grupo Serra Geral.

#### 1.1 Localização e vias de acesso

A Paleoduna Santa Otília está localizada na porção Oeste do Estado do Rio Grande do Sul, no município de Uruguaiana, distante, aproximadamente, 600 km de Porto Alegre.

O acesso à paleoduna é feito a partir da BR-290, com acesso no km 701. Como ponto de referência, utiliza-se as antigas construções jesuíticas, marcando a estrada vicinal que deve ser percorrida. Cerca de 3 km da BR-290, a oeste, usa-se como ponto de referência uma pedreira abandonada. Percorre-se aproximadamente 11 km após a pedreira, até chegar na propriedade da família Midon Claus. A paleoduna está orientada NW-SE, em relação a BR-290 e pode ser distinguida, conforme imagens Google Earth® (Figura 1).



Figura 1: Mapa de localização da área de estudo, no município de Uruguaiana. Extraído de Google Earth®.

Coordenadas Geográficas da Estância Santa Otília, localizada no centro da paleoduna (29°48'09"S; 56°51'09"O).

## 2. OBJETIVOS

## 2.1. Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho foi caracterizar a geologia, a geoquímica, geocronologia e proveniência sedimentar da paleoduna Santa Otília, bem como a relação estratigráfica que esta tem com a rocha vulcânica, para melhor compreender o contexto e a evolução geológica do paleoerg e da província vulcânica, região de Uruguaiana, fronteira oeste do Rio Grande do Sul.

## 2.2. Objetivos Específicos

a) Estabelecer as relações de contato entre as rochas sedimentares e vulcânicas que afloram na região;

b) Analisar estrutural a partir de dados estereograma das estruturas que representam a evolução estrutural da paleoduna Santa Otília;

c) Caracterizar petrograficamente os arenitos e rochas vulcânicas que afloram na região em estudo;

d) Determinar a composição química da rocha vulcânica;

e) Obter idade da rocha vulcânica que aflora na região;

f) Obter idades dos zircões detríticos do arenito para fins de proveniência.

## 3. JUSTIFICATIVA

Essa pesquisa pretende contribuir por meio do entendimento da evolução geológica da Paleoduna Santa Otília, com o avanço na compreensão da geologia da Fronteira Oeste do Rio Grande de Sul. Os dados e resultados gerados por meio desta monografia, pretendem auxiliar no avanço do conhecimento científico da região de Uruguaiana, bem como fornecer ao poder público informações relevantes sobre a geologia do município.

Recentemente, a fronteira oeste tem despertado o interesse para estudos e valorização na busca por recursos minerais. Bergmann et al., (2020) propuseram um modelo prospectivo para ametista e ágata na fronteira sudoeste do Rio Grande do Sul. Com este trabalho, o potencial econômico da mineração para a região ganhou destaque e necessita de evolução no conhecimento científico. Sendo assim, a monografia visa produzir informações que contribuam para o aprofundamento do conhecimento geológico na prospecção de ágata e ametista da região.

A monografia auxiliará na compreensão da geologia regional e ocupação humana, tendo em vista a importância que as rochas da região da paleoduna Santa Otília tiveram na construção da Estância de Yapeyú, redução jesuítica criada no século XVII, na região que hoje engloba parte do Brasil, Uruguai e Argentina (Rogge, 2020). Nesse sentido, o estudo da paleoduna Santa Otília e o uso da rocha para construção, pode contribuir com futuras pesquisas no entendimento das relações sociais e espaciais que ocorreram nesta região entre os índios Guaranis e os padres jesuítas.

## 4. ESTADO DA ARTE

#### 4.1 Contexto Geológico

A região de Uruguaiana, está localizada na porção oeste do estado do Rio Grande do Sul, inserindo na porção sul da Bacia do Paraná. Nessa região afloram rochas vulcânicas pertencentes ao Grupo Serra Geral e rochas sedimentares da Formação Botucatu. A figura 2 contempla o mapa geológico simplificado do Estado.



Figura 2: Mapa geológico da Bacia do Paraná no Estado do Rio Grande do Sul. Modificado de Hartmann & Duarte (2020).

## 4.1.1 Bacia do Paraná

A Bacia do Paraná é um amplo conjunto sedimentar do continente Sulamericano que inclui porções do Brasil, Paraguai, Argentina e Uruguai, totalizando uma área que se aproxima de 1,5 milhão de quilômetros quadrados (Milani, 2007). Possui formato levemente oval e o eixo principal segundo a direção N-S (Milani, 1997).

Milani (1997), reconheceu seis unidades aloestratigráficas ou supersequências, conforme figura 3: Rio Ivaí (Neo-Ordoviciano ao Eo-Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (Neo-Carbonífero ao Eo-Triássico), Gondwana II (Meso-Triássico ao Neo-Triássico), Gondwana III (Neo-Jurássico ao Eo-Cretáceo) e Bauru (Eo-Cretáceo

ao Neocretáceo). Três delas correspondem a ciclos transgressivos-regressivos paleozóicos, e as demais são pacotes sedimentares continentais mesozóicos com rochas ígneas associadas (Milani e Ramos, 1998).



Figura 3: Mapa com a localização simplificada da Bacia do Paraná, contendo as supersequências e a profundidade do embasamento (Milani, 2006).

A supersequência Gondwana III compreende o Grupo Serra Geral e a Formação Botucatu (Milani, 2006) conforme Figura 4, essas fundamentais para o estudo e entendimento deste projeto. A área delimitada em vermelho na Figura 4 representa a supersequência Gondwana III.



Figura 4: Coluna cronoestratigráfica proposta para a Bacia do Paraná destacando as formações Botucatu e Grupo Serra Geral (Supersequência Gondwana III indicada pelo quadro em vermelho), unidades de interesse neste trabalho. (Milani, 2007).

#### 4.1.1.1 Formação Botucatu

A Formação Botucatu é uma unidade de arenito eólico que aflora ao longo da margem da Bacia do Paraná, incluindo áreas no Brasil, Uruguai e Argentina (Scherer, 2000). É composta por depósitos predominantemente eólicos, representados por conjuntos de estratos cruzados em grande escala (1-30m) interpretados como depósitos de dunas eólicas (Almeida, 1953; Bigarella & Salamuni, 1961; Scherer, 2002). A Formação Botucatu foi formada pela acumulação de dunas crescentes, simples e compostas, associadas a dunas lineares complexas. Essa acumulação é caracterizada como um sistema eólico hiper-seco, sem a presença de interdunas. (Scherer, 2000).

Este sistema eólico é composto por arenitos quartzosos rosados, granulometria fina a média, grãos arredondados de aspecto fosco. Na base, observam-se conglomerados e arenitos conglomeráticos depositados por inundações em lençóis e arenitos grossos a muito grossos interpretados como lençóis de areia eólicos (Bigarella & Salamuni, 1961; Soares, 1975; Almeida & Melo, 1981; Scherer, 2002).

Estudo de proveniência sedimentar em zircão detrítico, pelo método U-Pb, têm demonstrado a contribuição de zircões de diversas áreas fontes e idades (Bertolini et al., 2020; 2021). O autor identifica as principais idades de zircão detrítico do Cambriano ao Neoproterozóico, e com contribuição secundária zircões do período Orosiriano ao Riaciano, e do Toniano ao Steniano.

Recentemente, Hartmann & Cerva-Alves (2021) descreveram a região da Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul, entre elas, a região de Uruguaiana, como estruturas de blocos de falhas. Esse movimento, associado a erosão, expôs dunas do Cretáceo intensamente fraturadas e silicificadas por atividade hidrotermal do Aquífero Guarani. Essa ação hidrotermal está evidenciada pela presença de *bowls* (estruturas na forma de tigelas) no topo das paleodunas preservadas devido à intensa silicificação (Hartmann et al, 2022).

#### 4.1.1.2 Grupo Serra Geral

A província vulcânica Paraná abrange uma área no sul do Brasil, Uruguai, Paraguai e Argentina. Frank et al (2009) propuseram que a Formação Serra Geral tenha uma área de 917.000 km<sup>2</sup>, com cerca de 500.000 km<sup>2</sup> de rocha vulcânica aflorante. O volume estimado das rochas da Formação Serra Geral é de pelo menos 600.000 km<sup>3</sup>.

A Formação Serra Geral é composta, principalmente, por basaltos toleíticos (cerca de 90% do volume), 7% de andesitos de afinidade toleítica e 3% de riodacitos, segundo Piccirillo & Melfi (1988). Rossetti et al (2018) propuseram, baseado na estratigrafia das rochas vulcânicas, que a então chamada Formação Serra Geral fosse renomeada para Grupo Serra Geral.

Peate et al., (1992) divide, geoquimicamente, a pilha de lava dos derrames vulcânicos da Bacia do Paraná. Essa divisão é definida por dois grupos químicos distintos. Os dois grupos são dividido em "Baixo Ti" e "Alto Ti". O grupo do "Baixo Ti" é subdividido em série Gramado e Esmeralda, e o grupo do "Baixo Ti" é separado em Pitinga, Paranapanema e Ribeira. Na porção sul da bacia predominam o grupo "Baixo Ti". Essas divisões têm como objetivo separar os processos de fonte e formação dos magmas (Peate et al., 1992; Peate & Hawkesworth, 1996).

Pinto et al., (2011) datou zircões pelo Método U-Pb, e indicaram idade do magmatismo do Grupo Serra Geral em 135,6  $\pm$ 1,8 a 134,4 Ma $\pm$ 1,1 Ma. Buckmann (2015) indica que o vulcanismo tenha idade de 135 a 119 Ma, com pico de atividade entre 135 a 131 Ma. Gomes e Vasconcellos (2021) fizeram um detalhe estudo de revisão de idades para o Grupo Serra Geral, indicando a idade de 134  $\pm$ 0,1Ma.

