



ESTRATIGRAFIA E PETROFÍSICA DE ROCHAS VULCÂNICAS DA BASE DO GRUPO SERRA GERAL NA CALHA DE TORRES (RS)

INGRID MÜLLER MOHR

Porto Alegre

2023

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

INGRID MÜLLER MOHR

**ESTRATIGRAFIA E PETROFÍSICA DE ROCHAS VULCÂNICAS DA BASE DO
GRUPO SERRA GERAL NA CALHA DE TORRES (RS)**

Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia do 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 parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Evandro Fernandes de Lima

Coorientador: Prof. Dr. Lucas de Magalhães May Rossetti

Porto Alegre, 2023

CIP - Catalogação na Publicação

Mohr, Ingrid Müller
ESTRATIGRAFIA E PETROFÍSICA DE ROCHAS VULCÂNICAS DA
BASE DO GRUPO SERRA GERAL NA CALHA DE TORRES (RS) /
Ingrid Müller Mohr. -- 2023.
185 f.
Orientador: Evandro Fernandes de Lima.

Coorientador: Lucas de Magalhães May Rossetti.

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. Grandes Províncias Ígneas. 2. Litofácies
vulcânicas. 3. Reservatórios não concencionais. I. de
Lima, Evandro Fernandes, orient. II. de Magalhães May
Rossetti, Lucas, coorient. III. Título.

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

A COMISSÃO Examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso “**ESTRATIGRAFIA E PETROFÍSICA DE ROCHAS VULCÂNICAS DA BASE DO GRUPO SERRA GERAL NA CALHA DE TORRES (RS)**” elaborado por “**INGRID MÜLLER MOHR**” como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Comissão Examinadora:

Profª. Msc. Andrea Sander

Profª. Dra. Cassiana Roberta Lizzoni Michelin

Dr. Fernando Rodrigues Rios

Aos meus pais, pelo amor e apoio incondicional

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe Renate e meu pai Marco por tudo suporte e carinho nessa jornada, e todos os cachorros que fazem e fizeram parte da família, em especial a Mel, que também vai ter o diploma de geóloga.

Ao China e Lucas por todo ensinamento, suporte e parceria. Aos colegas da sala Nati, Vini e Carol, pelas ótimas conversas e pelos bons momentos de descontração e, em especial, ao Brose e Marcelo.

A todos os professores e professoras do curso, principalmente a Renata, Amanda e Frank por auxiliar no desenvolvimento do trabalho. Agradeço o professor Luiz Fernando De Ros pela disponibilidade do microscópio. Agradecimentos ao Prof. Dr. Wolfgang Dieter Kalkreuth e equipe pela disponibilização do testemunho de sondagem.

Aos amigos e amigas da graduação, sobretudo a Faixa 1 (Júlia e Emília), pelas loucuras e vivências.

Agradeço também o apoio financeiro do Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP e da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Como dizia meu grande amigo Freddie, *the show must go on!*

“O que sabemos é uma gota, o que ignoramos é um oceano”

- Isaac Newton

RESUMO

O crescente desenvolvimento de estudos de rochas vulcânicas no contexto de sistemas petrolíferos em bacias vulcanossedimentares está em uma constante evolução. A análise do sistema permo-poroso em litotipos vulcânicos é essencial para a caracterização de reservatórios atípicos de hidrocarbonetos e da rocha selante. Este trabalho analisou a estratigrafia, petrofísica e petrologia de rochas vulcânicas da Formação Torres em um testemunho de sondagem perfurado no município de Osório e de afloramentos situados no nordeste do RS. A área de estudo pertence ao Grupo Serra Geral (132 – 134 Ma) da Província Ígnea do Paraná, sendo constituído por rochas vulcânicas e hipabissais de afinidade toleítica sobrepostas aos arenitos da Formação Botucatu. Na Calha de Torres, parte sul da Província, o Grupo Serra Geral foi estratigraficamente dividido em quatro formações (Torres, Vale do Sol, Palmas e Esmeralda). Desse modo, para construir o arcabouço estratigráfico no nordeste do RS foram confeccionadas 17 seções colunares em cinco municípios, com a finalidade de caracterizar as litofácies vulcânicas e suas associações. Identificou-se 12 litofácies em campo. Basalto amigdaloidal (Bam), Basalto vesiculado em *layering* (Blv), Basalto com colunata (Bc), Basalto maciço (Bm), Basalto com entablamento (Be), Basalto com *pipe vesicles* (Bpi), Basalto vesiculado (Bv), Basalto com disjunções colunares (Bdj) são as litofácies vulcânicas básicas. O topo dos derrames é formado por Bam, Bvl e Bv, o núcleo compreende em Bc, Bm e Be, e a base é composta por Bpi. A Bdj indica uma intrusão. Brecha basáltica matriz arenosa superior (BBma[s]) e brecha basáltica matriz arenosa inferior (BBma[i]) consistem nas litofácies vulcanoclásticas, correspondendo a peperitos. Arenito com estratificação cruzada tangencial (Act) e arenito com estratificação plano-paralelo (App) são as litofácies siliciclásticas. A Act corresponde a duna eólica e a App indica lençol de areia. No testemunho definiu-se quatro litofácies: Basalto porfirítico vesiculado (Bpv), Basalto porfirítico maciço (Bpm), Basalto porfirítico com estruturas de segregação (Bps) e Basalto porfirítico amigdaloidal (Bpam). As litofácies Bpv, Bpm e Bps consistem em um derrame *sheet pahoehoe*. As litofácies Bpv, Bpm, Bps e Bpam são interpretadas como derrames compostos do tipo *hummocky pahoehoe*. As rochas vulcânicas do testemunho apresentam, petrograficamente, textura porfirítica e glomeroporfirítica (fenocristais de plagioclásio e piroxênio) imersos em uma matriz afanítica a fanerítica fina composta por plagioclásio, orto e clinopiroxênio. A análise geoquímica de rocha total por ICP constatou que as litofácies do testemunho são classificadas no TAS como andesito basáltico, andesito e traquiandesito basáltico. As litofácies do testemunho apresentam valores de microporosidade muito baixo, variando de 0,1 a 0,4%, sendo a microporosidade dominante do tipo secundária, representada principalmente pelo tipo intra-cristal. Os ensaios petrofísicos demonstraram uma baixa porosidade, entre 0,38% a 4,8%, sendo a litofácies Bpam com os maiores valores de porosidade. O restante das litofácies apresentam valores <1%. A permeabilidade é basicamente nula em todos os casos. No aspecto da densidade, as litologias maciças são mais densas e as com amígdalas/vesículas tendem a ser relativamente menos densas. A integração dos dados possibilitou gerar um modelo análogo para reservatórios não convencionais de óleo e gás, bem como aprofundar o entendimento de sequências vulcânicas em Grandes Províncias Ígneas.

Palavras-Chave: litofácies vulcânicas, Grandes Províncias Ígneas, reservatórios não convencionais.

ABSTRACT

The growing development of studies of volcanic rocks in the context of petroleum systems in volcanic sedimentary basins is in constant evolution. The analysis of the permo-porous system in volcanic lithotypes is essential for the characterization of atypical reservoirs of hydrocarbons and caprocks. This work analyzed the stratigraphy, petrophysics and petrology of volcanic rocks from the Torres Formation in a core drilled in Osório city and outcrops located in the northeast of RS. The study area belongs to the Serra Geral Group (132 – 134 Ma) of the Igneous Province of Paraná, consisting of volcanic and hypabyssal rocks of tholeiitic affinity superimposed on the sandstones of the Botucatu Formation. In Calha de Torres, southern part of the Province, the Serra Geral Group was stratigraphically divided into four formations (Torres, Vale do Sol, Palmas and Esmeralda). Thus, to build the stratigraphic framework in the northeast of RS, 17 columnar sections were made in five municipalities, with the purpose of characterizing the volcanic lithofacies and their associations. Twelve lithofacies were identified in the field. Amygdaloidal basalt (Bam), basalt vesiculated in layering (Blv), basalt with colonnade (Bc), massive basalt (Bm), basalt with entablature (Be), basalt with pipe vesicles (Bpi), basalt vesiculated (Bv), basalt with columnar disjunctions (Bdj) are the basic volcanic lithofacies. The top of the flows is formed by Bam, Bvl and Bv, the core comprises Bc, Bm and Be, and the base is composed by Bpi. The Bdj indicates an intrusion. Upper sandy matrix basaltic breccia (BBma[s]) and lower sandy matrix basaltic breccia (BBma[i]) consist of volcanoclastic lithofacies, corresponding to peperites. Sandstone with tangential cross bedding (Act) and sandstone with plane-parallel bedding (App) are the siliciclastic lithofacies. Act corresponds to eolic dune and App indicates sand sheet. Four lithofacies were defined in the core: vesiculated porphyritic basalt (Bpv), massive porphyritic basalt (Bpm), pophyritic basalt with segregation structures (Bps) and amygdaloidal porphyritic basalt (Bpam). The Bpv, Bpm and Bps lithofacies consist of a sheet pahoehoe flow. The lithofacies Bpv, Bpm, Bps and Bpam are interpreted as hummocky pahoehoe. The volcanic rocks of the core present, petrographically, porphyritic and glomeroporphyritic texture (plagioclase and pyroxene phenocrysts) immersed in a fine aphanitic to phaneritic matrix composed of plagioclase, ortho and clinopyroxene. Geochemical analysis of whole rock by ICP found that the lithofacies of the core are classified in TAS as basaltic andesite, basaltic andesite and trachyandesite. The lithofacies of the core present very low microporosity values, ranging from 0.1 to 0.4%, with the dominant microporosity being of the secondary type, represented mainly by the intra-crystal type. The petrophysical tests showed a low porosity, between 0.38% and 4.8%, with the Bpam lithofacies having the highest porosity values. The remaining lithofacies have values <1%. Permeability is basically zero in all cases. In terms of density, massive lithologies are denser and those with amygdalas/vesicles tend to be relatively less dense. Data integration made it possible to generate an analogous model for unconventional oil and gas reservoirs, as well as to deepen the understanding of volcanic sequences in Large Igneous Provinces.

Keywords: volcanic lithofacies, Large Igneous Provinces, unconventional reservoirs.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da área de estudo, em destaque os afloramentos e o furo de sondagem (Fonte: mapa base <i>Open Street Map</i>).....	25
Figura 2 - Distribuição global das <i>LIPs</i> com idades inferiores a 320 Ma. Incluindo idades do início da atividade principal do magmatismo. Abreviações: CAMP-Central Atlantic magmatic province; EUNWA-European, northwest Africa; <i>ALIP</i> -High Arctic large igneous province; NAIP-North Atlantic igneous province; OJP-Ontong Java Plateau; RT-ST-Rajmahal Traps–Sylhet Traps; SRP—Snake River Plain; KCA-Kennedy- Connors-Auburn (Fonte: extraído de Rossetti, 2018; modificado de Bryan and Ernst, 2008).....	27
Figura 3 - Classificação de <i>LIPs</i> (Fonte: traduzido de Bryan & Ernst, 2008).	28
Figura 4 - Mapa da Província Ígnea Paraná-Etendeka com suas grandes estruturas representadas (arcos e sinclinal) (Fonte: modificado de Rossetti <i>et al.</i> , 2018).....	29
Figura 5 – Síntese das divisões estratigráficas das rochas vulcânicas do Serra Geral no sul da Província (Fonte: modificado de Rossetti <i>et al.</i> , 2018).	30
Figura 6 - A) Mapa da distribuição das Formações do GSG. B) Distribuição estratigráfica do GSG (Fonte: modificado de Rossetti <i>et al.</i> , 2018).....	32
Figura 7 - Coluna estratigráfica esquemática das Formações do GSG (Fonte: traduzido de Rossetti <i>et al.</i> , 2018).....	32
Figura 8 - A) Estruturação interna de derrame <i>pahoehoe</i> (Fonte: traduzido de Nelson <i>et al.</i> , 2009). B) Feições em corda na superfície de derrame <i>pahoehoe</i> (Fonte: extraído do Google Imagens). C) Base de derrame <i>pahoehoe</i> , marcado por vesículas do tipo <i>pipe</i> (Bvp – basalto vesicular com <i>pipe vesicles</i>) (Fonte: extraído de Barreto <i>et al.</i> , 2014).	35
Figura 9 - Modelo genérico de colocação de derrames <i>pahoehoe</i> inflados. A) lobo de lava pouco espesso se coloca na superfície, imediatamente a porção externa da lava resfria formando uma crosta isolante. B) a alimentação interna continua da lava promove a inflação e espessamento e o lobo de lava avança por uma nova frente de lava (lava <i>breakout</i>). C) com a parada no suprimento de lava, o derrame estagna e resfria, neste estágio ocorre a segregação de voláteis aprisionados nas porções internas da lava. D) derrame solidificado e resfriado (Fonte: extraído de Rossetti, 2018; modificado de Thordarson & Self 1998).	35
Figura 10 – Modelo esquemático da arquitetura de derrames do tipo <i>ponded</i> (Fonte: Traduzido de Kale <i>et al.</i> , 2022).....	36
Figura 11 - A) Estruturação interna de derrame 'a'a (Fonte: extraído de Rossetti, 2018; modificado de Lockwood & <i>LIP</i> man, 1980). B) Crosta externa de derrame 'a'a (Fonte: extraído do Google Imagens).	37
Figura 12 - Classificação de derrames básicos subaéreos com base na morfologia (Fonte: extraído de Barreto, 2016, traduzido de Duraiswami <i>et al.</i> , 2014).....	38