A Fronteira Oeste, englobando o município de Uruguaiana, está mapeada como parte integrante do Grupo Serra Geral (Hartmann et al., 2010). Estratigraficamente, as rochas vulcânicas presentes na região de Uruguaiana fazem parte da Formação Alegrete, do Grupo Serra Geral (Hartmann et al, 2010; Bergmann et al., 2020). Segundo Hartmann et al., (2010), a Formação Alegrete, Cretáceo Inferior, apresenta os seguintes derrames: Mata Olho (basalto), Catalán (andesito), Cordillera (andesito basáltico), Muralha (andesito basáltico), UR-13 (andesito basáltico) e Coxilha (andesito basáltico). O derrame Mata Olho é o mais basal e está sobre a Formação Botucatu. Paleodunas descritas na Fronteira Oeste (Hartmann & Cerva-Alves, 2021) estão cobertas, parcialmente cobertas ou circundadas pelos derrames vulcânicos Mata Olho, Catalán e Cordillera.

#### 4.2 Silicificação: processos e fatores condicionantes

Silicificação é um processo diagenético ou hidrotermal de cimentação derochas siliciclásticas. Paraguassu (1972) afirma que a silicificação é um processo rápido que acontece quando soluções aquosas ricas em sílica percolam por meio de poros de arenitos inconsolidados. Araújo (1992) afirma que arenitos silicificados, têm origem sedimentar, principalmente formados por quartzo, podendo conter mineralogia acessória, dependendo das condições ambientais e da área-fonte em que foi formado. Critérios como a consistência e a mudança na coloração das diversas formas de silicificação são função do grau de preenchimento dos vazios ou pela substituição de grãos por diversas fases de cimento silicoso (Silva & Menegotto, 2002).

Gesicki (2007) mostra que os principais componentes diagenéticos da Formação Botucatu são cutículas argilo-ferruginosas, esmectita neoformada incipiente, cimentos de quartzo e feldspato e, localmente, cimento de opala, calcedônia e calcita. A silicificação dos arenitos da Formação Botucatu é aparentemente pós compactacional tendo em vista as relações de contato intergranulares do arcabouço, com predomínio do tipo planar e presença rara do tipo côncavo-convexo.

Michelin (2014) sugere que a diferença de concentração de sílica gera alternância dos polimorfos de sílica. Nesse sentido, o primeiro polimorfo a se formar é a opala. Com a queda na taxa de sílica na solução percolante, a próxima fase a depositar é a calcedônia. A presença de derrame vulcânico quando associada a interação de lava e sedimento são fatores importantes para a disponibilidade de sílica no ambiente.

## 5. MÉTODOS

Os métodos empregados para o desenvolvimento deste trabalho foram selecionados com o intuito de entender a área de estudos em diversas escalas de trabalho possibilitando a compreensão dos processos magmáticos, hidrotermais e geoquímicos que afetarem a paleoduna Santa Otília, Uruguaiana, Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul. A aplicação destas técnicas permitiu analisar regionalmente, com a análise de imagens de satélite, e microscopicamente, com petrografia, análise geoquímica e geocronologia com a datação de zircões para interpretação do derrame vulcânico que recobre a área estudada.

Para os arenitos, rocha sedimentar que compõe a paleoduna Santa Otília, a aplicação de técnicas como petrografia e difração de raios-X permitiram a caracterização petrográfica, uma análise e descrição dos aspectos diagenéticos. A análise da proveniência sedimentar foi empregada para auxiliar no entendimento dos períodos de formação da paleoduna.

Este capítulo apresenta uma descrição detalhada da metodologia utilizada durante a pesquisa.

## 5.1. ETAPA PRÉ – CAMPO

#### 5.1.1. Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica consistiu na revisão de artigos científicos e mapas publicados anteriormente na área de estudo e na Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul, correlatos ao tema. Essa revisão bibliográfica teve como objetivo o fornecimento de conhecimento teórico sobre a geologia regional, metodologia e técnicas já utilizadas na região, além de fornecer informações fundamentais para o entendimento e planejamento da etapa de campo.

A leitura de artigos científicos já publicados na região da Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul, baseados nos estudos de rochas vulcânicas e os derrames presentes no local foram fundamentais para identificar a distribuição espacial destes derrames nos municípios da fronteira e na identificação de características com os derrames no Uruguai. Essa pesquisa embasou o entendimento dos derrames que poderiam ocorrer na área, bem como sua distribuição estratigráfica. É preciso salientar que a literatura referente às rochas sedimentares e vulcânicas para a área estudada é escassa.

#### 5.1.2. Análise de imagens de satélite

Nesta etapa de trabalho foram obtidas imagens de satélite utilizando o software *Google Earth*®, para entender a área de estudos e a superfície do terreno, bem como a escolha de pontos de acesso aos principais afloramentos e dificuldades. A partir disso, foram selecionados os melhores pontos de acesso para a escolha das áreas aflorantes que foram descritas e amostradas.

## 5.2. ETAPA DE CAMPO

O trabalho de campo teve como objetivo avaliar a paleoduna Santa Otília e os derrames vulcânicos presentes na área. Além de mapear a área de estudo, reconhecer as litologias aflorantes, medir estruturas, identificar contatos e texturas, e coletar amostras para confecção de lâminas e realização de análises químicas e isotópicas. As amostras coletadas representam as litologias descritas na região, levando em consideração o grau de silicificação nas rochas sedimentares e grau de alteração e contato com as rochas vulcânicas.

A atividade principal de campo foi realizada entre os dias 2 a 5 de julho de 2022, sendo realizadas outras duas, em dezembro de 2021 e julho de 2022 financiadas pelo Projeto de Pesquisa "*Solução de problemas na metalogenia e evolução crustal da Fronteira Oeste do Brasil no Rio Grande do Sul*". Durante os dias de campo, foram descritos 22 pontos, e coletadas 39 amostras de rochas na área de estudo. Destas amostras coletadas foram separadas 25 amostras para confecção de lâminas petrográficas, 9 amostras de rochas vulcânicas para análise química, e dentre estas 1 amostra para datação geocronológica pelo método U-Pb e 1 amostra de arenito para para proveniência sedimentar pelo método U-Pb. A atividade de campo contou com a utilização de utensílios básicos de campo, com utilização de GPS/GNSSS portátil, da marca Garmin. Também foi utilizado celular Iphone, com aplicativo FieldMove Clino,

seguindo as recomendações de Allmendinger et al., (2017), para realização de medidas de estruturas.

## 5.3. ETAPA PÓS-CAMPO

#### 5.3.1. Seleção e Preparação das amostras

As amostras coletadas foram descritas macroscopicamente, buscando as amostras mais representativas, quanto à mineralogia, estrutura e textura. Estas amostras foram fotografadas e serradas. Dentre as amostras coletadas, foram escolhidas 25 amostras de rochas vulcânicas e sedimentares mais representativas da área de estudo para confecção de lâminas.

As lâminas petrográficas permitiram um estudo detalhado de petrografia. As lâminas de rocha sedimentar foram impregnadas com corante azul que permitiu a análise e descrição de cimentação e porosidade.

Para a geocronologia da rocha vulcânica escolhida foi realizada a separação de mineral pesado portador de urânio, no caso, o mineral escolhido foi o zircão (ZrSiO<sub>4</sub>).

5.3.1.1 Separação de mineral de zircão

O processo de separação mineral do zircão foi realizado no Laboratório de Preparação de Amostras, no Instituto de Geociências da UFRGS. Selecionou-se um volume de rocha vulcânica andesítica para a separação mineral, sendo importante salientar que devido à baixa quantidade de zircões nesse tipo de rocha, foi preciso processar cerca de 20 kg de rocha. Essa rocha foi escolhida baseada na ampla distribuição espacial que a rocha tem na área de estudo, sendo o principal derrame encontrado em contato com a rocha sedimentar. Após escolhida a amostra para separação de zircão, foi fragmentada para posteriormente ser processada pelo britador (Figura 5A). As amostras foram britadas em duas etapas até serobtido o tamanho de grão de brita fina (2 a 4mm), após a amostra foi processada no moinho de discos (Figura 5C) em que foi obtido um diâmetro de grão equivalente ao tamanho silte. Para finalizar, esse volume foi peneirado e selecionado as partículas menores que 250µm.

Na sequência, esse material já peneirado, foi bateado e lavado. O concentrado obtido, permaneceu por 24 horas no forno de secagem. Após seco, este concentrado foi separado pelo Separador Isodinâmico de Frantz (Figura 5D). Esse procedimento teve como objetivo fazer a separação de minerais densos e não magnéticos dos minerais magnéticos e mais densos, para isso, foram aplicadas diferentes intensidade de amperagens.



Figura 5: Fotografia dos processos e equipamentos utilizados no preparo da amostra. A) Britador de mandíbulas utilizado para fragmentar a amostra. B) Peneiras de diferentes granulometrias empregadas para separação mineral. C) Amostra de rocha vulcânica sendo colocada no moinho de disco. D) Separador Isodinâmico de Frantz utilizado para separação de minerais magnéticos e não-magnéticos.

Com o volume de concentrado separado, foi realizada a separação manual dos zircões. Essa separação foi feita com auxílio de uma lupa binocular. A preparação da *mount* foi realizada em diversas etapas, entre elas: fixação dos zircões em uma fita adesiva dupla face para que os grãos possam ser alinhados e organizados sem prejuízo no polimento. Após o alinhamento, ocorreu aplicação de resina para formação da *mount*. Com a secagem da resina, foi realizado o polimento final na *mount*.

#### 5.3.2. Petrografia

A petrografia permitiu identificar a mineralogia, as texturas e as relações entre os minerais. A descrição microscópica, feita por meio do microscópio ótico e com uso de luz transmitida, possibilitou reconhecer minerais que estavam em pequenas e grandes quantidades, identificação de texturas características presentes nas rochas estudadas.

As lâminas petrográficas delgadas foram confeccionadas com 30 µm de espessura pela empresa Petrografia Br e outras no Laboratório de Preparação de Amostras, no Instituto de Geociências da UFRGS. As lâminas petrográficas foram confeccionadas de acordo com a metodologia usual. As amostras de rochas sedimentares foram impregnadas com resina de cor azul visando facilitar a identificação da porosidade (Dickson, 1965).

A descrição petrográfica foi no Laboratório de Microscopia do Departamento de Mineralogia e Petrologia (DEMIPE), Instituto de Geociências da UFRGS. Foram descritas 25 lâminas, e observados aspectos petrográficos, de contato entre grãos e texturas.

#### 5.3.3 Difração de Raios X

A difração de raios X é uma técnica que permite determinar a composição mineralógica de uma amostra. A técnica consiste na emissão de raios X na estrutura cristalina de um mineral, e na leitura de um comportamento específico de acordo com a distância dos átomos.

A difração de raios X, foi realizada em 3 (três) amostras, permitindo a identificação das diferentes fases diagenéticas nos arenitos. Estas análises foram realizadas após a descrição petrográfica, a fim desanar as dúvidas referentes aos argilominerais e diferentes variedades silicosas que ocorrem como cimento nos arenitos.

As amostras de rocha analisadas com o método de DRX (Rocha total e fração fina), foram analisadas no Laboratório de Difratometria de Raios X (LDRX), do Instituto de Geociências-UFRGS.

#### 5.3.4. Geoquímica de rocha total

A análise de geoquímica de rocha total teve como objetivo quantificar os elementos maiores e traços constituintes das rochas. Foram selecionadas nove amostras de rocha vulcânica para serem analisadas pela empresa Actlabs, no Canadá. As amostras foram serradas, para que fossem enviados para análise blocos com aproximadamente 10 cm. As análises de elementos maiores (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, MgO, CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub> e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), com limites de detecção de 0,01% e 0,001%; e elementos traços (Ba, Sr, Y, Zr, Be, V, Ag, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, Bi, S, Au, As, Br, Co, Ce, Cr, Cs, Hf, Hg, Ir, Mo, Rb, Sb, Sc, Se, Ta, Th, U e W), com limite de análise em ppm (partes por milhão) pelos métodos de Fluorescência de Raios-X e ICP-MS. O procedimento foi o padrão para este tipo de análise conforme descrito por Denalle (2013).

Este tipo de análise permitiu detectar e quantificar baixos níveis dos elementos químicos contidos na amostra. Os dados gerados foram processados utilizando as facilidades de planilhas do MicrosoftExcel®, e os diagramas confeccionados no software CorelDraw®.

5.3.4.1. Fluorescência de Raio X

A fluorescência de raios X (FRX) é uma técnica não-destrutiva que permite identificar os elementos químicos (Z>10) presentes em uma amostra de rocha (análise quantitativa), bem como, estabelecer de elementos maiores e traços.

Os limites de detecção da fluorescência de raios-x geralmente são da ordem de <1% para elementos maiores e <5 ppm (parte por milhão) para elementos traços. A análise de elementos usando a técnica de fluorescência consiste em bombardear as amostras com raios X e medir as linhas de emissão de raios X geradas (Nascimento-Dias et al., 2017). Para a realização da análise é necessário 10g de rocha em pó a 200 mesh (74µm).

5.3.5 Ablação a Laser por Espectrometria de Massa com Plasma Indutivamente Acoplado (LA-ICP-MS)

O método de espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS) permite detectar mais de 70 elementos químicos presentes em baixas concentrações, incluindo a determinação de elementos traços. O método é considerado excelente, em termos de precisão, custo e rapidez na determinação da

razão isotópica. O LA-ICP-MS utiliza um feixe de laser com diâmetro de massa por ionização da superfície do zircão (Jackson et al, 2004).

Neste trabalho, esse método foi utilizado na obtenção de isótopos radiogênicos de U-Pb de rocha vulcânica para a determinação de idade U-Pb em zircão. As análises foram realizadas em zircões de uma amostra de basalto andesítico, do vulcanismo do Grupo Serra Geral. As análises ocorreram no Laboratório de Geologia Isotópica (Departamento de Geologia - DEGEO), da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

#### 5.3.5.1 Isótopos radiogênicos U-Pb

O sistema isotópico U-Pb baseia-se no decaimento radioativo dos isótopos <sup>235</sup>U  $\rightarrow$  <sup>207</sup>Pb e <sup>238</sup>U  $\rightarrow$  <sup>206</sup>Pb que são isótopos estáveis, possuindo valores de meia-vida de 0,704 Ga e de 4,47 Ga, respectivamente. A projeção das razões obtidas para os dois cronômetros <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U e <sup>207</sup>Pb/<sup>235</sup>U foram a curva concórdia. Nesta curva são plotados os resultados de mesma idade, ou seja, dados concordantes. No entanto, nem sempre as idades obtidas são concordantes e nestes casos, os pontos analíticos estão alinhados numa reta chamada discórdia. A reta intercepta a curva da concórdia em dois pontos. A idade obtida pelo intercepto superior da reta discórdia com a curva concórdia pode representar a idade da cristalização dos cristais de zircão. Para o intercepto inferior existem interpretações que relacionam o valor obtido a uma perda de Pb episódica ou contínua. Se a perda estiver relacionada a um episódio tectônico, a idade obtida para o intercepto inferior pode ser associada ao mesmo e, portanto, ter significado geológico. Em casos em que a perda de Pb ocorre de forma contínua, a idade intercepto inferior pode não estar relacionada a um evento geológico (Sato et al, 2008).

O zircão é o mineral ideal para aplicação da técnica de *Laser Ablation*, pois este mineral é capaz de registrar em sua estrutura o urânio (U) e elementos traços. O zircão apresenta uma estrutura bastante resistente e uma temperatura de bloqueio de aproximadamente 800°C para o sistema U-Pb (Sato et al, 2008).

As análises foram realizadas no Laboratório de Geologia Isotópica (Departamento de Geologia - DEGEO), da Universidade Federal de Ouro Preto - MG.

Para a datação do Derrame Catalán e proveniência sedimentar no arenito, ambas realizadas pelo método U-Pb, as amostras foram quebradas com marreta,

trituradas no britador, e, após moídas no moinho de disco. O material obtido foi concentrado usando uma malha de #80. A fração magnética foi separada com auxílio do Separador Isodinâmico de Frantz. Após, a *mount* foi preparada e polida. Análises semiquantitativas foram realizadas Microscópio Eletrônico de Varredura (JEOL 6610) para confirmar que os cristais eram todos de zircão. Todas as etapas foram realizadas no Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

As análises U-Pb foram adquiridas usando um Espectrômetro de Massa Multicoletor Thermo Fisher Scientific Neptune acoplado a um *sistem laser* Photon-

Machines de 193 nm, instalado no laboratório de Geoquímica Isotópica da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). A medição de fundo durante 20s foi seguida por ablação de zircônio de 20s e tamanho de ponto de 30µm. A frequência do laser foi ajustada para 10 Hz com uma fluência de 3,7-3,9 J/cm<sup>2</sup>. A calibração foi realizada usando os materiais de referência padrão GJ-1, BB e Plesovice (Jackson et al. 2004). O padrão GJ-1 produziu uma idade média 603,3 ± 1,7 Ma (2σ, MSWD=0,81) e 337,5±1,0 Ma (2σ, MSWD=1,06).

## 6. **RESULTADOS**

Nesta sessão, serão apresentados os resultados obtidos nesta pesquisa, que vão desde o trabalho de campo até as análises de laboratório realizadas.

## 6.1 Trabalho de campo

Para a etapa de levantamento de dados de campo foram realizadas 3 (três) campanhas de campo. Foram descritos 22 pontos ao longo da Paleoduna Santa Otília e rochas vulcânicas adjacentes a paleoduna (Figura 6). Esses pontos, com suas respectivas coordenadas geográficas (UTM), cotas altimétricas, relação de amostradas coletas e análises realizadas, estão no Anexo A.



Figura 6: Mapa de pontos descritos na paleoduna Santa Otília e derrame vulcânico. A) Detalhe da porção central da paleoduna. B) Detalhe da porção norte da paleoduna. Extraído de Google Earth®.

Para a descrição da área de estudo, foram traçados perfis longitudinais, onde foi possível caracterizar as rochas vulcânicas e sedimentares, bem como, a correlação destas unidades. Para o levantamento destes perfis, foram levados em consideração características como: elevação altimétrica para identificação e diferenciação dos derrames presentes na área; acesso às porções aflorantes e a identificação das relações geomorfológicas/topográficas das unidades vulcânicas e sedimentares.

O uso de imagens de satélite obtidas no Google Earth®, auxiliaram no reconhecimento geral da área de estudo, na identificação preliminar da ocorrência, estrutura e orientação da paleoduna e das relações topográficas das rochas vulcânicas, utilizando-se como base diferenças texturais das imagens.

A região que compreende a paleoduna e as rochas vulcânicas tem topografia moderada, a elevação varia de 100 a 171 m. A Formação Botucatu ocorre ao longo dos topos das colinas, nas porções mais altas, enquanto o Grupo Serra Geral ocupa os níveis mais rebaixados da topografia, estas rochas são de fácil reconhecimento nas drenagens que ocorrem na região, marcadas por relevo suave.