Figura 13 - Morfologia dos fragmentos juvenis encontrado em peperitos, termos utilizado para referir-se ao empacotamento e processos que envolvem água que atuam durante a interação entre magmas/lavas e sedimentos úmidos e inconsolidados (Fonte: extraído de Cruz, 2019; modificado de Skilling <i>et al.</i> , 2002).....	39
Figura 14 - Exemplo de peperito no norte da PIPE. A) Arenito de granulação muito fina com estratificação cruzada de baixo ângulo com clastos vulcânicos juvenis de forma ameboide. B) Contato da camada peperítica com o derrame 1 (Fonte: traduzido de Machado <i>et al.</i> , 2015).	40
Figura 15 - Desenho esquemático de campos de derrames em vista transversal. A) compostos, I e II. B) derrames simples I, II e III (Fonte: extraído de Rossetti (2018), adaptado de Walker, 1973).	43
Figura 16 - Arquitetura de fácies em Províncias Basálticas Continentais (Fonte: extraído de Rossetti, 2018; adaptado de Jerram 2002, e Millett <i>et al.</i> 2014).....	43
Figura 17 - Arquitetura de fácies vulcânicas descritas por Waichel <i>et al.</i> , (2012) na calha de Torres.	44
Figura 18 - Diferença no padrão permo-poroso dos derrames. Fonte: traduzido de Planke <i>et al.</i> , (2021).	45
Figura 19 - Seção geológica esquemática da Bacia do Parnaíba. Em vermelhos diques e soleiras de basaltos/diabásio (Fm. Mosquito e Sardinha) intrudindo as rochas geradoras, Fm. Pimenteiras (Devoniano) e Tianguá (Siluriano). Fonte: modificado de Góes <i>et al.</i> , (1994)...	48
Figura 20 - Seção geológica esquemática da Bacia do Solimões. Fonte: modificado de Eiras, 1996.	49
Figura 21 - Perfis de rocha ígnea do Campo petrolífero de Badejo. Fonte: modificado após Guardado <i>et al.</i> , 1989.	51
Figura 22 - Seção geológica do reservatório de gás de Barra Bonita (Fonte: modificado após Eiras e Filho, 2003).....	52
Figura 23 - Seção geológica esquemática com o modelo do principal mecanismo de trapeamento para acumulação comercial de gás. As soleiras de diabásio criam estruturas de fechamento e selam as acumulações de gás nos estratos sedimentares. Fonte: Miranda <i>et al.</i> , 2018.....	53
Figura 24 - Mapa geológico com a localização dos afloramentos e do furo de sondagem (Fonte: do autor).	55
Figura 25 - Modelo utilizado para as litofácies (Fonte: modificado de Mcphie <i>et al.</i> , 1993). .	56
Figura 26 - Planilha utilizada para o levantamento estratigráfico em campo (Fonte: do autor).	57
Figura 27 - Diagrama esquemático de um ICP-OES (Fonte: traduzido de Sneddon & Vincent, 2008).	60

Figura 28 - Sistemas introdução da amostra no plasma (1) e o diagrama esquemático de um ICP-MS (2). As linhas pontilhadas representam a amostra introduzida na forma de vapor e as linhas cheias na forma de aerossol (Fonte: extraído de Pierre, 2004).....	60
Figura 29 - Interface do programa Petrograph com diagramas de classificação litoquímica (Fonte: Petrelli <i>et al.</i> , 2005).....	61
Figura 30 - Exemplo do equipamento utilizado para medição da porosidade e permeabilidade (Fonte: Turnadge <i>et al.</i> , 2018).	62
Figura 31 - Basalto com disjunções colunares (Bdj) típicas de intrusão na Pedreira São Joaquim (Fonte: do autor).....	66
Figura 32 - Litofácies vulcânicas identificadas no campo. A) Morro das Furnas, próximo a seção 23-IM-09, destacando a litofácies Bc (Basalto com colunatas). B) Escada do Saltinho (23-IM-10), colunata em formato hexagonal. C) Escada do Saltinho (23-IM-10), colunata em forma de quadrado. D) Disjunções tabulares (estruturas em cinzel) na seção 23-IM-09. Fonte: do autor.	67
Figura 33 - Litofácies vulcânicas identificadas no campo. A) Núcleo maciço de derrame <i>pahoehoe</i> (Bm) na Pedreira São Joaquim. B) Topo amigdaloidal de derrame <i>pahoehoe</i> (Bam) na Escada do Saltinho (23-IM-10). C) Topo vesiculado e derrame <i>pahoehoe</i> (Bam) na Escada do Balcão e Pesqueiro Feio (23-IM-11). D) Topo com vesiculação em <i>layering</i> (Bvl) na Pedreira Morro Alto. E) Base de derrame com entablamento (Be) na Cascata do Chuvisqueiro. Fonte: do autor.	68
Figura 34 - Litofácies vulcânicas identificadas no testemunho de sondagem. Basalto porfirítico vesiculado (Bpv). Basalto porfirítico maciço (Bpm). Basalto porfirítico com estruturas de segregação (Bps). Basalto porfirítico amigdaloidal (Bpam). Fonte: do autor.	68
Figura 35 - Litofácies vulcanoclásticas (superior) e siliciclásticas (inferior) identificadas no campo. A) Peperito inferior (BBma[i]), com proporção de fragmentos vulcânicos maior que matriz sedimentar, no Morro do Farol (23-IM-19). B) Peperito superior (BBma[s]), com proporção de fragmentos vulcânicos similar à matriz sedimentar, no Morro do Farol (23-IM-19). C) Lençol de areia (App) no Morro do Farol (23-IM-20). D) Duna eólica (Act) na Torre da Guarita (23-IM-17). Fonte: do autor.	69
Figura 36 - Características da litofácies Bpv (Fonte: autor).....	70
Figura 37 - Características da litofácies Bpm (Fonte: autor).....	71
Figura 38 - Características da litofácies Bps (Fonte: autor).....	71
Figura 39 - Características da litofácies Bpam (Fonte: autor).....	72
Figura 40 - Seção colunar do testemunho de sondagem, evidenciando as litofácies descritas (Fonte: autor).....	73
Figura 41 – A) Derrame <i>sheet pahoehoe</i> com uma estrutura tripartida de crosta vesicular inferior (LVC), núcleo de lava (LC) e crosta vesicular superior (UVC). B) Detalhe da LVC, com	

pipe vesicles. C) Detalhe da UVC, com vesículas em <i>layering</i> . Todas as figuras foram extraídas de Rossetti <i>et al.</i> , 2019.....	74
Figura 42 – A) Seção do afloramento evidenciando o contato entre os arenitos da Formação Botucatu e derrame <i>hummocky pahoehoe</i> da Formação Torres. Localização: 29° 52.652' S, 50° 23.688' W. B) Lobos recobertos por arenito da Fm. Botucatu. C) Crosta superior vesiculada em <i>layering</i> e com borda oxidada. Todas as figuras foram extraídas de Rossetti <i>et al.</i> , 2018.....	75
Figura 43 - Perfil esquemático da morfologia dos derrames e da associação das litofácies (Fonte: autor).....	76
Figura 44 - Modelo de <i>emplacement</i> dos derrames descritos no testemunho de sondagem (Fonte: modificado de Duraiswamy <i>et al.</i> , 2014).	77
Figura 45 - Seção colunar da cava inferior (à esquerda) e da cava superior (no meio e à direita) da Pedreira Morro Alto (Fonte: autor).	79
Figura 46 - Cava inferior da Pedreira Morro Alto. A) Derrame 1, aspecto do núcleo maciço (Bm). B) Base do derrame 1, basalto amigdaloidal (Bam) intensamente intemperizado. (Fonte: autor).	80
Figura 47 - A) Vista da cava superior, bancada inferior da Pedreira Morro Alto. B) Modelo esquemático da figura A, evidenciando os lobos do derrame 2 e o derrame 3 (Fonte: autor).	81
Figura 48 - A) Vista da cava superior, bancada superior da Pedreira Morro Alto. B) Base do derrame 4, basalto amigdaloidal. C) Núcleo do derrame 4, basalto maciço. D) Topo do derrame 4, basalto vesiculado do tipo <i>layering</i> (Fonte: autor).	82
Figura 49 - Seção colunar da Pedreira São Joaquim (Fonte: autor).....	83
Figura 50 - Xenólito na soleira da Pedreira São Joaquim. B) Detalhe do arenito maciço silificado. C) Aspecto vítreo da borda do xenólito. (Fonte: autor).	84
Figura 51 - A) Derrame <i>pahoehoe</i> tabular na Pedreira São Joaquim. B) Topo amigdaloidal do derrame. C) Núcleo maciço do derrame. (Fonte: autor).	84
Figura 52 - Cascata do Chuvisqueiro. A) Seção colunar. B) Fotografia geral da Cascata, evidenciando o contato abrupto da Fm. Botucatu com a Fm. Torres (Fonte: autor).	85
Figura 53 - Cascata Três Quedas. A) Seção colunar. B) Fotografia geral da Cascata, evidenciando as colunatas (Fonte: autor).	86
Figura 54 - Cascata do Ressaco. A) Seção colunar. B) Fotografia geral da Cascata, evidenciando o aspecto maciço da rocha (Fonte: autor).	87
Figura 55 - Correlação das associações de litofácies identificadas na região de Riozinho-Terra de Areia (Fonte: autor).....	88
Figura 56 - Modelo de <i>emplacement</i> para os derrames observados nas Cascatas Chuvisqueiro, Três Quedas e Ressaco (Fonte: modificado de Waichel <i>et al.</i> , 2008).....	89

Figura 57 - Localização das seções colunares realizadas na praia de Torres (Fonte: modificado de Petry <i>et al.</i> , 2005). A) Morro das Furnas, parte sul (Fonte: do autor). B) Morro do Farol (Fonte: do autor). C) Morro das Furnas (Fonte: BRGeo). D) Torre da Guarita (Fonte: BRGeo). E) Torre Sul (Fonte: BRGeo).....	90
Figura 58 - Estratigrafia da sequência vulcânica dos afloramentos em Torres. Numeração dos perfis de acordo com a Figura 57. Fonte: do autor.....	94
Figura 59 - Modelo de <i>emplacement</i> das rochas vulcânicas na Praia de Torres.....	96
Figura 60 - Fotomicrografias da mineralogia e texturas gerais. A e B) Textura porfírica e glomeroporfírica, evidenciada por fenocristais de plagioclásio. C e D) Textura holocristalina, com um fenocristal de plagioclásio no centro da figura. E e F) Textura hipocristalina. Vidro do tipo sideromelano (avermelhado) à esquerda da lâmina. Vidro do tipo taquilito (preto), à direita da lâmina. G e H) Amígdalas preenchidas por zeolita. Nicóis paralelos (II) e Nicóis perpendiculares (+). (Fonte: autor).	99
Figura 61 - Fotomicrografias da mineralogia e texturas específicas. A e B) Textura subofítica, evidenciada por cristais de plagioclásio parcialmente inclusos em cristais de piroxênios. C e D) Textura coronítica, coroa de reação de um clinopiroxênio envolvendo um núcleo de ortopiroxênio. E e F) Cristal de ortopiroxênio com hábito esquelético. G e H) Textura intergranular, espaços entre os cristais de plagioclásios são ocupados por clinopiroxênio. Nicóis paralelos (II) e Nicóis perpendiculares (+). (Fonte: autor).....	100
Figura 62 - Fotomicrografias das alterações. A e B) Aspecto “serpentinizado” do cristal de ortopiroxênio. C e D) Iddingsita, bordeando cristal de ortopiroxênio. E e F) Uralitização, transformação de um ortopiroxênio em um anfibólio, provavelmente em actinolita. G e H) Argilização em cristais de plagioclásio. Nicóis paralelos (II) e Nicóis perpendiculares (+). (Fonte: autor).....	101
Figura 63 - Distribuição das composições em diagrama de classificação de SiO ₂ versus álcalis (TAS – Le Maitre, 1989). Quadrados verdes = dados deste trabalho; Círculos Vermelhos = dados de Rossetti <i>et al.</i> , (2019).	102
Figura 64 - Diagramas mostrando a variação dos elementos maiores com a profundidade no furo de sondagem (Fonte: autor).....	103
Figura 65 – Proporção de minerais normativos para as amostras do testemunho de sondagem, segundo o cálculo da norma CIPW.....	103
Figura 66 - Fotomicrografias da microporosidade. A) Microporosidade secundária do tipo intracristal em clinopiroxênio. B) Microporosidade secundária do tipo intra-cristal em ortopiroxênio. C e D) Microporosidade secundária do tipo fratura. E e F) Microporosidade secundária residual (<i>drusy</i>) em uma amígdala. Nicóis paralelos (II). (Fonte: autor).....	105
Figura 67 - Gráfico comparando os resultados obtidos neste trabalho com análises petrofísicas da Fm. Torres (Fonte: autor).....	107

Figura 68 - Variação da porosidade em profundidade no testemunho (Fonte: autor).	108
Figura 69 - Gráfico comparando os resultados obtidos neste trabalho com estudo de rochas reservatório vulcânicas (Fonte: autor).	109
Figura 70 - Gráfico comparando os resultados obtidos neste trabalho com estudo de rochas selantes (Fonte: autor).	109
Figura 71 - Modelo esquemático relacionando as litofácies descritas no testemunho, as variações das propriedades petrofísicas no perfil e a caracterização da sequência vulcânica no sistema petrolífero, atuando como um horizonte selante (Fonte: autor).	110

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Características físicas, arquitetura de fácies e petrografia das Formações do GSG (Fonte: traduzido de Rossetti <i>et al.</i> , 2018).	33
Quadro 2 - Processos primários e secundários e a sua porosidade resultante em rochas vulcânicas (Sruoga & Rubinstein, 2007).	46
Quadro 3 - Tipos de querogênio e material fonte (McCarthy <i>et al.</i> , 2011).	48
Quadro 4 - Nível de maturação térmica.	49
Quadro 5 - Valores de porosidade em percentual (%) e de permeabilidade em milidarcy (mD) que qualificam um reservatório de óleo de acordo com Hyne (2012).	50
Quadro 6 - Descrição e interpretação das litofácies identificadas no campo e no testemunho.	64
Quadro 7 - Descrição e interpretação das litofácies da sucessão vulcânica do testemunho.	74
Quadro 8 - Análise da microporosidade em lâmina delgada.	104
Quadro 9 - Resultados da análise de porosímetro, permeâmetro e densidade.	106
Quadro 10 - Síntese dos padrões petrofísicos identificados nas litofácies e associações.	111

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

Act – Arenito com estratificação Cruzada Tangencial

App – Arenito com estratificação Plano-Paralela

Bam – Basalto Amigdaloidal

BBma[i] – Brecha basáltica com matriz arenosa inferior

BBma[s] – Brecha basáltica com matriz arenosa superior

Bc – Basalto com Colunatas

Bdj – Basalto com Disjunção Colunar

Be – Basalto com Entablamento

Bm – Basalto Maciço

Bpam – Basalto Porfirítico Amgdaloidal

Bpi – Basalto com *Pipe vesicles*

Bpm – Basalto Porfirítico Maciço

Bps – Basalto Porfirítico com estruturas de Segregação

Bpv – Basalto Porfirítico Vesiculado

Bv – Basalto Vesiculado

Bvl – Basalto Vesiculado em *Layering*

FE – Formação Esmeralda

Fm - Formação

FP – Formação Palmas

FT – Formação Torres

FVS – Formação Vale do Sol

Gr – Grupo

GSG – Grupo Serra Geral

LIP – Large Igneous Province

m – metros

PCB – Província Basáltica Continental

PIPE – Província Ígnea Paraná-Etendeka

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
1.1 Caracterização do Problema.....	20
1.2 Premissas e Hipóteses	21
1.3 Justificativa	22
1.4 Objetivos	23
1.5 Localização da Área de Estudo.....	24
2 ESTADO DA ARTE	26
2.1 Grandes Províncias Ígneas.....	26
2.1.1 Província Ígnea Paraná-Etendeka	28
2.1.2 Grupo Serra Geral	30
2.2 Caracterização de derrames básicos subaéreos	34
2.2.1 Derrames <i>Pahoehoe</i>	34
2.2.2 Derrames 'a'a	36
2.2.3 Derrames Transicionais	37
2.3 Peperitos.....	38
2.4 Estratigrafia de Rochas Vulcânicas.....	40
2.4.1 Conceito de Fácies	41
2.4.2 Arquitetura de fácies vulcânicas em PBC	42
2.5 Porosidade em depósitos vulcânicos	44
2.6 Sistemas Petrolíferos Ígneo-Sedimentares.....	47
2.6.1 Geração	47
2.6.2 Maturação	49
2.6.3 Rochas reservatório.....	50
2.6.4 Rochas selantes	52
2.6.5 <i>Traps</i>	53
3 MATERIAIS E MÉTODOS	54
3.1 Etapa Pré-Campo	54
3.1.1 Revisão Bibliográfica	54
3.1.2 Sensoriamento Remoto	54
3.2 Etapa de Campo	54
3.2.1 Seções Colunares.....	56
3.2.2 Amostragem e Aquisição Fotográfica	58
3.3 Etapa Pós Campo.....	58
3.3.1 Tratamento dos Dados de Campo	58

3.3.2	Preparação das Amostras	58
3.3.3	Petrografia	59
3.3.4	Aquisição e tratamento de dados geoquímicos	59
3.3.5	Ensaio Petrofísicos	61
3.3.6	Integração dos Dados	62
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
4.1	Estruturação interna e modelo de <i>emplacement</i>	63
4.1.1	Osório	69
4.1.2	Pedreira Morro Alto.....	77
4.1.3	Pedreira São Joaquim	82
4.1.4	Cascatas em Riozinho e Terra de Areia	85
4.1.5	Torres	89
4.2	Petrografia da Fm. Torres	98
4.3	Geoquímica.....	102
4.4	Microporosidade.....	104
4.5	Petrofísica	106
4.6	Integração dos Dados	111
5	CONCLUSÃO	113
	REFERÊNCIAS	116
	APÊNDICES	125
	Apêndice A.....	125
	Apêndice B.....	126
	Apêndice C	140
	ANEXOS	151
	Anexo A	151
	Anexo B	154

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão abordados o problema principal do trabalho, as premissas e a hipótese, além da justificativa do projeto, objetivos gerais e específicos e localização da área de estudo.

1.1 Caracterização do Problema

A investigação de sequências vulcânicas em bacias vulcanossedimentares petrolíferas está em constante evolução. Neste contexto, as pesquisas têm revelado a necessidade de uma análise multidisciplinar, especialmente envolvendo as áreas da estratigrafia, petrologia, petrofísica e geoquímica. As rochas vulcânicas, no sistema petrolífero, podem atuar como rochas reservatórios, selantes, *traps* e auxiliar na maturação térmica da rocha geradora e na migração do hidrocarboneto. De acordo com Schutter (2003), existem mais de 300 bacias com reservatórios atípicos vulcânicos, espalhados em todo o planeta. Reservatórios vulcânicos associados às Grandes Províncias Ígneas podem ser localizados na Índia (*Deccan Traps*) e no Atlântico Norte.

As Grandes Províncias Ígneas (*Large Igneous Provinces - LIPs*) consistem em sucessões gigantescas de lavas, predominantemente toleíticas, colocadas em curtos períodos e recobrimo extensas áreas. Os estudos iniciais envolveram especialmente as características geoquímicas e geocronológicas das rochas vulcânicas. Recentemente, o desenvolvimento da análise estratigráfica oferece novas perspectivas na construção de arcabouços litoestratigráficos que auxiliam o entendimento da história evolutiva das *LIPs* (Self *et al.*, 1997; Jerram *et al.*, 2005; Lima *et al.*, 2012a, 2012b; Waichel *et al.*, 2012; Barreto, 2016; Rossetti *et al.*, 2018).

A Província Ígnea Paraná-Etendeka (PIPE) é uma *LIP* continental, também caracterizada como uma Província Basáltica Continental (PCB). Sua origem data do Cretáceo Inferior, antecedendo a ruptura do supercontinente Gondwana e abertura do oceano Atlântico Sul. A PIPE se situa majoritariamente na América do Sul e uma pequena porção na África. No Brasil, esse magmatismo é designado Grupo Serra Geral (132 – 134 Ma) e encontra-se na porção superior da Bacia do Paraná. O Grupo Serra Geral é formado por rochas vulcânicas e hipabissais de afinidade toleítica, além

de rochas ácidas. As rochas vulcânicas foram colocadas sobre os arenitos eólicos da Formação Botucatu. Na Calha de Torres, parte sul da Província, o Grupo Serra Geral foi estratigraficamente dividido em quatro formações, da base para o topo: Torres, Vale do Sol, Palmas e Esmeralda (Rossetti *et al.*, 2018).

O estágio inicial do vulcanismo em PCBs está associado às erupções transicionais a alcalinas de volume relativamente baixo em litologias expostas, incluindo sedimentos e, em alguns casos, interação com corpos d'água, com a distribuição dos derrames fortemente controlada pela topografia pré-existente (Ernst, 2014). O início do vulcanismo na Província Ígnea Paraná é marcado pela deposição da Fm. Torres, formada por derrames *pahoehoe* compostos, de composição basáltica a andesito basáltica (Rossetti *et al.*, 2018).

O estudo da petrofísica de sucessões vulcânicas é atualmente relevante na indústria de óleo e gás para a compreensão dos atributos de porosidade e permeabilidade nas rochas reservatórios e selantes. Como o sistema permo-poroso dos litotipos vulcânicos possui um elevado grau de heterogeneidade, torna-se necessário a construção de um arcabouço litoestratigráfico que identifique as oscilações destas propriedades.

A pesquisa compreende o estudo de rochas vulcânicas da Formação Torres, base do Grupo Serra Geral, em furo de sondagem perfurado no município de Osório e afloramentos na porção nordeste do Rio Grande do Sul (RS). Desse modo, é possível estabelecer litofácies vulcânicas observadas no testemunho e em afloramentos mapeados em campo a partir do levantamento de seções colunares, abordando aspectos estratigráficos, petrológicos e petrofísicos com o intuito de elaborar um modelo análogo para o estudo de reservatórios não-convencionais vulcânicos.

1.2 Premissas e Hipóteses

Tem-se como hipótese que os aspectos petrofísicos e a estratigrafia das rochas vulcânicas da Formação Torres são heterogêneos, visto que cada tipo de derrame da sucessão vulcânica apresenta características litológicas e morfologias distintas. Esta hipótese foi formulada a partir das seguintes premissas:

- Lavas básicas subaéreas foram classificadas em dois tipos principais (*end-members*), *pahoehoe* e 'a'a (MacDonald, 1953, Self *et al.*, 1997), conforme a morfologia externa (MacDonald, 1953) e estrutura interna dos derrames (Self *et al.*, 1997). Essas características permitem interpretar as condições de colocação dos derrames, paleotopografia em que se depositaram e taxa de efusão e reconstruir uma arquitetura com litofácies vulcânicas e estabelecer a história evolutiva do vulcanismo;
- A proposta litoestratigráfica de Rossetti *et al.* (2018) para as rochas vulcânicas do Grupo Serra Geral na Calha de Torres, sul do Brasil, identificou quatro formações, fundamentadas nos aspectos litológicos, morfologia dos derrames e atributos arquitetônicos de fácies;
- A geração da porosidade vulcânica primária em sistemas básicos decorre da ascensão do magma e *emplacement* na superfície, sendo caracterizada por vesículas e fraturas de resfriamento, e os processos secundários, originados após o resfriamento, representados por processos de dissolução, fraturamentos tectônicos e alteração/precipitação de fases minerais (Rossetti *et al.*, 2019);
- As propriedades petrofísicas de lavas basálticas variam significativamente de 1 a 60% em porosidade e de 0,0001 mD até 10 D (*Darcy*) em permeabilidade. Os topos de derrames apresentam alta porosidade, desenvolvida por bolhas de gás solidificadas (vesículas) junto com brechas e fraturas, formam as melhores unidades de reservatório (porosidade geralmente 25-45%). Enquanto núcleos maciços dos derrames têm características de selos (porosidade geralmente 0-8%). A suscetibilidade do basalto fresco à alteração e mineralização muitas vezes leva à obliteração progressiva das propriedades petrofísicas do reservatório com o aumento da profundidade dentro das sequências vulcânicas (Planke *et al.*, 2021).

1.3 Justificativa

A investigação de sistemas vulcânicos como os das *LIPs* raramente busca integrar dados de subsuperfície com os de superfície e desta forma estabelecer vínculos entre as litofácies e os padrões permo-porosos. A integração entre esses contextos distintos deve aprofundar o conhecimento sobre as sucessões vulcânicas e

correlação entre os tipos de derrames, estabelecer as condições de colocação da sequência vulcânica e identificar os padrões característicos do sistema permo-poroso. Desse modo, o estudo proposto para a Calha de Torres permite a correlação dos dados com outras situações descritas regionalmente.

O consumo mundial de hidrocarbonetos está em constante aumento, segundo o relatório da BP *Statistical Review of World Energy* de 2021, um terço do consumo da energia do mundo é representado pelo petróleo. Em 2019, o mundo consumiu 97,56 milhões de barris por dia (bpd) de petróleo. Isso foi mais de 1 milhão de bpd maior que o consumo em 2017. Com o intuito de suprir a alta demanda de hidrocarbonetos, é fundamental a busca de novas reservas. Os reservatórios encontrados em rochas ígneas, na maioria dos casos, foram descobertos por acaso, pois a indústria petrolífera julgava remota ou inexistente a possibilidade desse tipo de rocha conter petróleo e gás. A investigação das rochas da Fm. Torres a fim de elaborar um modelo análogo de reservatórios é relevante para aprimorar o entendimento de reservatórios não convencionais vulcânicos para hidrocarbonetos. O estudo integrado da estratigrafia associada aos padrões de porosidade dos derrames da Fm. Torres possibilita a caracterização vertical de litofácies vulcânicas, permitindo a criação de modelos análogos para este tipo de reservatórios.

A análise do sistema permo-poroso em rochas vulcânicas contribui para a melhor compreensão do armazenamento e fluxo da água em aquíferos fraturados, e do uso destas rochas para o armazenamento geológico de CO₂, que compreende uma consequência direta da diminuição do impacto ambiental antropológico ao clima e ao meio ambiente.

1.4 Objetivos

O objetivo deste trabalho é estabelecer a estratigrafia, petrologia e petrofísica da base da Formação Torres (Calha de Torres, RS), baseado na integração de dados de testemunho e afloramentos. Além disso, busca-se comparar esta ocorrência geológica com reservatórios não convencionais análogos.

Como objetivos específicos, destacam-se:

- Descrever e identificar litofácies vulcânicas do testemunho de sondagem e em afloramentos, para elaborar um arcabouço litoestratigráfico para cada contexto;
- Caracterizar a petrografia e geoquímica de elementos maiores dos derrames;
- Definir, qualificar e quantificar a microporosidade e a petrofísica destes derrames;
- Construir um modelo integrado dos dados estratigráficos, petrológicos e petrofísicos a partir destes dois contextos, superfícies (afloramentos) e, subsuperfície (furo de sondagem).

1.5 Localização da Área de Estudo

A área de estudo situa-se na porção nordeste do estado do Rio Grande do Sul, englobando um furo de sondagem e exposições de rochas. O furo de sondagem (CBM-02-ST-RS) foi realizado no município de Osório (29°51'1,945"S,50°13'39,602"O), perto da BR-101, entre as lagoas Pinguela e Peixoto. Os afloramentos se localizam nas cidades de Osório, Santo Antônio da Patrulha, Riozinho e Torres (Figura 1).