A Paleoduna Santa Otília é composta por um arenito com formato alongado com ramificações, lembrando uma estrutura de "*espinha de peixe*" tem uma boa exposição nas imagens, sua extensão é de aproximadamente 18 km. Destaca-se ainda, a presença de inúmeros blocos, evidenciando o intenso fraturamento do arenito.

A figura 7 contempla a visão geral da paleoduna onde é possível visualizar as relações topográficas/geomorfológicas das rochas vulcânicas e arenito.

A paleoduna Santa Otília, é formada por blocos de arenito, intensamente fraturados, heterogeneamente silicificados e com poucos locais onde a estratificação plano-paralela e por vezes cruzada é preservada. Na figura 7B, é possível observar os blocos de arenito, característicos da região. A dimensão dos blocos, em geral, varia de 30 cm a 1m.



Figura 7: Vista geral da Paleoduna Santa Otília. A) Aspecto da vegetação e derrame que bordeja as porções mais elevadas da paleoduna. B) Blocos de arenito com fraturamento e orientação NW-SE e NE-SW. C) Visão de detalhe da sanga, onde ocorrem lajeados de rochas vulcânicas.

O arenito que compõe predominantemente a Paleoduna, é um arenito médio, com grãos subangulosos a subarredondados, de composição quartzo-feldspático, com estratificação cruzada planar preservada em algumas porções da paleoduna (Figura 8).



Figura 8: Fotografias de campo. (A) Paleoduna Santa Otília composta por blocos de arenito intensamente fraturados. (B) Bloco de arenito com estratificação cruzada plana preservada.

Pontualmente ocorrem feições de arraste de lava (Figura 9) (Waichel et al., 2008). Em algumas regiões da paleoduna foi observado que devido ao diferente grau

Trabalho de conclusão em geologia Melissa Johner de silicificação, ocorrem fraturas conchoidais, e que, em muitas vezes, são arredondadas.



Figura 9: Feições de lava descritas em campo. A) Feição de lava marcada no arenito. B) Feição de lava escavada no topo de um bloco de arenito.

Foram identificadas inúmeras estruturas radiais no topo dos blocos de arenito. Hartmann et al.,(2022) relata a ocorrência dessas feições em outras paleodunas na região da Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul. Na paleoduna Santa Otília observouse que essas feições ocorrem no topo dos blocos de arenito. Apresentam-se no formato circular, algumas delas, tem altura centimétrica e frequentemente estão com fraturas radiais. O fraturamento dos blocos e a intensa silicificação são etapas da evolução geológica descritas na área.



Figura 10: *Bowls* (tigelas hidrotermais) evidenciando feições hidrotermais. A) *Bowl* no topo de arenito cortada por fraturamento. B) Pequena *bowl* alongada. C) *Bowl* circular, com profunidade centimétrica, marcada por fraturas cortando a feição.

O derrame que recobre parcialmente as dunas, têm cor escura, ocorre na forma de lajeados com aspecto maciço e, frequentemente, fraturado. O fraturamento gera blocos pequenos, geralmente, encontrados na sanga. Os afloramentos descritos foram encontrados nas porções mais baixas topograficamente e em pequenas drenagens no entorno da paleoduna. Diques de arenito de espessuras variáveis (milimétricas a centimétricas) e descontínuos, são comuns nos afloramentos e devido a intensa silicificação, estas estruturas são bem preservadas, mesmo quando a rocha vulcânica está alterada intempericamente.

Geodos com dimensões que variam de 3 a 6 cm preenchidos por ágata e calcedônia são reconhecidos. Além disso, cavidades preenchidas por calcedônia têm formatos mais ovoides e regulares, se comparados aos preenchidos por quartzo. Mesmo com preenchimentos distintos, estas cavidades têm dimensões semelhantes que variam de 2 a 8 cm. Em algumas situações, diques estão conectados aos geodos. De forma geral, o derrame tem textura afanítica com fenocristais de minerais félsicos e máficos, cuja mineralogia é de difícil distinção em função da fina textura da rocha.

No topo da coxilha, este derrame é facilmente distinguido pela cor acinzentada, mas, nos níveis mais alterados, é comum a cor marrom acastanhada (Figura 11C). Nestas situações, o derrame é intensamente fraturado com orientação predominante NW-SE e NE-SW. A figura 11 descreve algumas feições que foram descritas no derrame que ocorrem nas proximidades da paleoduna Santa Otília.



Figura 11: Principais feições descritas em campo na rocha vulcânica. A) Conjunto de fraturas com orientação NW-SE e NE-SW. B) Zona de cataclase. C) Cavidade com forma amebóide preenchida por quartzo. D) e E) Diques de arenito fino intensamente silicificados.

## 6.1.1 Análise Estrutural

A coleta de dados estruturais da paleoduna Santa Otília contou com o levantamento das fraturas. Foram realizadas 136 medições.



Figura 12: Conjunto de fotos evidenciando o fraturamento que ocorre no arenito. A) Fraturas cortando lateralmente a estratificação plano-paralela incipiente que está preservada localmente. B) Padrões de fraturas distribuídas de forma radial. C) Blocos de arenito intensamente fraturado mostrando dois planos de fratura bem marcados. D) Padrões de fraturas distribuídas de forma radial.

A partir das medidas de fraturas, pode-se gerar um estereograma que

representa os padrões de fraturamento. Observa-se que existem 2 padrões de fraturas

bem definidos: um tem orientação NW-SE e outro NE-SW. O segundo tem menor expressão quando comparado com primeiro.



Figura 13: Estereograma das fraturas medidas no arenito da Paleoduna.

#### 6.2 Petrografia

Nesta sessão serão apresentadas as descrições petrográficas das rochas vulcânicas e sedimentares.

## 6.2.1 Arenitos

Com base nas lâminas delgadas de arenitos siliciclásticos descritas é possível distinguir duas petrofácies de arenitos, são eles:

#### 6.2.1.1 Petrofácies 1

Este arenito tem predominantemente estrutura deposicional maciça, orientação caótica ou sub-paralela dos grãos (Figura 14A). A granulometria é bastante

homogênea, composta por grãos médios (Figura 14A). As amostras são bem selecionadas. Os grãos apresentam arredondamento variando de subangulosos a subarredondados e esfericidade média. O grau de empacotamento é predominantemente frouxo. Predominam contatos retos, longo e pontuais (Figura 14C). Arcabouço formado por quartzo policristalinos e monocristalino, feldspato potássico, raro plagioclásio, litoclastos de rochas vulcânicas básicas e rochas graníticas (Figura 14B). Os principais processos diagenéticos observados nos arenitos siliciclásticos incluem a precipitação de franjas de calcedônia e de cutícula de opala preenchendo poros intergranulares e intragranulares (Figura 14B e F), a precipitação de forma de fina e descontínua cutícula de óxido de ferro é comum na periferia dos grãos.

A porosidade intergranular (Figura 14D) é predominante, reduzida principalmente por franjas e agregados de quartzo microcristalino. A porosidade intragranular é secundária, gerada pela dissolução de feldspatos potássico e litoclastos de vulcânicas básicas.



Figura 14: Fotomicrografia da petrofácies 1. A) Visão geral da lâmina evidenciando a orientação subparalela dos grãos (XP- polarizadores cruzados). B) Detalhe do processo diagenético demostrado pelo crescimento de franjas de calcedônia (setas amarelas) (XP-polarizadores cruzados). C) Grau de empacotamento frouxo e litoclastos vulcânicos e graníticos (setas amarelas) (//P- polarizadores descruzados). D) Porosidade intergranular (setas vermelhas) e óxido de ferro (setas amarelas) (//Ppolarizadores descruzados). E e F) Detalhe do processo diagenético de crescimento de opala (setas vermelhas) e óxido de ferro (//P- polarizadores descruzados).

#### 6.2.1.2 Petrofácies 2

As lâminas descritas deste grupo de arenitos mostram predominantemente estrutura laminada. A laminação paralela é irregular, marcada pela alternância de empacotamento e cimentação entre os níveis (Figura 15 A e B), o que reflete em variações da porosidade. A granulometria é bastante homogênea, composta por grãos médios. As amostras são bem selecionadas. Os grãos apresentam arredondamento variando de subangulosos a subarredondados e esfericidade média. O grau de empacotamento é levemente apertado. Predominam contatos longos e pontuais. O arcabouço é formado por quartzo monocristalino, e raros policristalinos, feldspato potássico, raro plagioclásio, muitos litoclastos de rochas vulcânicas básicas, e raramente, de rochas graníticas. (Figura 15C).

Os principais processos diagenéticos identificados nos arenitos siliciclásticos incluem precipitação de franjas de calcedônia e cutículas de opala, principalmente nos fragmentos vulcânicos e feldspatos, a precipitação de sobrecrescimentos de quartzo ocorre em menor quantidade e está descontínua quando comparada a petrofácies 1. A presença de descontínua e fina cutícula de óxido de ferro próximo à borda dos grãos. Ocorrência de caulinita, de origem autigênica, um argilomineral identificado por DRX, mas que foi visualizado como uma espessa camada marrom acastanhado na periferia dos grãos de quartzo, feldspato potássico e fragmentos vulcânicos. Os grãos de quartzo possuem inclusões que estão dispersas e em forma de trilhas.

A porosidade intergranular (Figura 15D) é predominante em relação a porosidade intragranular. A porosidade intragranular é secundária, e evidenciada dissolução de litoclastos de vulcânicas básicas (Figura 15D).



Figura 15: Fotomicrografias do petrofácies 2. A e B) Laminação paralela e irregular marcado pela diferença no grau de empacotamento (delimitada pela linha vermelha tracejada) (XP e //P, respectivamente). C) Litoclastos de rocha vulcânica e granítica (indicado pela seta vermelha) (XP). D) Porosidade intergranular e intragranular. A porosidade intragranular (indicado pela seta amarela) está evidenciada pela dissolução dos litoclastos de rocha vulcânica (indicado pela seta vermelha) (//P).

#### 6.2.2 Rocha vulcânica

#### 6.2.2.1 Derrame Catalán

As rochas do derrame vulcânico são hipocristalinas e têm granulação muito fina (< 0,2 mm) a fina (0,9 mm). É composta de plagioclásio (50-55%), clinopiroxênio (30-40%) e opacos (3-5%). Apresenta fenocristais de plagioclásio (0,5 mm a 1 mm) que estão subédricos, frequentemente exibindo textura glomeroporfirítica juntamente com fenocristais de clinopiroxênio (0,2 mm a 0,9 mm). Apesar de predominar textura glomeroporfirítica, ocorre também, textura ofítica e subofítica. Os cristais de plagioclásio que fazem parte da matriz muito fina exibem argilização (Figura 16B), o que lhes confere cor castanho amarelado e aspecto turvo. Os minerais opacos,

dispersos na matriz, formam cristais quadrados a retangulares, e também assumem formas anédricas, de tamanho até 0,40 mm.

Em lâmina petrográfica é possível observar que o arenito que compõe os diques intensamente cimentado por minerais silicosos. O contato do dique de arenitocom o derrame Catalán é abrupto (Figura 16 A), não havendo evidências de processos de alteração no contato entre estas duas litologias.



Figura 16: Fotomicrografia do Derrame Catalán. A) Contato do dique de arenito com o derrame Catalán demonstrando que o contato entre eles é abrupto (XP). B) Cristais de plagioclásio compondo a matriz da rocha e evidenciando o processo de argilização (//P).

## 6.3 Difração de Raios X

As análises mineralógicas efetuadas, em geral, pela técnica de difração de raios X (DRX) propiciam a identificação das variadas espécies minerais presentes nas rochas, principalmente os minerais presentes na fração fina, que na maioria das situações são indistinguíveis até mesmo na microscopia ótica. Foram selecionadas 3 (três) amostras de arenitos da Paleoduna Santa Otília. Para esta seleção foram levados em consideração os diferentes aspectos diagenéticos e diferenças descritas na petrografia. Os resultados da DRX são expressos nos difratogramas das figuras 17, 18 e 19.

Assim como na petrografia, a DRX mostra que os arenitos descritos são compostos principalmente por quartzo e plagioclásio. A intensidade da cimentação é comprovada pelos picos de quartzo dos difratogramas.



Figura 17: Difratograma de raios X evidenciando picos de quartzo e plagioclásio da Petrofácies 1.



Figura 18: Difratograma de raios X evidenciando picos de quartzo e plagioclásio da Petrofácies 1.

Trabalho de conclusão em geologia Melissa Johner





#### 6.4 Análises químicas

Os resultados de análises químicas apresentados nesta seção foram obtidos tanto por fluorescência de raios X (FRX) quanto por plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) ou espectrometria de massa por plasma indutivamente acoplado (ICP-MS). Estas análises são indispensáveis para avaliar quimicamente as rochas vulcânicas que afloram na região do entorno da Paleoduna Santa Otília. Para estas análises, foram selecionadas 9 (nove) amostras de rochas vulcânicas.

#### 6.4.1 Análises químicas de rocha total

As análises químicas de rocha total possibilitam a quantificação dos teores de elementos maiores, menores e traços. Na tabela 1, 2 e 3 estão expressos osresultados destas análises. Para comparação, foram plotados nos diagramas (Figura20 e 21) dados obtidos por Duarte et al., (2009); Hartmann et al., (2010); e Martins et al., (2011).

Um derrame foi identificado na área de estudo, com base no trabalho de campo, petrografia e análises químicas. Com base nas análises químicas conclui-se que o derrame que recobre a Paleoduna Santa Otília é o derrameCatalán, já anteriormente descrito por Duarte et al., (2009); Hartmann et al.,(2010); Martins et al., (2011); Bergmann et al.,(2020) na fronteira oeste do Estado.

Amostra	SO4A	SO8B	SO8C	SO11A	SO12 A	SO13 A	SO18B	SO20 B	SO21A
SiO2	53,62	53,72	53,6	54,35	53,63	53,89	52,14	54,5	55,21
TiO2	1,112	1,146	1,104	1,778	1,108	1,124	1,093	1,085	1,148
AI2O3	14,14	14,05	13,88	12,72	14,15	14,09	14,01	13,69	13,41
Fe2O3	11,58	11,36	11,45	14,19	11,6	11,73	11,26	11,28	11,63
MnO	0,178	0,201	0,174	0,18	0,181	0,174	0,158	0,167	0,162
MgO	5,94	5,9	5,93	3,41	6,21	5,97	6,17	5,55	5,33
CaO	9,43	9,47	9,71	6,64	9,71	9,84	9,58	9,05	8,7
Na2O	2,34	2,2	2,12	2,63	2,18	2,21	2,09	2,31	2,45
K2O	1,18	1,1	0,9	1,71	1,07	1,01	0,9	1,12	1,26
P2O5	0,13	0,12	0,13	0,24	0,13	0,13	0,13	0,12	0,14
LOI	0,8	1,22	1,16	1,38	0,81	0,51	1,56	0,33	1,02
Total	100,4	100,5	100,2	99,23	100,8	100,7	99,09	99,19	100,5

Tabela 1: Análise quantitativa de elementos maiores em porcentagem (%) da rocha vulcânica aflorante no entorno da Paleoduna Santa Otília.

Amostras	SO4A	SO8B	SO8C	SO11A	SO12A	SO13A	SO18B	SO20B	SO21A
Sc	38	37	37	37	38	38	38	37	37
Ве	1	1	1	2	1	1	1	1	1
V	328	332	326	398	335	307	325	317	339
Ва	276	358	372	411	262	245	257	261	323
Sr	193	202	224	216	199	197	204	188	183
Y	23	24	22	34	22	22	24	23	23
Zr	114	115	112	190	112	115	112	113	122
Cr	80	70	80	<20	80	80	80	70	70
Со	42	42	40	39	42	42	41	41	40
Ni	50	50	50	20	60	50	60	50	60
Cu	40	120	80	150	100	110	160	70	70
Zn	80	80	80	100	80	80	80	80	90
Ga	17	17	16	20	17	17	17	17	17
Ge	2	1	2	2	2	2	2	2	2
As	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Rb	37	32	35	55	38	35	24	38	46
Nd	15, 6	15,6	5,5	25,5	16,1	16,1	15,4	15,4	17
Мо	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
Ag	<0, 5	<0,5	<0, 5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
In	<0, 2	<0,2	<0, 2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2
Sn	1	1	1	2	1	1	1	1	1
Sb	<0, 5	<0,5	<0, 5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Cs	0,8	0,7	1,4	1,2	1	1,5	0,7	1,1	1,3
Та	0,4	0,4	0,4	0,8	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
W	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1
ТІ	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2
Pb	5	5	5	8	12	6	<5	5	6
Bi	<0, 4	<0,4	<0, 4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4	<0,4
Th	3,6	3,5	3,5	5,2	3,5	3,6	3,5	3,6	3,8
U	0,9	0,8	0,8	1,2	0,8	0,8	0,7	0,9	0,9

Tabela 2: Análise quantitativa de elementos menores (em ppm) das rochas vulcânicas aflorantes no entorno da Paleoduna Santa Otília

Amostra	SO4A	SO8B	SO8C	SO11A	SO12A	SO13A	SO18B	SO20B	SO21A
La	15	14,8	14,9	26,1	15,3	15,7	14,8	15,2	16,2
Се	30,7	30,4	30,9	52	31,4	31,6	30,1	30,6	33,1
Pr	3,78	3,71	3,64	6,22	3,73	3,86	3,62	3,78	4,01
Nd	7	7	7	14	7	7	7	7	8
Sm	3,8	3,8	3,7	6	3,8	3,9	3,7	3,7	3,9
Eu	1,09	1,05	1,06	1,62	1,06	1,11	1,01	1,04	1,08
Gd	3,6	3,5	3,4	5,3	3,6	3,5	3,5	3,5	3,8
Tb	0,6	0,6	0,6	0,9	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Dy	3,9	3,9	3,8	5,8	3,8	4	3,8	3,8	4,1
Но	0,7	0,8	0,7	1,1	0,8	0,8	0,7	0,8	0,8
Er	2,2	2,1	2,2	3,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,3
Tm	0,32	0,31	0,31	0,45	0,31	0,32	0,29	0,33	0,33
Yb	1,9	1,9	2	2,8	2	2	1,9	2	2,1
Lu	0,3	0,3	0,31	0,44	0,32	0,3	0,29	0,31	0,3

Tabela 3: Análise quantitativa de elementos traços (em ppm) das rochas vulcânicas aflorantes no entorno da Paleoduna Santa Otília.

Na análise dos dados químicos, foi possível identificar que as amostras de basaltos andesíticos do Derrame Catalán para a região da paleoduna Santa Otília têm valores de SiO<sub>2</sub> entre 52,14 e 55,21 %, Na<sub>2</sub>O entre 2,09 e 2,63 % e K<sub>2</sub>O entre 0,9 e 1,71 %. Teores de TiO<sub>2</sub> variam de 1,085 a 1,778. Teores de LOI estão entre 0,33 e 1,56 %.