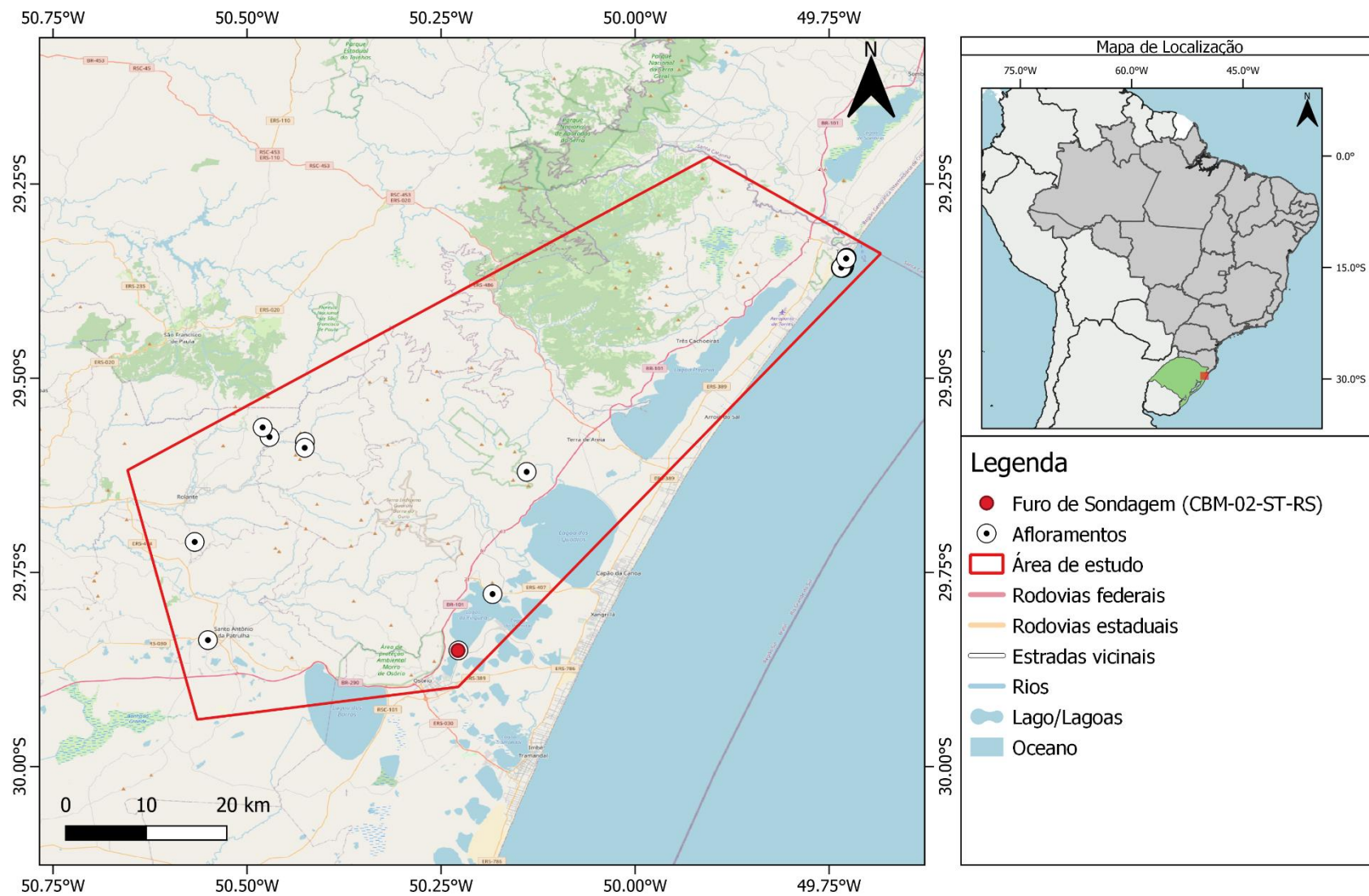


Figura 1 - Localização da área de estudo, em destaque os afloramentos e o furo de sondagem (Fonte: mapa base *Open Street Map*).

2 ESTADO DA ARTE

Este capítulo contemplo uma revisão dos conceitos sobre o contexto geológico regional e local da área em estudo, caracterização do Grupo Serra Geral, estratigrafia e padrões de porosidade em depósitos vulcânicos e sistemas petrolíferos ígneos-sedimentares, tópicos que auxiliaram na fundamentação teórica para o desenvolvimento do trabalho.

2.1 Grandes Províncias Ígneas

Desde o início da década de 90, estudos procuram definir e classificar Grandes Províncias Ígneas, referidas em inglês como *Large Igneous Provinces (LIPs)*. Coffin & Eldholm (1994) caracterizaram essas províncias como “qualquer atividade magmática anômala, onde grandes volumes de magmas, predominantemente basálticos, foram produzidos por mecanismos diferentes daquele responsável pela geração e espalhamento do assoalho oceânico” (pg. 1).

Bryan & Ernst (2008) revisitaram o conceito de *LIP* e sugerem que essas atividades magmáticas sejam definidas como “províncias magmáticas, predominantemente máficas, com área $> 0,1 \text{ Mkm}^2$, amplo volume de rochas ígneas ($> 0,1 \text{ Mkm}^3$), onde a maior concentração do volume de magma foi produzido em pulsos magmáticos de curta duração (1 - 5 Ma) e o evento como um todo não excedeu um tempo máximo de $\sim 50 \text{ Ma}$ ” (pg. 4). Porém, podem ocorrer de maneira subordinada termos ultramáficos e rochas ácidas, como pode ser observado em Bushveld (África) e Sierra Madre Ocidental (América do Norte), respectivamente.

As *LIPs* se distribuem em todos os continentes e oceanos, e ocorrem no registro geológico desde o Arqueano até o Cenozoico. Entretanto, a base de dados associado a essas manifestações magmáticas se restringe ao estudo de províncias datadas do Mesozoico e Cenozoico, nas quais o registro da extensão areal e volume são próximos dos originais e sua estruturação interna está mais bem preservada (Figura 2). As províncias Proterozoicas e Arqueanas são designadas como “remanescentes” ou “fragmentos” de *LIPs*, sendo identificadas por restos de basaltos continentais ou enxames de diques relacionados ao sistema alimentador das erupções (Ernst *et al.*, 2005).

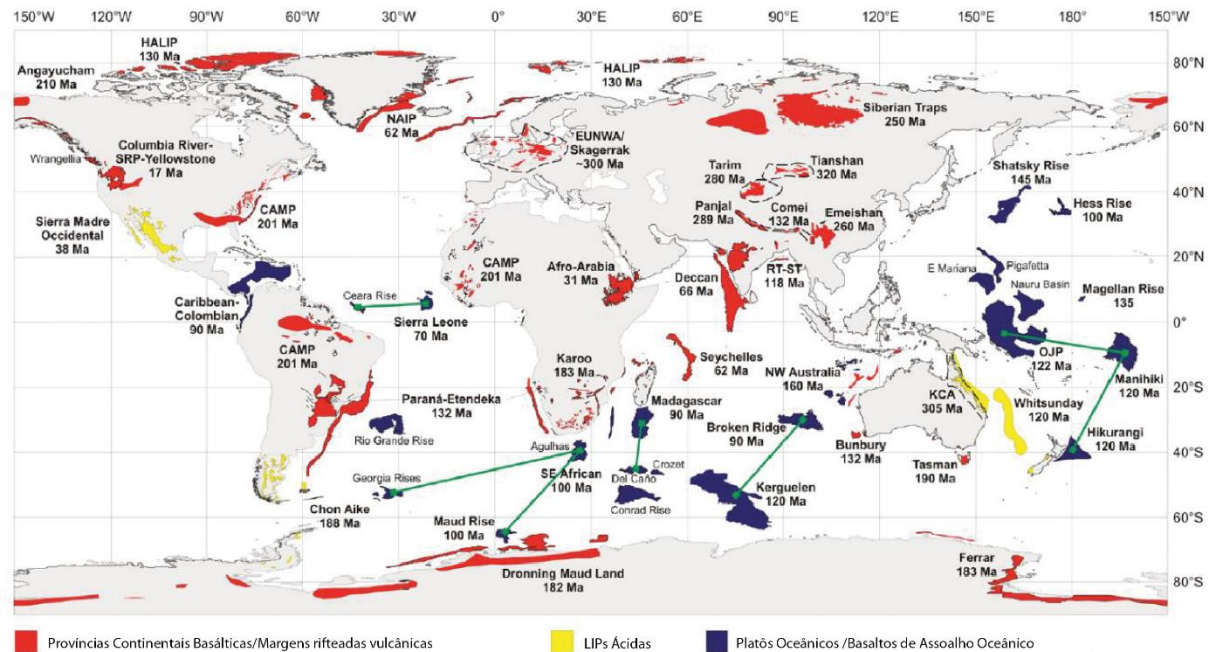


Figura 2 - Distribuição global das LIPs com idades inferiores a 320 Ma. Incluindo idades do início da atividade principal do magmatismo. Abreviações: CAMP-Central Atlantic magmatic province; EUNWA-European, northwest Africa; ALIP-High Arctic large igneous province; NAIP-North Atlantic igneous province; OJP-Ontong Java Plateau; RT-ST-Rajmahal Traps–Sylhet Traps; SRP—Snake River Plain; KCA-Kennedy- Connors-Auburn (Fonte: extraído de Rossetti, 2018; modificado de Bryan and Ernst, 2008).

Inicialmente, as LIPs foram classificadas em continentais e oceânicas (Coffin e Eldholm, 1994). A categorização sugerida por Bryan e Ernest *et al.* (2008) é fundamentada na composição geoquímica (básica ou ácida), na configuração do ambiente de colocação (continental ou oceânico), no tipo de rocha (vulcânicas ou intrusivas) e idade. Essa nova classificação consiste em duas grandes categorias, na qual: 1) LIPs oceânicas, são divididas em platôs oceânicos e basaltos de fundo oceânico; 2) LIPs continentais, divididas em províncias basálticas continentais, margens vulcânicas rifteadas, *greenstone belts* arqueanos, enxames de diques gigantes e complexos intrusivos máfico-ultramáficos, e grandes províncias ígneas ácidas (Figura 3).

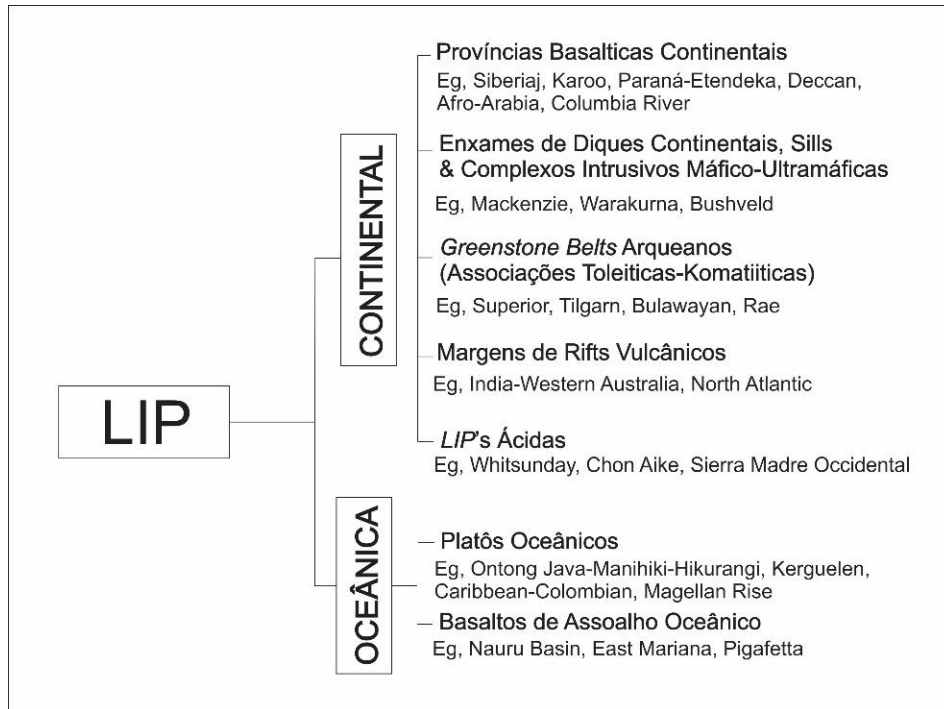


Figura 3 - Classificação de LIPs (Fonte: traduzido de Bryan & Ernst, 2008).

As Províncias Basálticas Continentais (PBCs), foco de estudo, são um tipo de LIP que representam significativos eventos magmáticos, formando imensos platôs dispostos em grandes áreas continentais em um intervalo relativamente curto de tempo (1-10 Ma), sendo relacionadas com anomalias termais localizadas no manto superior (Ernst & Buchan, 2003). A distribuição das PBCs ocorre em todos os continentes do globo, destacando-se as Províncias Columbia River, Deccan, Paraná-Etendeka, Karoo e *Siberian Traps* (Coffin & Eldhom, 1992, 1994; Bryan & Ernst, 2008). O magmatismo associado às PBCs apresenta afinidade predominantemente toleítica e composições basálticas, podendo ocorrer termos ácidos e/ou alcalinos em menor proporção.

2.1.1 Província Ígnea Paraná-Etendeka

A Província Ígnea Paraná-Etendeka (PIPE) é classificada como uma LIP continental, também caracterizada como uma PBC. A PIPE é considerada uma das grandes manifestações magmáticas do planeta. Representa um vasto vulcanismo de natureza fissural datado do Cretáceo Inferior, antecedendo a ruptura do supercontinente Gondwana e abertura do Oceano Atlântico Sul. Aproximadamente 90% do magmatismo está situado na América do Sul, cobrindo Argentina, Brasil,

Paraguai e Uruguai. O restante (10%) encontra-se na África, na Namíbia e Angola (Piccirillo & Melfi, 1988 *apud* Rossetti *et al.*, 2019; Peate, 1997, Figura 4). Na porção sul-americana, a província está localizada na Bacia do Paraná com uma área de 917.000 km² e volume de 600.000 km³ (Frank *et al.*, 2009), considerando rochas vulcânicas e intrusivas. A espessura média da pilha vulcânica é de 700 m, podendo atingir até 1.700 m de profundidade no centro da bacia. As rochas vulcânicas são datadas de 135 a 131 Ma, e o pico do magmatismo durou aproximadamente 1 Ma (Gomes e Vasconcelos, 2021).

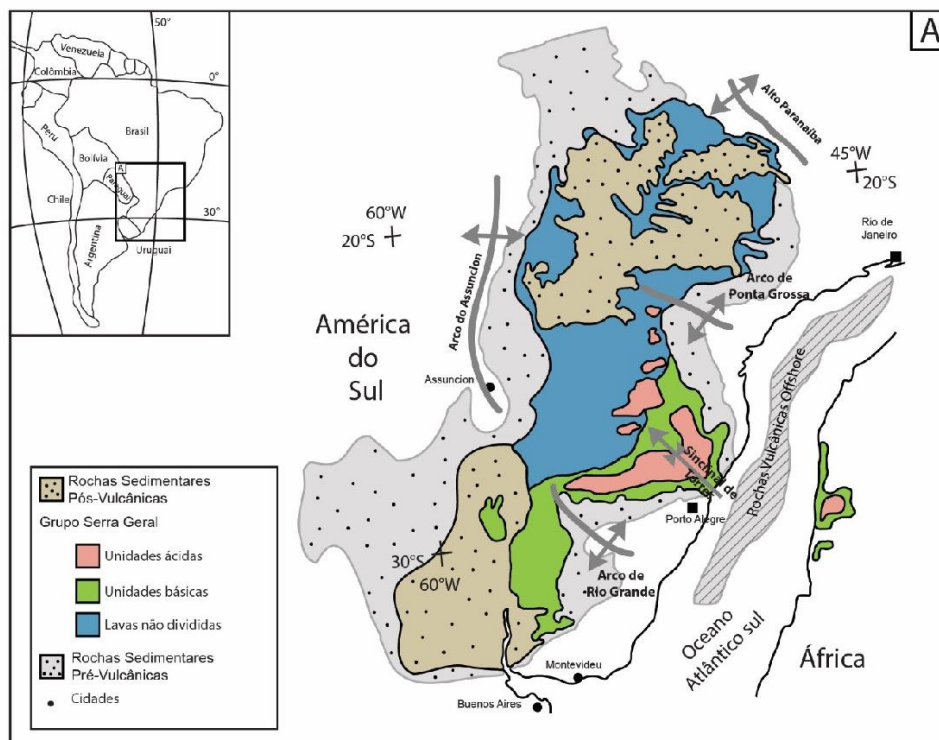


Figura 4 - Mapa da Província Ígnea Paraná-Etendeka com suas grandes estruturas representadas (arcos e sinclinal) (Fonte: modificado de Rossetti *et al.*, 2018).