Com base na tabela 1, é possível classificar quimicamente essas rochas no Diagrama TAS (Le Bas et al., 1986), que considera o teor de SiO<sub>2</sub> e a soma dos óxidos Na<sub>2</sub>O e K<sub>2</sub>O e visa reconhecer as litologias. A partir da classificação química (Figura 21), entende-se que as rochas da área de estudo têm caráter intermediário, classificadas como andesitos basálticos. Para comparação, foram plotados os dados químicos de Duarte et al.,(2009); Hartmann et al., (2010); e Martins et al.,(2011) do Derrame Catalán.



Figura 20: Diagrama TAS, proposto por Le Bas et al. (1986), das rochas vulcânicas que afloram na região de estudo, elaborado a partir dos dados da tabela 4. Neste gráfico também foram plotados os resultados de Duarte et al., (2009); Hartmann et al.,(2010); e Martins et al.,(2011).

Com base na análise e interpretação dos diagramas químicos binários, é possível notar que uma amostra, dentre as nove amostras analisadas, possui um comportamento diferente. Nos diagramas, essa amostra está agrupada com as amostras utilizadas da literatura Duarte et al.,(2009); Hartmann et al., (2010); e Martins et al.,(2011). Percebe-se que esse grupo de amostras possui maior quantidade de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Zr, Nb e TiO<sub>2</sub>.

No diagrama TiO<sub>2</sub> X MgO, o conjunto de amostras evidencia que as rochas podem ser classificadas como 'Baixo Ti', na fácies Gramado com maior teor de MgO e menor teor de TiO<sub>2</sub> e que os pontos não apresentam uma dispersão grande. Já as amostras da literatura, juntamente, com uma amostra desta pesquisa, apresentam maiores teores de TiO<sub>2</sub> e menor quantidade de MgO, e estão mais dispersas.



Figura 21: Diagramas binários de variações químicas evidenciando as características composicionais (TiO<sub>2</sub>, MgO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Zr e Nb) do Derrame Catalán na região da Paleoduna Santa Otília. Para comparação, foram plotados os dados de Duarte et al., (2009), círculos em vermelho; Hartmann et al. (2010), círculos em verde; e Martins et al., (2011), círculo em amarelo. Os círculos em rosa são desta pesquisa.

Com relação aos Elementos Terras Raras (ETR) andesitos basálticos e andesitos apresentam um enriquecimento de elementos terras raras leves (ETRL) (637,55 ppm) em relação aos elementos terras raras pesados (ETRP) (89,42ppm). O andesito basáltico Catalán apresenta um comportamento diferenciado, sendo mais enriquecido em todos os elementos se comparado aos basaltos andesíticos.



Figura 22: Diagrama Elementos Terras Raras (ETR) obtido a partir da normatização pelo condrito de amostras do basalto andesítico Catalán.

#### 6.5 Datação U-Pb

Como estudo complementar foram obtidas idades U-Pb no Derrame Catalán. Foram datados 19 cristais de zircão. A idade U-Pb obtida para esse derrame, do Grupo Serra Geral na paleoduna Santa Otília teve como a idade intercepto de 137,3 ± 7,6 Ma. No gráfico abaixo, as idades não são concordantes, nesse sentido, a curva indica que o intercepto não tangenciou a curva concórdia. Esse resultado pode estar indicando que houve perda de chumbo. A idade obtida está de acordo com valores já encontrados para o Grupo Serra Geral (Turner et al., 1994).





#### 6.6 Proveniência U-Pb

Para a análise de proveniência foi selecionada 1(uma) amostra de arenito da Paleoduna Santa Otília. Foram separados 170 grãos detríticos de zircão por metodologia usual. A opção pelo zircão para análise de proveniência, deu-se em função da sua abundante ocorrência nos arenitos da Formação Botucatu e por ser um mineral refratário e resistente a processos intempéricos e hidrotermais.

A análise do histograma obtido a partir da datação U-Pb dos grãos mostra uma variação significativa na área fonte de origem desses sedimentos (Figura 25). As idades detríticas do zircão U-Pb da Paleoduna Santa Otília podem ser reconhecidas em 5 populações. O pico predominante é de 450 a 600 Ma (Ordoviciano Superior – Eoadiacariano). Quatro outras populações podem ser individualizadas, mas com picos menores, que se referem às seguintes idades Triássico Superior – Carbonífero Superior (225 a 300 Ma), Toniano (900 a 975 Ma), Orosínio (1,8 a 1,9 Ga) e Paleoproterozoico Arqueano (2,5 a 2,5 Ga).



Figura 24: Histograma de frequência de idades U-Pb em zircão do arenito Santa Otília. Principais picos de idades são indicados.

## 7. DISCUSSÕES

Esta seção interpreta os dados obtidos e compilados à luz da metodologia empregada nas diferentes escalas desta pesquisa.

A Formação Botucatu e o Grupo Serra Geral fazem parte da supersequência Gondwana III (Milani, 2007) e representam o maior evento vulcano-sedimentar da América do Sul. Na região de Uruguaiana, RS a interação destas unidades deram origem a Paleoduna Santa Otília, que embora seja um registro essencialmente sedimentar, apresenta feições hidrotermais causadas pela sua associação com as rochas vulcânicas da região.

A paleoduna Santa Otília é formada por arenitos que expressam características diferentes de acordo com o local em que estão posicionados e devido a intensidade dos processos hidrotermais que o afetaram. A petrofácies 1 com estrutura deposicional preservada localmente, com orientação caótica ou sub-paralela dos grãos, formado por grãos médios, bem selecionados. O tamanho dos grãos e a sua boa seleção evidenciam o ambiente eólico de formação da duna. A petrofácies 2 apresenta laminação paralela e irregular, de granulometria homogênea formada por grãos médios, principalmente de quartzo, feldspatos e litoclastos, demonstrando o ambiente eólico de formação da duna.

Essas características descritas estão de acordo com paleodeserto Botucatu já caracterizado como um ambiente de clima seco (Scherer, 2000; Scherer, Tomazelli e Goldberg 2008).

Do ponto de vista da proveniência sedimentar, a região da paleoduna Santa Otília apresenta contribuição de diversas áreas fonte de sedimentos. Embora a análise de proveniência tenha sido realizada em apenas 1 amostra, o conjunto de dados de zircões detríticos demonstra uma variação significativa na área fonte. Esse estudo identificou zircões com idades Paleoproterozoicas ao Ordoviano Superior demonstrando as múltiplas fontes dos sedimentos. Idades de proveniência do paleodeserto Botucatu (Bertolini et al., 2020; Bertolini et al., 2021) corroboram as idades encontradas na Paleoduna Santa Otília. O derrame Catalán, derrame vulcânico que recobre a paleoduna Santa Otília, caracterizado como do grupo do "Baixo Ti", na série Gramado. Outros trabalhos na região corroboram essa classificação (Duarte et al., 2009; Hartmann et al., 2010, Martins et al., 2011; Bergmann et al, 2020).

A perda ao fogo (LOI) é uma característica importante quando analisado o grau de alteração da rocha. As amostras analisadas apresentam um LOI máximo de 1,56% indicando que, geoquimicamente, a rocha não possui um alto grau de alteração. Duarte et al., 2009 estudou as mineralizações de geodos de ametista no derrame Catalán, no Uruguai, e concluiu que a alteração hidrotermal modifica as características físicas da rocha, principalmente a densidade e a permeabilidade da rocha. Afirma também, que naquela região os derrames mineralizados estão mais alterados para argilominerais, o que é evidenciado pelo LOI ≥2%.

O andesito basáltico Catalán, por ser o primeiro derrame identificado a cobrir a paleoduna Santa Otília, é responsável por gerar um aprisionamento do paleoerg na Paleoduna Santa Otília. Esse confinamento, num primeiro estágio, impediu a percolação da água do arenito para o andesito basáltico Catalán formando um selo. Dessa forma, a água disponível do Aquífero Guarani percolou pelo arenito Botucatu promovendo uma silicificação heterogênea. Essa evidência está demonstrada nos processos diagenéticos das petrofácies 1 e 2. A silicificação é representada pela precipitação de calcedônia e opala.

A partir da observação e descrição em campo, as feições vulcanosedimentares são identificadas como principal interface entre o arenito e o derrame Catalán. A interação entre a lava e o sedimento ficou registrada devido as lavas terem recoberto o paleodeserto Botucatu e preservado a morfologia da duna eólica (Scherer 1998, 2000). Na paleoduna Santa Otília foram observadas duas formas de interação entre a lava e os sedimentos. Uma dessas formas são o registro da impressão no topo do arenito que demonstram o arraste do derrame vulcânico na superfície do arenito. Essas feições foram identificadas localmente, mas permitem inferir que a duna não estava totalmente consolidada quando foi recoberta pelo derrame.

O outro tipo de interação é a identificação de injeções de arenito que cortam o derrame Catalán. Essas feições indicam que a areia do paleodeserto que foi injetada no derrame Catalán provavelmente teve como fatores preponderantes a pressão de vapor e presença de água, evidenciando processo de liquefação e fluidização, processos que foram identificados em outras porções do Grupo Serra Geral por Michelin (2014). O dique de arenito em lâmina petrográfica é intensamente cimentado por minerais silicosos. A presença desse cimento silicoso indica que houve a percolação de fluido de tal composição nestes diques. Como o contato do dique de arenito com o derrame Catalán é abrupto, sugere-se que esta interação não tenha ocorrido a temperaturas muito elevadas. As fontes de sílica para a cimentação necessita de mais estudos, tendo em vista, que Heemann (2005) e Strieder & Heemann (2006), acreditam que a fusão de grãos de quartzo seria responsavél pelo fornecimentos de sílica. Michelin (2014) não encontrou evidencias desse processo em seus estudo no Distrito Mineiro de Salto do Jacuí.