A Bacia do Paraná, onde a PIPE está inserida no Brasil, consiste em uma bacia intracratônica com um total de 7.000 m de sedimentos e rochas vulcânicas acumuladas desde o Devoniano até o Neocretáceo. Milani (2007) estabeleceram seis supersequências deposicionais: Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico), Gondwana II (Meso a Neotriássico), Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo) e Bauru (Neocretáceo). O magmatismo do Paraná compreende o topo da sequência Gondwana III, uma supersequência vulcanossedimentar de idade Jurássica-Eocretácica, formada pelos sedimentos eólicos da Fm. Botucatu e as vulcânicas e intrusivas do Gr. Serra Geral.

2.1.2 Grupo Serra Geral

A PIPE é composta por rochas vulcânicas predominantemente basálticas e andesito basálticas de afinidade toleítica, e subordinadamente por riolitos e dacitos. No Brasil, esse magmatismo denominado originalmente de Formação Serra Geral por White (1908), foi geoquimicamente dividido com base no conteúdo de TiO_2 , em termos de alto titânio (>2%) e termos de baixo titânio (<2%) (Bellieni *et al.*, 1984; Mantovani *et al.*, 1985). Peate *et al.* (1992) subdividiram a sequência de rochas vulcânicas básicas em seis magma tipos, onde na província alto-Ti foram identificados magmas do tipo Paranapanema, Pitanga e Urubici, e na província baixo-Ti, os tipos Esmeralda, Gramado e Ribeira. A sucessão das rochas vulcânicas ácidas foi dividida em dois grandes grupos, fundamentada nos teores de elementos incompatíveis: Palmas, correspondendo a baixos teores de Ti e Chapecó, de alto-Ti.

Waichel *et al.* (2012) dividiram a sequência de baixo TiO_2 , na Calhas de Torres, em cinco episódios vulcânicos baseados na arquitetura e estruturas vulcânicas dos derrames. O episódio vulcânico básico I consiste em derrames compostos, sucedido por fluxos mais espessos e extensos em direção ao topo da sucessão de lava, agrupados no episódio vulcânico básico II. O episódio vulcânico básico III compreende unidades de lava 'a'a/*rubbly pahoehoe*. Identificaram-se dois episódios vulcânicos ácidos diferentes, o primeiro formado por fluxos em forma de domo (episódio vulcânico ácido I) e o segundo formado por extensas unidades de fluxo tabular (episódio vulcânico ácido II, Figura 5).



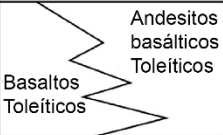
Bellieni <i>et al.</i> 1984		Peate <i>et al.</i> 1992		Waichel <i>et al.</i> 2012		Rossetti <i>et al.</i> 2018	
Platô Paraná		Formação Serra Geral	Esmeralda	Formação Serra Geral		Grupo Serra Geral	Formação Esmeralda
	Riolitos e Riodacitos		Palmas		Episódio vulcânico ácido II Episódio vulcânico ácido I		Formação Palmas
	Andesitos Toleíticos		Gramado		Episódio vulcânico básico III		Formação Vale do Sol
					Episódio vulcânico básico II		Formação Torres
					Basaltos Toleíticos		
Formação Botucatu							

Figura 5 – Síntese das divisões estratigráficas das rochas vulcânicas do Serra Geral no sul da Província (Fonte: modificado de Rossetti *et al.*, 2018).

Uma nova litoestratigrafia formal foi proposta por Rossetti *et al.* (2018), para a porção sul da PCB do Paraná fundamentada na morfologia e arquitetura dos derrames, no mapeamento dos aspectos físicos (contatos inferior e superior de cada unidade) e características petrográficas e geoquímicas (Figura 6). A proposta consistiu em elevar a Formação Serra Geral ao *status* de Grupo e dividir a sequência das rochas vulcânicas em quatro formações: Torres, Vale do Sol, Palmas e Esmeralda (Figura 7). Na base da pilha vulcânica, a Fm. Torres (FT) é constituída por basaltos e andesitos basálticos na forma de derrames *pahoehoe* compostos, sendo eles sobrepostos aos arenitos eólicos da Formação Botucatu. Recobrimo a Fm. Torres, a Fm. Vale do Sol (FVS) é composta por andesitos basálticos com morfologias do tipo *rubbly pahoehoe*. A Fm. Palmas (FP) agrupa domos de lavas, derrames tabulares e sistemas de alimentação complexos de composições dacíticas e riolíticas. No topo desta sequência aflora a Fm. Esmeralda (FE) com derrames *pahoehoe* simples e compostos, com morfologias similares às encontradas na Fm. Torres (Quadro 1).

Cruz (2019) correlacionou as formações do GSG com distintos estágios do vulcanismo. O primeiro estágio consiste na FT, que marca a fase inicial de colocação de lavas basálticas com baixas taxas de efusão. A FVS compreende no segundo estágio, representado o clímax da atividade vulcânica, evidenciada pelos derrames espessos do tipo *rubbly pahoehoe*. O terceiro estágio (FP) compreende na mudança composicional para lavas mais silicosas que se interdigitam com a FVS. O último estágio (FE) marca o declínio do vulcanismo, composta por lavas basálticas do tipo *pahoehoe*, similar a FT.

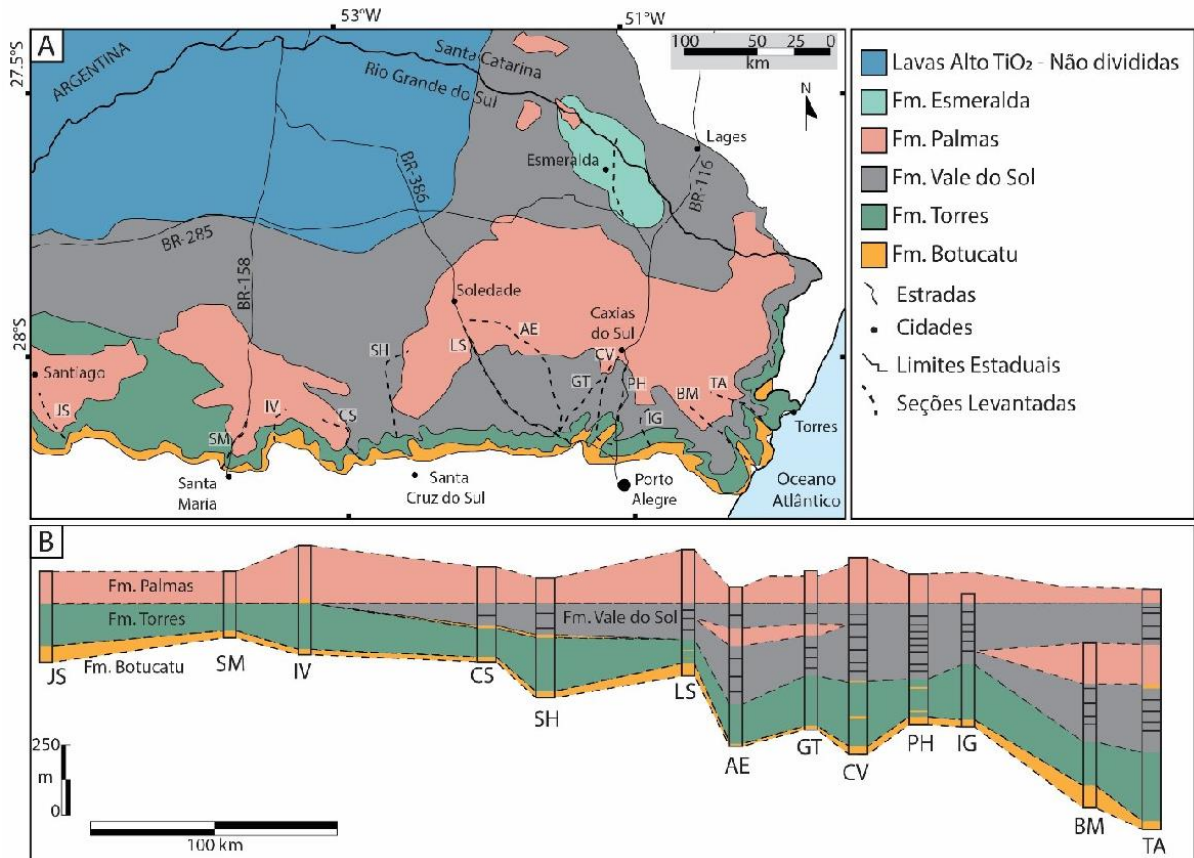


Figura 6 - A) Mapa da distribuição das Formações do GSG. B) Distribuição estratigráfica do GSG (Fonte: modificado de Rossetti *et al.*, 2018).

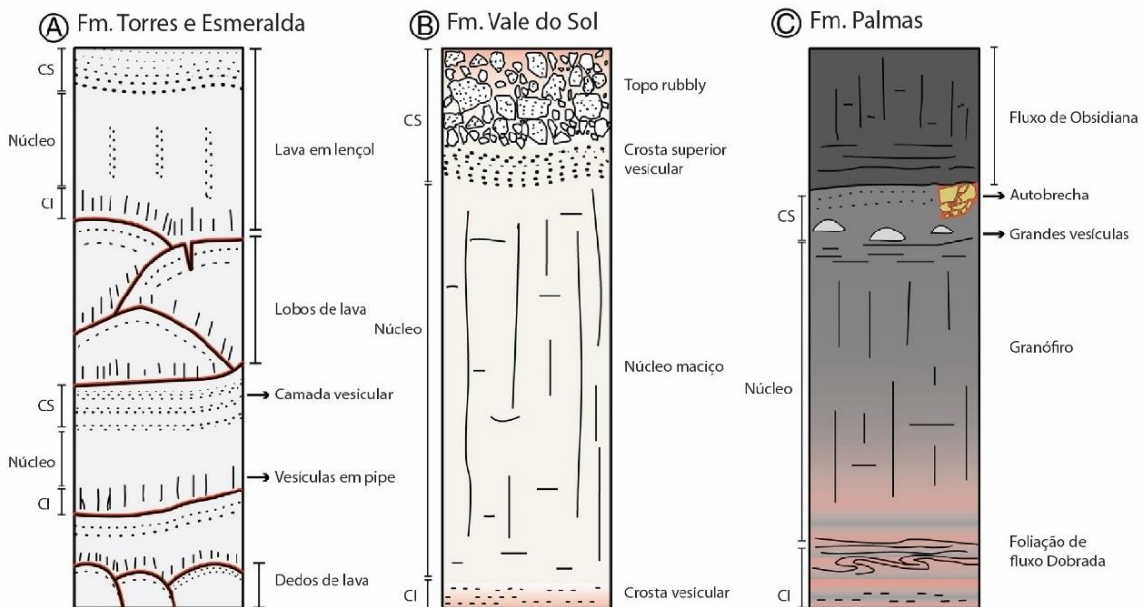


Figura 7 - Coluna estratigráfica esquemática das Formações do GSG (Fonte: traduzido de Rossetti *et al.*, 2018).

Quadro 1 - Características físicas, arquitetura de fácies e petrografia das Formações do GSG (Fonte: traduzido de Rossetti *et al.*, 2018).

Formação	Espessura da unidade / Espessura do derrame	Fácies de lava	Características físicas principais	Características petrográficas
Esmeralda	25-300 m 0,2-3 m	Composta anastomosada	Lobos de lava métrico com estrutura típica <i>pahoehoe</i> : crosta basal vesicular, núcleo maciço e crosta superior vesicular.	Afírico a afanítico basaltos escuros. Micrólitos de plagioclásio aciculares a esquelético, augita e óxidos de Fe. Matriz vítrea.
Palmas	40-400 m ?	Tabular clássica	Extensos derrames tabulares de dacitos, riolitos e obsidiana. Terminações lobadas, foliações de fluxo, porções de autobrechas, camadas de vesículas e megavesículas.	Textura vitrofírica, fenocristais de plagioclásio e augita, comumente textura granofírica com intercrescimento de K-feldspato e quartzo.
Vale do Sol	40-500 m 20-60 m	Tabular clássica	Geometria simples tabular de lavas <i>rubbly pahoehoe</i> . Estruturadas em 4 partes: crosta basal vesicular; núcleo maciço; crosta coerente vesicular; superfície <i>rubbly</i> .	Andesitos basálticos afanítico a fanerítico fino, raramente plagioclásio porfirítico. Plagioclásio fino com augita e óxidos de Fe intergranular.
Torres	100, 290 m 0,2-18 m	Composta anastomosada	Lobos e dedos de lava, e lobos em lençol. Estrutura típica de <i>pahoehoe</i> com: crosta basal com vesículas do tipo <i>pipe</i> , núcleo maciço, e crosta superior vesicular.	Basalto fanerítico médio com olivina ou plagioclásio porfirítico. Porfirítica a glomeroporfirítica, com plagioclásio, augita e óxidos de Fe, ± olivina.

2.2 Caracterização de derrames básicos subaéreos

A caracterização morfológica e física de derrames indica noções sobre a condição e mecanismos de colocação dos fluxos de lavas, sendo possível reconstruir a arquitetura de litofácies vulcânicas e a dinâmica eruptiva do vulcanismo.

Os derrames formam distintas configurações internas e externas, geometrias e dimensões. Os fatores que controlam a dinâmica morfológica das lavas consistem na taxa de efusão, topografia do relevo e propriedades físicas (viscosidade e taxa de deformação de fluxo). No ambiente subaéreo, derrames basálticos foram classificados em dois tipos (*end-members*), *pahoehoe* e 'a'a (MacDonald, 1953), com base nas características morfológicas de superfície e estruturação interna dos derrames. Devido à alta diversidade de morfologias que esses derrames podem desenvolver, identificou-se derrames basálticos transicionais entre os *end-members* (Duraishwami *et al.*, 2003, 2008).

2.2.1 Derrames *Pahoehoe*

Os derrames do tipo *pahoehoe* compreendem superfícies lisas, onduladas ou em cordas e internamente são estruturados em crosta superior, núcleo e crosta inferior (Macdonald, 1953; Aubele *et al.*, 1988, Self *et al.*, 1996). A crosta inferior apresenta espessura relativamente pequena e baixa densidade de vesículas, sendo comum a presença de vesículas do tipo *pipe*. O núcleo é caracterizado pelas disjunções colunares e menor concentração de vesículas, além de poder ser observado estruturas de segregação de voláteis como *sheet vesicles*, *megascopic vesicles* e *vesicles cylinders*. A crosta superior exhibe uma forte vesiculação, com a dimensão das vesículas aumentando em direção ao núcleo, enquanto a abundância diminui (Figura 8).

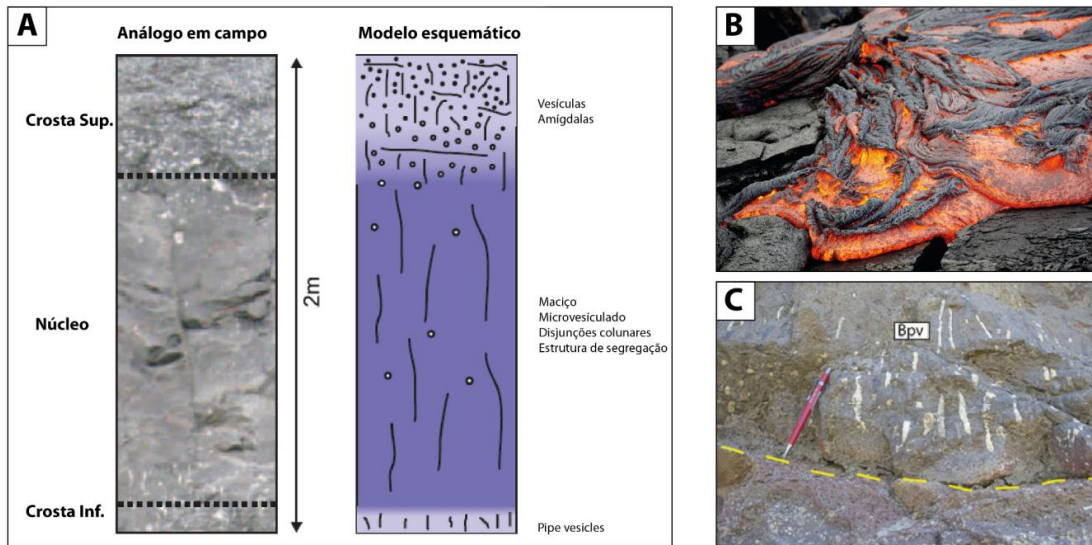


Figura 8 - A) Estruturação interna de derrame *pahoehoe* (Fonte: traduzido de Nelson *et al.*, 2009). B) Feições em corda na superfície de derrame *pahoehoe* (Fonte: extraído do Google Imagens). C) Base de derrame *pahoehoe*, marcado por vesículas do tipo *pipe* (Bpv – basalto vesicular com *pipe vesicles*) (Fonte: extraído de Barreto *et al.*, 2014).

A dinâmica dos derrames *pahoehoe* resulta primeiramente em um avanço na forma de lobos de lava (*lava toes*) pouco espessos, com a rápida formação da crosta superior. Caso a superfície de base possuir baixa inclinação pode ocorrer a inflação do derrame. Quando a inflação é maior do que a capacidade da crosta externa de mantê-la, o lobo de lava se rompe, originando um subsequente (Figura 9).

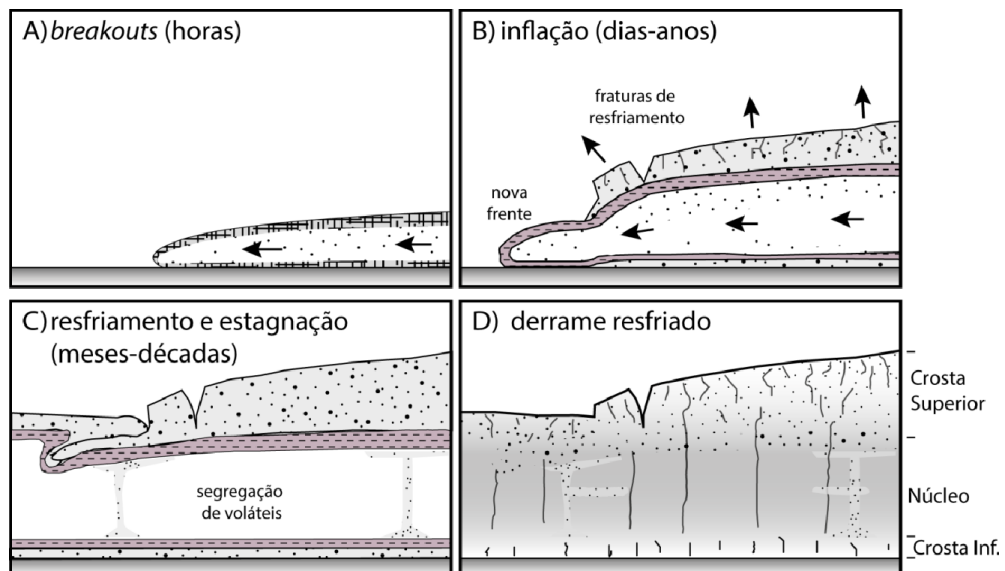


Figura 9 - Modelo genérico de colocação de derrames *pahoehoe* inflados. A) lobo de lava pouco espesso se coloca na superfície, imediatamente a porção externa da lava resfria formando uma crosta isolante. B) a alimentação interna contínua da lava promove a inflação e espessamento e o lobo de lava avança por uma nova frente de lava (*lava breakout*). C) com a parada no suprimento de lava, o derrame estagna e resfria, neste estágio ocorre a segregação de voláteis aprisionados nas porções internas da lava. D) derrame solidificado e resfriado (Fonte: extraído de Rossetti, 2018; modificado de Thordarson & Self 1998).

Em PBCs, as lavas *pahoehoe* representam os primeiros derrames a extravassarem com baixas taxas de efusão, aplainando a paleotopografia (Jerram *et al.*, 2000; Jerram & Widdowson, 2005). Em determinadas regiões, pode ocorrer a acumulação da lava devido a presença de obstáculos topográficos, gerando derrames espessos do tipo *ponded pahoehoe* (Figura 10).

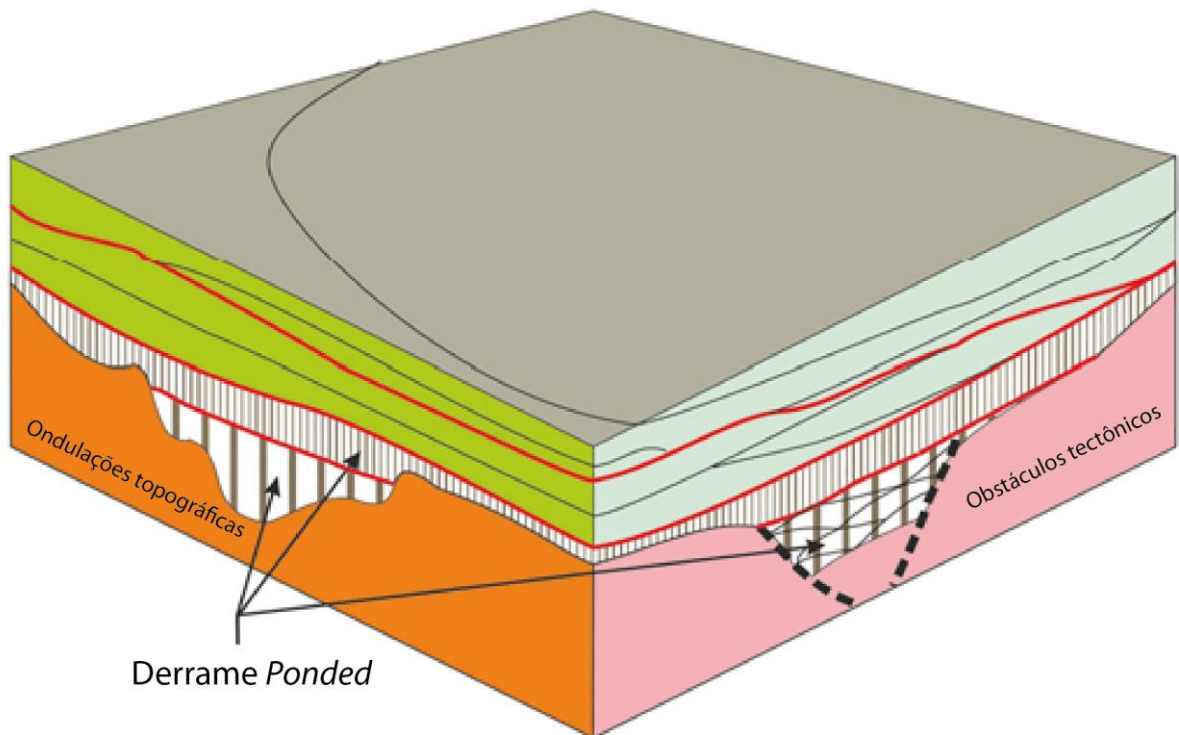


Figura 10 – Modelo esquemático da arquitetura de derrames do tipo *ponded* (Fonte: Traduzido de Kale *et al.*, 2022).

2.2.2 Derrames 'a'a

Os derrames 'a'a são identificados por base e topo escoriáceos, vesículas esparsas e estiradas e por reentrâncias das zonas escoriáceas na parte central maciça em virtude do deslocamento do derrame (Macdonald, 1953; Kilburn, 1990) (Figura 11). A formação desses derrames ocorre em função do transporte da lava em canais abertos, em geral relacionado a altas taxas de erupção (Macdonald, 1953; Pinkerton & Sparks, 1976) ou devido a elevadas taxas de deformação durante o fluxo (*shear rates*) causadas por relevos abruptos (Hon *et al.*, 2003). Sob estas condições a crosta externa tende a romper e fragmentar de maneira contínua, com os fragmentos

transportados para porções basais em um movimento análogo ao de uma esteira de trator (*caterpillar effect*).

Estudos recentes demonstram que o *caterpillar effect* pode ser aplicado em determinadas PBCs (Brown *et al.*, 2011; Duraiswami *et al.*, 2014). Em outras PBCs, a colocação de lavas 'a'a não é favorável, pois a paleotopografia se encontra horizontalizada pelos derrames *pahoehoe* antecessores (Thordarson, 2006; Waichel *et al.*, 2012).

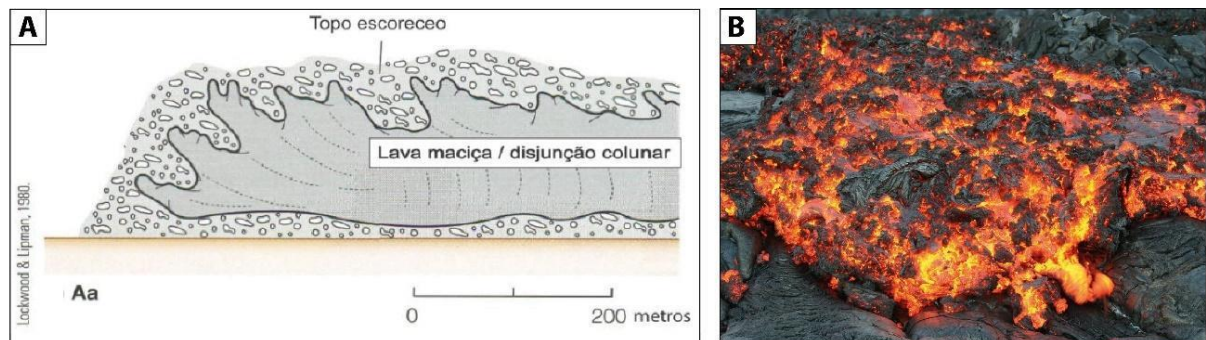


Figura 11 - A) Estruturação interna de derrame 'a'a (Fonte: extraído de Rossetti, 2018; modificado de Lockwood & LIPman, 1980). B) Crosta externa de derrame 'a'a (Fonte: extraído do Google Imagens).

2.2.3 Derrames Transicionais

Identificou-se a existência de morfologias transicionais entre os tipos *pahoehoe* e 'a'a. Esses morfotipos têm uma variação de feições superficiais, sendo denominados como *hummocky pahoehoe*, *sheet pahoehoe*, *slabby pahoehoe* e *rubbly pahoehoe* (Figura 12). Derrames transicionais são observados nas PBCs do Paraná-Etendeka e Deccan (Managave, 2000; Keszthelyi *et al.*, 2001; Duraiswamy *et al.*, 2003, 2008, 2014; Bondre *et al.*, 2004; Waichel *et al.*, 2006a, 2006b; Bondre & Hart, 2008; Barreto *et al.*, 2014; Rossetti *et al.*, 2014).