No topo do arenito que compõem a paleoduna Santa Otília foram identificadas dezenas de bowls. Essas bowls são estruturas circulares e fraturadas, que em alguns casos são silicificadas. A presença de bowls e a intensa silicificação dos arenitos da paleoduna Santa Otília são evidências de que a área pode ter sido afetada por um evento hidrotermal. Além disso, a presença de diques de arenito silicificados injetados no derrame Catalán corroboram com a identificação do processo.

Os arenitos descritos têm diferenças marcantes nos processos diagenéticos. Na petrofácies 1, os principais processos diagenéticos observados incluem a precipitaçãode franjas de calcedônia e de opala preenchendo poros intergranulares e intragranulares, a precipitação de sobrecrescimentos de quartzo. Na petrofácies 2, a diagênese também ocorre, mas visivelmente, de forma mais branda, sendo possível afirmar que a paleoduna possui uma cimentação heterogênea. Essa heterogeneidade pode ser explicada pela expressiva extensão da paleoduna, o que gera uma percolação de fluidos hidrotermais de forma descontínua e irregular.

A Bacia do Paraná, incluindo a região da Fronteira Oeste do Estado, foi afetada por um conjunto de falhamentos associados a separação dos continentes no Gondwana (Veroslavsky et al., 2021). A partir da coleta de medidas estruturais e a geração de um estereograma, é possível identificar que a paleoduna é afetada preferencialmente por fraturas de orientação NW, e, subordinadamente por fraturamento de orientação NE. Esse pode estar relacionado a um evento tectônico mais abrange, como a reativação de elementos tectônicos com direção NW e NE, como proposto por Reis (2013).

Essas feições hidrotermais já foram descritas por outros autores na Fronteira Oeste (Hartmann & Cerva-Alves, 2021; Hartmann et al, 2022) que concluem que o processo hidrotermal é o principal responsável pela formação de bowls, injeção de areia e silicificação dos arenitos. A Figura 26 representa o modelo esquemático proposto para a Paleoduna Santa Otília.



Trabalho de conclusão em geologia Melissa Johner



Figura 25: Modelo esquemático evolutivo da Paleoduna Santa Otília. A) Estágio inicial da Paleoduna Santa Otília, formada por arenitos compostos por sedimentos de diferentes idades. B) O derrame Catalán recobre a região da Paleoduna Santa Otília tornando inativas as dunas do paleoerg Botucatu. C) O derrame Catalán atua como um selo impedindo que água atinge a paleosuperfície. D) A percolação de fluidos hidrotermais ocorre no internamente no arenito. Essa percolação é responsável pela heterogeneidade da silicificação da Paleoduna Santa Otília. Nesse estágio, ocorre a precipitação da calcedônia e da opala, e do sobrecrescimento de quartzo. Nessa etapa ocorre ainda o fraturamento da Paleoduna Santa Otília e a formação dos diques de arenito. E) Com a passagem de fluidos e alivío da pressão confinante do derrame selante que foi afetado pelo fraturamento, inicia-se o processo de erosão do derrame Catalán. F) Representação da Paleoduna Santa Otília nos dias atuais.

#### Trabalho de conclusão em geologia Melissa Johner

## 8. CONCLUSÕES

Através da integração dos dados obtidos no presente trabalho, conclui-se que:

- A Paleoduna Santa Otília é um exemplo que arenito Botucatu que pode ser afetado por processos hidrotermais;

- O hidrotermalismo ocorreu em diversas etapas na paleoduna, evidenciado pelo crescimento de calcedônia e opala. Em alguns casos, ocorre primeiramente a calcedônia, seguida, da opala; em outros, ocorre apenas crescimento de calcedônia.

- A silicificação da Paleoduna Santa Otília ocorreu de forma heterogênea;

- Não foi possível estabeler a distribuição do grau de silicificação da paleoduna Santa Otília, por tanto, é recomendado que mais estudos sejam feitos na região;

- Os dados de proveniência sedimentar no arenito confirmam a contribuição de diversas áreas fontes de zircão;

- A idade do magmatismo calculada para o Derrame Catalán está de acordo com as idades encontradas ao longo do Grupo Serra Geral;

- O evento causador do fraturamento da área estudada pode ter gerado a formação dos diques de arenito;

- O LOI<2% pode indicar alguma anomalia, já que em outras porções do Derrame Catalán o LOI>2% indicam mineralizações de ametista.

## REFERÊNCIAS

Allmendiger, R.W.; Siron, C.R.; Scott, C.P.; 2017. Structural data colletion with mobile devices: Accuracy, redundancy, and best practices. *Journal of Structural Geology*, 102, 98-102.

Almeida, F.F. & Melo, M.S. 1981. A Bacia do Paraná e o vulcanismo mesozóico. In: Bistrichi, C.A., Carneiro, C.D.R., Dantas, A.S.L.& Ponçano, W.L. (Eds.). Mapa Geológico do Estado de São Paulo: nota explicativa. São Paulo, *Instituto de Pesquisas Tecnológicas*, p. 46-77.

Araujo, A.G. M. 1992. As propriedades físicas dos arenitos silicificados e suas implicações na aptidão ao lascamento. *Revista do Museu de Arqueologia e Etnologia.* São Paulo, 2:63-74.

Augustin, A.H.A. 2007. Geologia do depósito de ágata e ametista da mina novo São João, Santana do Livramento, RS. Porto Alegre, 91 p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Bergmann, M.; Rocha, P.G.; Sander, A.; Parisi, G.N. 2020. Áreas de relevante interesse mineral (ARIM): modelo prospectivo para ametista e ágata na fronteira sudoeste do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. *CPRM*, 2020. 129 p. Disponível em: <u>https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/18795.</u>

Bertolini, G., Marques, J.C., Hartley, A.J., Da-Rosa, A.A.S., Scherer, C.M.S., Basei, M.A.S., Frantz, J.C., 2020. Controls on early cretaceous desert sediment provenance in south-West Gondwana, Botucatu Formation (Brazil and Uruguay). *Sedimentology,* 67 (5). <u>https://doi.org/10.1111/sed.12715</u>

Bertolini, G.; Marques, J.C.; Hartley, A.J.; Basei, M.A.S.; Frantz, J.C.; Santos, P. R. 2021. Determining sediment provenance history in a Gondwanan erg: Botucatu formation, Northern Paraná Basin, Brazil. *Sedimentary Geology*. v. 417, p. 105883.

Bigarella, J.J. & Salamuni, R. 1961. The Botucatu Formation. In: Bigarella, J.J., Becker, R.D. & Pinto, J. D. (Eds). Problems in brazilian *Gondwana geology*. Curitiba, UFPR, p. 198-206.

Denalle, H.P. 2013. Geoquímica do alogrupo Guaritas (Ordoviciano da Bacia do Camaquã, RS). Porto Alegre, 92p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pósgraduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Dickson, J.A.D. 1965. A modified technique for carbonates in thin section. *Nature*, 205 (4971):587.

Duarte, L.C.; Hartmann, L. A.; Vasconcellos, M.A.Z.; Medeiros. J. T. N.; Theye, T. 2009. Epigenetic formation of amethyst-bearing geodes from Los Catalanes gemological district, Artigas, Uruguay, southern Paraná Magmatic Province, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, volume 184, issues 3–4, pages 427-436, <u>https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.05.019</u>.

Frank, H.T.; Gomes, M.E.B. & Formoso, M.L.L. 2009. Review of the areal extent and the volume of the Serra Geral Formation, Paraná Basin, South America. *Pesquisas em Geociênias* 36,49-57.

Gesicki, A.L.D. Evolução diagenética das formações Pirambóia e Botucatu (Sistema Aqüífero Guarani) no Estado de São Paulo. São Paulo, 2007. 175 p. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

Gomes, A.S.; Vasconcelos, P.M. 2021. Geocronology of the Paraná-Etendeka large igneous provice. *Earth-Science Reviews*. V 220, 103716.

Heemann, R. 1997. *Geologia, controles e guias prospectivos dos depósitos de ágata na região do Salto do Jacuí.* Porto Alegre, 107p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e dos Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Heemann, R. 2005. Modelagem estrutural e tridimensional para a prospecção e avaliação dos depósitos de ágata do distrito mineiro de Salto do Jacuí (RS). Porto Alegre, 150 p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Hartmann,L.A.; Wildner, W.; Duarte, L.C., Duarte,S.K.; Pertille, J., Arena, K.R., Martins, L.C., Dias, N.L. 2010. Geochemical and scintillometric characterization and correlation os amethyst geode-bearing Paraná lavas from the Quaraí na Los Catalanes districts, Brazil and Uruguay. *Geological Magazine*, 2010, 147(6), p.p. 954-950.

Hartmann,L.A. & Duarte, S.K. 2020. Novo Hamburgo Complex formed by hydrothermal, explosive injection of Botucatu erg sand into extensive tracts of Paraná Volcanic Province (S Brazil). *Journal of Sedimentary Environments*,5: 187-198.

Hartmann, L.A., & Cerva-Alves, T. 2021. Resurfaced paleodunes from the Botucatu erg amid Cretaceous Paraná volcanics. *Geomorphology*, 383:107702.

Hartmann, L.A.; Pertille, J.; Cerva-Alves, T.; Duarte, S.K. 2021. Paraná quartz andesite rings and arcs formed by distal imprint of dune design from the Botucatu paleoerg. *Journal of South American Earth Sciences*.112:103612.