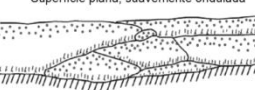
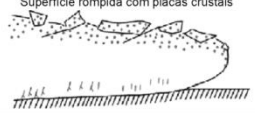

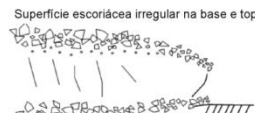
Tipo de lava	Definição	Desenho esquemático	Referências relacionadas	Significado
<i>Pahoehoe</i>	Um termo havaiano que significa lava básica não fragmentada e ondulada que possui superfícies em corda, onduladas, lobadas ou suaves. Lavas <i>pahoehoe</i> são compostas de diversas unidades.	Unidades múltiplas constituindo lavas <i>pahoehoe</i> 	Macdonald (1953) Walker (1993) Self <i>et al.</i> (1998) Jay <i>et al.</i> (2009) Vye-Brown <i>et al.</i> (2013a,b)	Estas feições de superfície ocorrem devido a movimentação da lava fluida abaixo da crosta da superfície congelada. Este é um tipo de lava composta.
<i>Hummocky pahoehoe</i>	Uma variedade de lava <i>pahoehoe</i> que consiste em dedos de lavas, pequenos lobos e tumuli. A superfície desse tipo de lava é suave, bun-like e <i>hummocky</i> .	Superfície <i>hummocky</i> suave 	Swanson (1973) Bondre <i>et al.</i> (2004) Duraiswami (2009)	Este tipo de fluxo composto se forma ou sob taxas baixas de efusão ou devido a paleotopografia ondulada.
<i>Sheet pahoehoe</i>	Uma variedade de lava <i>pahoehoe</i> que consiste de grandes lobos tabulares e unidades espessas de lençóis de lavas. As unidades são empilhadas umas sobre as outras e formam uma geometria tabular plana.	Superfície plana, suavemente ondulada 	Aubele <i>et al.</i> (1988) Self <i>et al.</i> (1998) Duraiswami (2009)	Inflação e coalescência de lobos de lavas que originam <i>sheet</i> lobos com topos suavizados e típica estrutura interna em tripartite (crosta-núcleo-zona de <i>pipes</i> na base)
<i>Slabby pahoehoe</i>	Essas lavas contêm uma série de placas regularmente espaçadas, com poucos metros de diâmetro e de espessura. Essas placas em geral estão quebradas e inclinadas graças ao movimento de massa ou drenagem da lava subjacente.	Superfície rompida com placas crustais 	Peterson & Tilling (1980) Guilbaud <i>et al.</i> (2005)	Este é considerado um tipo de lava gradacional entre <i>pahoehoe</i> e <i>'a'ā</i> , o qual exibe característica predominante de lavas <i>pahoehoe</i> , embora com uma crosta de topo rompida (escoriácea)
<i>Rubblly pahoehoe</i>	Derrames com bases preservadas e crosta superior brechada constituem um tipo morfológico que difere em características daquelas típicas <i>pahoehoe</i> e <i>'a'ā</i> .	Superfície brechada e base preservada 	Managave (2000) Keszthelyi & Thordarson (2000) Guilbaud <i>et al.</i> (2005) Duraiswami <i>et al.</i> (2008)	Tipo de lava transicional entre <i>pahoehoe</i> e <i>'a'ā</i> que foi colocada sob taxas de efusão ligeiramente mais altas que aquelas das lavas <i>pahoehoe</i>
<i>'A'ā</i>	<i>'A'ā</i> é um termo havaiano que significa lava áspera e pedregosa. Esta representa uma dos três tipos de derrames básicos, cuja superfície é composta de lava <i>clinker</i> quebrada.	Superfície escoriácea irregular na base e topo 	Macdonald (1953) Walker (1993)	Derrames <i>'a'ā</i> são geralmente os mais viscosos de todos os tipos morfológicos e avançam mais lentamente que os derrames <i>pahoehoe</i> sob mesmas condições de declividade

Figura 12 - Classificação de derrames básicos subaéreos com base na morfologia (Fonte: extraído de Barreto, 2016, traduzido de Duraiswami *et al.*, 2014)

2.3 Peperitos

O termo peperito foi utilizado pela primeira vez por Scrope (1858) para descrever rochas clásticas na região Limagne d'Auvergne (França), caracterizadas pela mistura de carbonatos lacustres e basaltos. Essa mistura foi interpretada, posteriormente, como sendo gerada pela efusão de magma basáltico sobre lamas úmidas (Michel-Levy, 1890). Atualmente, peperitos são definidos como “termo genético aplicado a rochas formadas essencialmente *in situ*, por desintegração de magma durante uma intrusão, o qual se mistura a sedimentos inconsolidados ou pouco consolidados e tipicamente úmidos. O termo também se refere às misturas similares geradas pelo mesmo processo em contato com lavas ou outros depósitos vulcanoclásticos com tais sedimentos” (White *et al.*, 2000; pg. 65).

A gênese de peperitos envolve a fragmentação e desintegração do magma, o qual formam fragmentos juvenis, que são misturados com sedimentos. Segundo Skilling *et al.* (2002), os principais mecanismos que atuam nesses processos são: reologia do magma e do sedimento envolvido, conteúdo de voláteis e vesículas, atributos do sedimento (tamanho de grão, seleção, permeabilidade, estrutura), volume de magma-sedimento e magma-água, velocidade da mistura, velocidade da injeção e

do fluxo de magma. Esses mecanismos podem variar espacialmente e temporalmente durante a formação da camada peperítica.

Peperitos podem ser classificados em dois tipos texturais com base na morfologia dos fragmentos ígneos juvenis. Peperitos blocosos são definidos por fragmentos juvenis de aspecto poligonal, enquanto peperitos fluidais/globulares são caracterizados por fragmentos juvenis de geometria irregular, normalmente lobados e/ou fusiformes. A geometria dos fragmentos juvenis reflete a condição reológica quando da fragmentação da lava. Fragmentos juvenis blocosos estão associados a fragmentação de uma lava resfriada, essencialmente rúptil. Fragmentos juvenis fluidais estão associados a fragmentação de uma lava parcialmente resfriada, capaz de absorver tensões por deformação dúctil até atingir um ponto crítico e fragmentar-se (Figura 13).

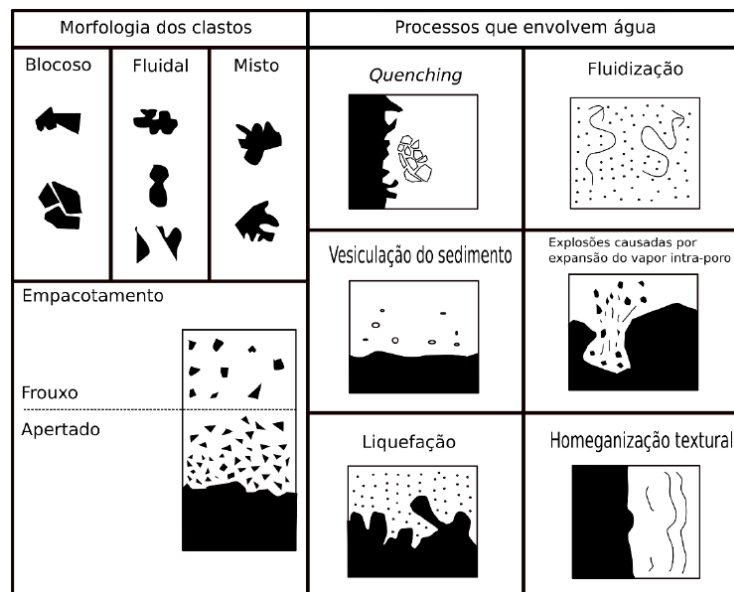


Figura 13 - Morfologia dos fragmentos juvenis encontrado em peperitos, termos utilizado para referir-se ao empacotamento e processos que envolvem água que atuam durante a interação entre magmas/lavas e sedimentos úmidos e inconsolidados (Fonte: extraído de Cruz, 2019; modificado de Skilling *et al.*, 2002).

Tradicionalmente, os peperitos eram interpretados como interação entre lavas e sedimentos inconsolidados úmidos, em virtude da maioria dos mecanismos de formação necessitar da presença de água nos poros do sedimento. Estudos da interação lava-sedimento na PIPE com foco em peperitos abordaram um novo modelo. Trabalhos como de Jerram & Stollhofen (2002) e Petry *et al.*, (2007) descrevem peperitos gerados apenas pela interação mecânica entre lavas e dunas

eólicas em um ambiente hiperárido. Para Waichel *et al.* (2007) e Machado *et al.* (2015), os peperitos da PIPE são resultados da mistura envolvendo lava e sedimento inconsolidado a mal consolidado úmidos (Figura 14), concordando com o modelo tradicional.

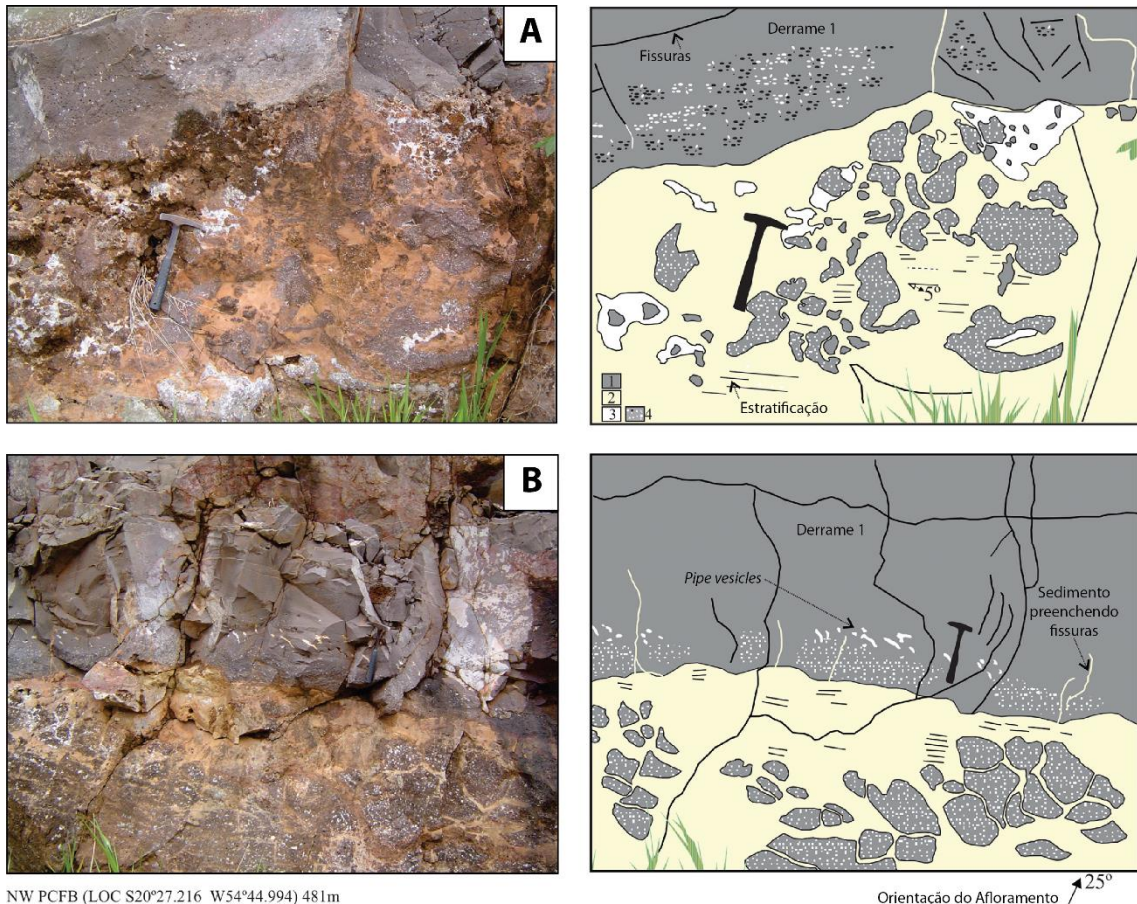


Figura 14 - Exemplo de peperito no norte da PIPE. A) Arenito de granulação muito fina com estratificação cruzada de baixo ângulo com clastos vulcânicos juvenis de forma ameboide. B) Contato da camada peperítica com o derrame 1 (Fonte: traduzido de Machado *et al.*, 2015).

2.4 Estratigrafia de Rochas Vulcânicas

A estratigrafia de rochas vulcânicas pode ser definida como a ordem estratigráfica e cronológica em que os produtos de uma única erupção, ou uma série de erupções, ou de um período interruptivo aparecem no registro geológico (Martí *et al.*, 2018). A construção da estratigrafia permite uma análise da dinâmica de colocação, estilo eruptivo, transporte e o grau de proximidade com a área fonte de depósitos vulcânicos explosivos e efusivos, e sua evolução ao longo do tempo.

Pesquisas envolvendo a aplicação da estratigrafia em rochas vulcânicas são realizadas desde a década de 80 (Fisher & Schmincke, 1984; Cas & Wright, 1987;

McPhie *et al.*, 1993), na tentativa de estabelecer correlações entre conceitos consolidados no estudo estratigráfico de sequências sedimentares. Entretanto, o estudo de sequências vulcânicas e suas relações estratigráficas tende a ser complexo, em virtude da diversidade de processos e tipos de rochas que fazem parte deste contexto. Desse modo, desenvolver uma sistematização para a construção da estratigrafia em terrenos vulcânicos é essencial para a evolução dos estudos científicos.

2.4.1 Conceito de Fácies

A fácies pode ser definida como um corpo ou intervalo de rocha que possui características únicas que a diferencia de outras fácies ou intervalo de rocha (Cas & Wright, 1987). Os aspectos peculiares de cada fácies fundamentam-se nos atributos composicionais, texturais e estruturais. A fácies é interpretada como um produto de um conjunto de condições/processos que regem um determinado ambiente deposicional.

No âmbito das rochas vulcânicas, a evidência de origem desses litotipos não é clara nem inequívoca (McPhie *et al.*, 1993). Recomenda-se iniciar a investigação de sequências vulcânicas pela classificação litológica, antes de adotar termos com implicações genéticas. A classificação litológica consiste na descrição referente à composição, componentes e tamanho de grão. Designações genéricas são definidas pela geometria das fácies e associação destas em distintas escalas, evidenciando processos eruptivos e deposicionais.

Litofácies, termo empregado para fácies de cunho descritivo, apresentam determinadas características composicionais, texturais e estruturais que podem auxiliar na interpretação do estilo eruptivo. A partir de classificação de litofácies sedimentares de Miall (1977), McPhie *et al.* (1993) propuseram uma sistemática para descrever litofácies vulcânicas relacionadas a lavas coerentes e intrusões. Este sistema descritivo utiliza-se da combinação de quatro palavras-chaves relacionadas com a composição, termo litofácies, textura e alteração. A descrição de litofácies é escrita com no mínimo duas palavras-chaves, sendo obrigatório a utilização da composição. Para os derrames do GSG, na porção sul da Província Basáltica do Paraná, Barreto *et al.*, (2017), Rossetti *et al.*, (2014), Cruz (2019), Meucci (2022)

utilizaram uma metodologia adotando códigos para as litofácies, combinando a litologia, estrutura e texturas das rochas, similar ao esquema proposto por McPhie *et al.* (1993). O mesmo foi proposto por Pasqualon (2017) para os depósitos do Vulcão do Paredão na Ilha da Trindade. Desse modo, é possível identificar e caracterizar litofácies vulcânicas e agrupá-las para construir o arcabouço estratigráfico.