Hartmann, L.A., Pertille, J., Bicca, M.M., Santos, C.B. 2022. Hydrothermal bowls in the Giant Cretaceous Botucatu paleoerg. *Brazilian Journal Geology.* 52.

Evolução Geológica Da Paleoduna Santa Otília - Uruguaiana, Rs: Integração de Dados Petrográficos, Geoquímicos E Isotópicos

Hartmann, L.A.; Pertille, J., Bicca, M.M., Santos, C.B.; Johner, M.; Cerva-Alves, T. 2022. Silicification, fracturing and steam venting of Botucatu paleodunes in the Early Cretaceous. *Journal of South American Earth Sciences*. 118: 103924.

Jackson, S.E.; Pearson, N.J.; Griffin, W.L.; Belousova, E.A. 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U–Pb zircon geochronology. *Chemical Geology*, v. 211, p. 47-69.

Le Bas, M. J.; Le Maitre, R. W.; Streckeisen, A.; Zanettin, B. 1986. A chemical classification of volcanick rocks based on the total Alkali-Silica Diagram. *Journal of Petrology*, 27: 745-750.

Michelin, C.R.L. Ágata do Distrito Mineiro de Salto do Jacuí (Rio Grande do Sul, Brasil) - uma caracterização com base em técnicas estratigráficas, petrográficas, geoquímicas e isotópicas. Porto Alegre, 2014. 162p. Tese (Doutorado em Geociências), Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Milani, E.J. 1997. Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana Sul-Ocidental. Porto Alegre, 255 p. Tese de Doutorado, Programa de Pós- graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2v.

Milani, E.J., Ramos, V.A. 1998. Orogenias paleozóicas no domínio sul-ocidental do Gondwana e os ciclos de subsidência da Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, 28 (4): 473-484.

Milani, E. J., França, A. B., Medeiros, R. A. 2006. Rochas geradoras e rochasreservatório da Bacia do Paraná, faixa oriental de afloramentos, Estado do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobras*. v.15, n.1, p. 135-162.

Milani, E.J., de Melo, J.H.G., Souza, P.A., Fernandes, L.A.& França, A.B., 2007. Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, v.15, n.2, p. 265-287.

Nascimento-Dias, B. L.; Oliveira, D.F.; Anjos, M.J. 2017. A utização e a relevância multidisciplinas da fluorescência de raios X. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol 39, n 4. p. 1-6.

Paraguassu, A.B. 1972. Experimental silicification of sandstone. *Geological Society of America Bulletin*, 83 (9):2853-2858.

Peate, D.W; Hawkesworth, C.J.; Mantovani, M.S.M. 1992. Chemical stratigraphy of the Paraná lavas (South America): classification of magma types and their spatial distribution. *Bulletin of Volcanology*, 55: 119-139.

Peate D.W., Hawkesworth C.J. 1996. Lithospheric to asthenospheric transition in Low-Ti flood basalts from southern Parana, Brazil. *Chemical Geology*, 127:1-24. <u>https://doi.org/10.1016/0009-2541(95)00086-0</u> Piccirillo, E.M.& Melfi, A.J. (Eds.). 1988. The Mesozoic flood volcanism from the Paraná Basin (Brazil): petrogenetic and geophysical aspects. São Paulo, *IAG/USP*,600p.

Pinto, V. M.; Hartmann, L. A.; Santos, J. O. S.; Mcnaughton, N. J. Zircon ages delimit the provenance of a sand extrudite from the Botucatu Formation in the Paraná volcanic province, Iraí, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* (Impresso), v. 87, p. 1611-1622, 2015.

Reis, G.S. 2013. A Formação Serra Geral (Cretáceo, Bacia do Paraná) como análogo para os reservatórios ígneo-básicos da margem continental brasileira. Porto Alegre 100 p. *Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências,* Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Rogge, J.H., Schmitz, P.I., Vargas, J.A., Beber, M.V., Ferrasso, S., Clos, D.V. 2020. A Grande Estância de Yapeyú. *Pesquisas (Antropologia, n° 75)*, Instituto Anchietano de Pesquisas. São Leopoldo: Unisinos, 122p. ISSN: 2594-5645.

Rossetti, L., Lima, E. F., Waichel, B. L., Hole, M. J., Simões, M. S. & Scherer, C.M.S. 2018. Lithostratigraphy and volcanology of the Serra Geral Group, Paraná-Etendeka Igneous Province in Southern Brazil: Towards a formal stratigraphical framework. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 355:98-114.

Sato, K.; Basei, M.A.S.; Siga, O.J.; Sproesser, W.M.; Passarelli C.R. Novas Técnicas Aplicadas ao Método U-Pb no CPGeo - IGc/USP: Avanços na Digestão Química, Espectrometria de Massa (TIMS) e Exemplos de Aplicação Integrada com SHRIMP. *Revista do Instituto de Geociências – USP*, v. 8(2), p. 77-99, 2008.

Scherer, C.M.S. Análise estratigráfica e litofaciológica da Formação Botucatu (Cretáceo Inferior da Bacia do Paraná) no Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1998. *Tese (Doutorado em Geociências)* – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 202 p.

Scherer, C.M.S., 2000. Eolian dunes of the Botucatu Formation (Cretaceous) in southernmost Brazil: morphology and origin. *Sedimentay Research* 137, 63-84.

Scherer, C.M.S., 2002. Preservation of eolian genetic units by lava flows in the Lower Cretaceous of the Paraná Basin, Southern Brazil. *Sedimentology*, 49: 97-116.

Scherer, C.M.S.; Tomazelli, L.J. & Goldberg, K. 2007. Construção, acumulação e preservação do Paleoerg Botucatu. In: IANUZZI, R., FRANTZ, J. C. (ed.). *50 Anos de Geologia: Instituto de Geociências.* Editora Comunicação e Identidade, p. 283-298.

Silva, J.L.S.; Menegotto, E. 2002. Aspectos mineralógicos de silicificação em rochas sedimentares mesozóicas no Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Geociências*, 32(3):317-326.

Soares, P.C. 1975. Divisão estratigráfica do Mesozóico do Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*, 5(4): 229-251.

Strieder, A.J. & Heemann, R. 2006. Structural constraints on Paraná basalt volcanism and their implications on agate geode mineralization (Salto do Jacuí, RS, Brazil). Pesquisas em Geociências, 33:37-50.

Tucker, M.E. 2001. Sedimentary petrology: an introducion to the origin of sedimentary rocks – 3rd ed.

Turner, S.; Regelous, M.; Hawkesworth, C. & Montovani, M. 1994. Magmatism and continental break-up in the Souht Atlantic: High precision <sub>40</sub>Ar–<sub>39</sub>Ar geocronology. *Earth Planetary Science Letters*, 121: 333-348.

Vasconcellos, M.A.Z.; Hinrichs, R. 2014. Microanálise em baixo vácuo por dispersão em energia de raios X característicos. In: HINRICHS, R. (Ed.). *Técnicas instrumentais não destrutivas aplicadas a gemas do RS*. Porto Alegre, IGEO/UFRGS, p. 107-131.

Veroslavsky, G.; Rossello, E.A.; Lopez-Gamundí, O.; de Santa Ana, H.; Assine, M.L.; Marmisolle, J.; Perinotto, A.J. 2021. Late Paleozoic tectono-sedimentary evolution of eastern Chaco-Paraná Basin (Uruguay, Brazil, Argentina, and Paraguay). *Journal of South* American Earth Sciences. 106, 102991. <u>http://doi.org/10.1016.j.jsames.2020.102991</u>

Waichel, B.L.; Scherer, C.M.S.; Frank, H.T. Basaltic lavas covering active Aeolian dunes in the Paraná Basin in Southern Brazil: features and emplacement aspects. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 169, p. 59–72, 2008.

ANEXOS

# ANEXO A – Planilha com as informações dos pontos, coordenada, cotas altimétricas, amostras e técnica aplicada.

Local	Amostras	Cota	Lâmina	M E V	Datação U-Pb	D R X	Análise química (ICP-MS)	Proveniência	Litologia
SO01	SO01A	151m	Х	Х	Х				Vulcânica
SO02	SO02A	150m	Х	Х					Arenito
SO03	SO03A	139m	Х						Arenito
SO04	SO04A; SO04B; SO04C; SO04D	118m	Х				X		Vulcânica
SO05	SO05A	160m	Х						Arenito
SO06	SO06	151m	Х						Arenito
SO07	SO07	140m	Х			Х			Arenito
SO08	SO08A; SO08B	120m	Х				X		Derrame
SO09	SO09A; SO09B	148m	Х						Arenito
SO010	SO010A; SO010B; SO010C; SO010D	163m	Х			X		X	Arenito
SO011	SO011A; SO010B; SO011C	171m	Х				X		Derrame
SO012	SO012A; SO012B; SO012C	144m	Х	Х			X		Derrame
SO013	SO013A; SO013B; SO013C	161m	Х	Х			X		Derrame
SO014	SO014A; SO014B	170m	Х						Arenito
SO015	SO015A; SO015B; SO015C	169m	Х						Arenito
SO016	SO016	171m	Х			Х			Arenito
SO017	SO017A; SO017B	166m	Х						Arenito
Ponto de Controle	-	156m	-						Derrame
SO018	SO018A; SO018B	143m	Х				Х		Derrame

#### Evolução Geológica Da Paleoduna Santa Otília - Uruguaiana, Rs: Integração de Dados Petrográficos, Geoquímicos E Isotópicos

SO019	SO019A	146m	Х			Arenito
SO020	SO020A; SO020B; SO020C	124m	Х		Х	Derrame
SO021	SO021A; SO021B; SO021C	117m	Х		Х	Derrame
SO022	SO022A	140m	Х			Derrame