A análise de litofácies constitui-se em um método empregado em PBC como uma ferramenta para compreender a estratigrafia vulcânica e a evolução do vulcanismo, tópico abordado no próximo item.

2.4.2 Arquitetura de fácies vulcânicas em PBC

Na investigação de bacias sedimentares é proposto o conceito de arquitetura de fácies, considerando que os padrões de empilhamento são gerados por intercalações entre as variações eustáticas, taxas de subsidência e de influxo sedimentar. Ao aplicar o conceito em sistemas vulcânicos, a arquitetura de fácies considera a periodicidade e taxas de erupções, a subsidência, a paleotopografia e os hiatos temporais entre os derrames como determinantes nos padrões de empilhamento. A correlação lateral de sucessões de litofácies vulcânicas pode contribuir na investigação do estilo vulcânico, modelo eruptivo, duração e periodicidade da sucessão. Desse modo, é possível construir a história evolutiva do vulcanismo na bacia (Jerram & Widdowson, 2005).

Walker (1971) definiu os termos “simples” e “composto” para descrição de derrames em PCBs. Derrames simples são formados por uma única unidade de resfriamento, normalmente com geometria tabular e não compartimentada devido a ausência de lobos de lava. Na maioria dos casos, são relacionados a erupções de grandes volumes de magma que recobrem uma bacia (*flood basalts*), contribuindo para a formação de grande parte dos depósitos na fase principal do magmatismo em diversas províncias ígneas (Figura 15 B).

Derrames compostos são compartimentados em unidades de fluxo/resfriamento menores, marcadas por muitas superfícies de resfriamento. Campos de derrames formados por múltiplos lobos de lava com pequena espessura são definidos por estas superfícies. Em diversas províncias, os derrames compostos

são associados a erupções de pequenos volumes de magma, especialmente durante o estágio inicial e final da atividade magmática (Figura 15 A).

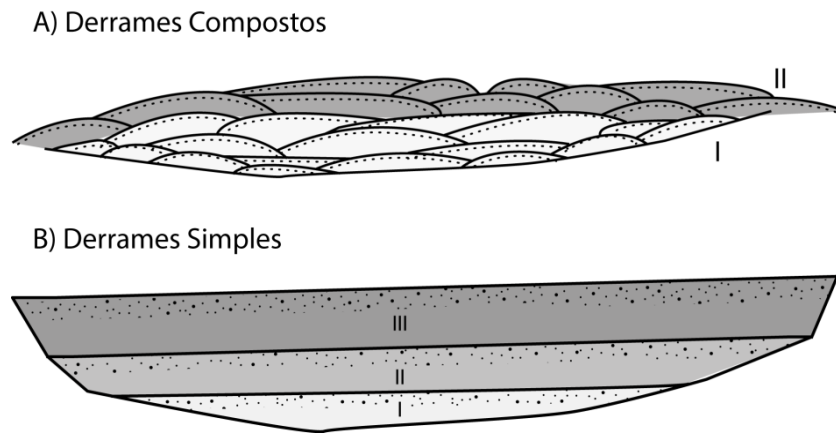


Figura 15 - Desenho esquemático de campos de derrames em vista transversal. A) compostos, I e II. B) derrames simples I, II e III (Fonte: extraído de Rossetti (2018), adaptado de Walker, 1973).

Jerram (2002) propôs dois membros finais na arquitetura de fácies de basaltos subaéreos: fácies tabular clássica e fácies composta anastomosada. A fácies tabular clássica compreende a arquitetura de um derrame simples, com geometria em camada tabular, separada por paleossolos ou outros indicadores, sendo estabelecidos sob condições não turbulentas e altas taxas de efusão. A fácies composta anastomosada é definida por diversos fluxos de lobos *pahoehoe* formados em condições de taxas de efusão muito baixas (Figura 16).

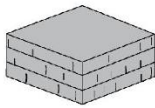



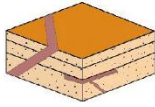

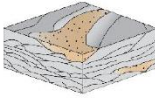
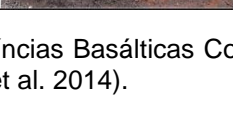
Arquitetura de Facies	Estrutura Esquemática	Exemplo	Descrição
Tabular clássica			Derrames espessos (20-50m) empilhados verticalmente definindo uma morfologia em degraus. Formados por erupções contínuas e de grande volume.
Composta Anastomosada			Lobos de lava pouco espessos (0.1 to 15m) empilhados de forma complexa formando um padrão anastomosado. Associados a erupções de pequeno volume e baixa efusão.
Corpos Intrusivos			Corpos intrusivos concordantes ou discordantes ao acamamento. Representam o <i>plumbing system</i> das lavas.
Unidades Sedimentares Intervulcânicos			Unidades sedimentares ou vulcanoclásticas depositadas entre lavas. Representam quebras na atividade vulcânica.

Figura 16 - Arquitetura de fácies em Províncias Basálticas Continentais (Fonte: extraído de Rossetti, 2018; adaptado de Jerram 2002, e Millett et al. 2014).

Waichel *et al.* (2012) descreveram a arquitetura de fácies para a sequência vulcânica da Formação Serra Geral, na Calha de Torres. Neste estudo, identificou-se as fácies vulcânicas definidas por Jerram (2002) e propuseram a fácies lobada/escoreácea (derrames 'a'a) e a fácies domo de lava (domos ácidos) (Figura 17).


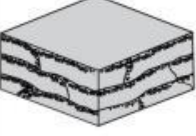

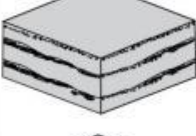

Arquitetura da Fácies Vulcânica	Bloco Diagrama	Tipo de Derrame (Predominante)	Espessura Média (por derrame)	Espessura máxima
Derrames Tabulares		derrames tabulares ácidos	~20 m	~150m
Tabular/ Lobular Escoreácea		derrames 'a'a	10 -15 m	~250 m
Domos de Lava		domos ácidos	até 30 m	~150 m
Tabular Clássica		derrames pahoehoe simples	10 - 20 m	~500 m
Composta Anastomosada		derrames pahoehoe compostos (área de duna) derrames pahoehoe pondeados (áreas de interdunas)	0,3 - 1,0 m até 40 m	100-200 m

Figura 17 - Arquitetura de fácies vulcânicas descritas por Waichel *et al.*, (2012) na calha de Torres.

2.5 Porosidade em depósitos vulcânicos

Os depósitos vulcânicos podem ser classificados com base nos aspectos texturais. Conforme a classificação de McPhie *et al.* (1993), os depósitos são divididos em duas classes: coerente e vulcanoclástica. A designação vulcanoclástica é descritiva, relativo aos depósitos formados por fragmentos vulcânicos, independente de aspectos genéticos. Os depósitos vulcanoclásticos são subdivididos em: autoclástico, piroclástico, ressedimentado e sedimentar vulcanogênico. Os depósitos coerentes podem ser subdivididos em distintos tipos de derrames (subaéreos e aquasos). White & Houghton (2006) propuseram uma nova classificação para

depósitos vulcanoclásticos, baseada na granulometria e no processo de deposição, sendo necessário o processo estar relacionado com erupções vulcânicas. Desse modo, os depósitos vulcanoclásticos podem ser subdivididos em: piroclástico, autoclástico, hialoclastitos e peperitos.

Os depósitos formados por rochas vulcânicas podem apresentar um sistema poroso complexo. A porosidade é caracterizada como o espaço vazio (poro) entre grãos capaz de armazenar fluidos (Klobes *et al.*, 2006). É dividida em absoluta, considerando poros interconectados e não conectados, e efetiva, relacionado aos poros interconectados e sua relação com o volume total da rocha.

A porosidade em litotipos vulcânicos depende de fatores como (1) tipo de manifestação vulcânica (efusiva ou explosiva), (2) distância do depósito em relação à fonte, (3) composição do magma, (4) tipo de derrame, (5) volatilização do sistema e/ou (6) fragmentação (Colombier *et al.*, 2017), gerando litofácies com características distintas. Desse modo, diferentes tipos de derrames desenvolvem diferentes padrões de vesiculação (Planke *et al.*, 2021; Figura 18).

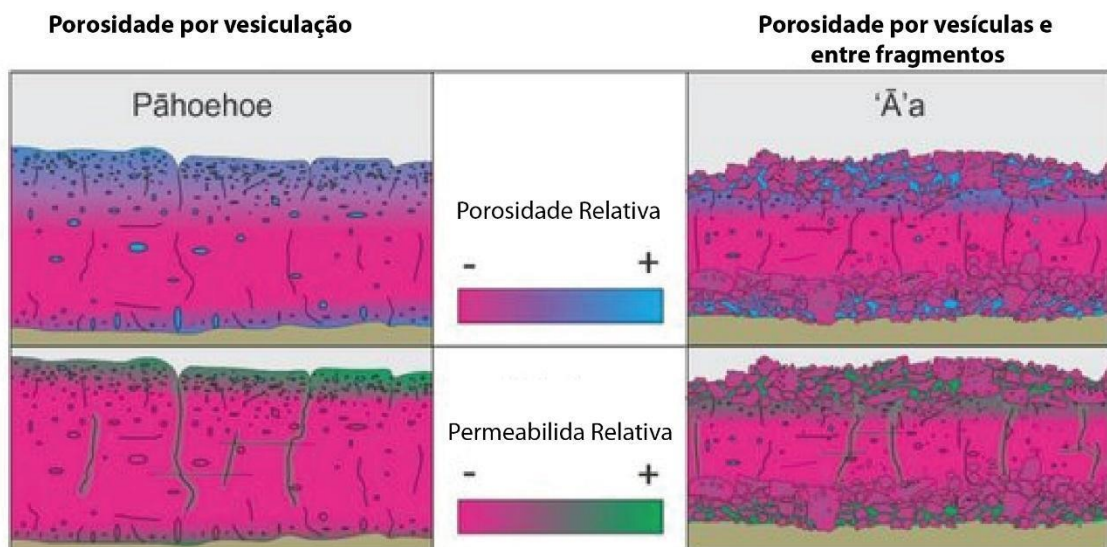


Figura 18 - Diferença no padrão permo-poroso dos derrames. Fonte: traduzido de Planke *et al.*, (2021).

A porosidade pode ser gerada por processos (1) primários, associados à ascensão do magma e o *emplacement* na superfície e (2) secundários, formado em processos após o *emplacement*, relacionado a alterações (reações diagenéticas, intemperismo, hidrotermal) e fraturamento. A porosidade primária pode ser classificada como vesicular (liberação de voláteis), intracristalina/móldica (dissolução

deutérica), intra-fragmento (autobrechas) e de fraturas (por resfriamento ou *quenching*). A porosidade secundária pode ser do tipo intra-cristal/móldica e intra-matriz, originadas pelo processo de dissolução da mineralogia primária, intra-fragmento, relacionada com a dissolução de fragmentos de lava, intra-cimento, associada a dissolução da matriz, dos tipos *Spongy*, *Lacy* e *Drusy*, sendo formadas, nestes casos pela dissolução e precipitação parcial de minerais primários e por fraturas, geradas por processos tectônicos pós-vulcânicos (Sruoga & Rubinstein, 2007; Couves *et al.*, 2016; Barreto *et al.*, 2017; Pasqualon, 2017; Rossetti *et al.*, 2019) (Quadro 2).

Quadro 2 - Processos primários e secundários e a sua porosidade resultante em rochas vulcânicas (Sruoga & Rubinstein, 2007).

Origem	Processo		Tipo de porosidade
Primário	<i>Welding</i>		<i>Intershard e Intrapumice</i>
	Dissolução deutérica de cristais		Intra-cristal ou móldica
	Liberação de voláteis		Vesicular e <i>Gas Pipe</i>
	Fragmentação	Fragmentação de fluxo	<i>Interflow Laminar/Tension Cracks Cavitation</i>
		Brechas autoclásticas	Inter-clasto
		Fragmentação de fenocristais	Cristal fragmentado
Secundário	Alteração Meteórica Diagenética Hidrotermal	Dissolução e precipitação de minerais secundários	<i>Spongy a Cavernous Lacy</i>
		Precipitação de minerais secundários nos poros	<i>Drusy</i>
		Remoção mecânica de minerais secundários	Peneira a móldica
	Fratura	Tectônica	Fratura tectônica
		<i>Quenching</i>	Fratura <i>quench</i>
		Brecha hidrotermal	Brecha <i>drusy</i>

Recentemente, o estudo petrofísico dos derrames do GSG, empregando técnicas como microtomógrafo, velocidades ultrassônicas e porosímetro-permeâmetro, é um tópico recorrente em artigos e dissertações (Becker *et al.*, 2019; Rossetti *et al.*, 2019). Os estudos apontam uma porosidade relativamente alta tanto na crosta superior quanto inferior de lavas básicas (> 10%). As maiores porosidades ocorrem nas porções superiores de derrames *rubbly pahoehoe* (28,3%) e derrames *pahoehoe* (26,6%). Para litologias vulcânicas ácidas, a porosidade varia de 0,11% a 9,38%. No caso da permeabilidade, os valores para as rochas básicas e ácidas são baixos (< 1mD), em virtude da precipitação de minerais secundários.

A caracterização do sistema poroso é uma parte importante na análise de sistemas petrolíferos. Em rochas reservatórios, é um dos fatores condicionantes de acumulação de hidrocarbonetos. A presença da porosidade influencia diretamente na qualidade das reservas e é levada em consideração para a cubagem do volume dos reservatórios de óleo e gás.

2.6 Sistemas Petrolíferos Ígneo-Sedimentares

Um sistema petrolífero é definido como um sistema físico-químico que gera e concentra óleo e gás, formado por rochas geradoras, reservatórios e selantes (Demaison e Huizinga, 1994), com a atuação de processos vinculados a geração e migração de hidrocarbonetos e a formação de armadilhas. Os sistemas petrolíferos mistos são constituídos por rochas ígneo-sedimentares com a presença de um ou mais componentes essenciais ou processos relacionados a eventos magmáticos (Eiras e Wanderley Filho, 2003). Dentro desses sistemas as rochas ígneas podem se comportar como rochas reservatórios, selantes, *traps* e auxiliar na maturação térmica e migração do hidrocarboneto.

2.6.1 Geração

A rocha geradora consiste em uma litologia (geralmente folhelhos, margas e calcilitos) que contém matéria orgânica em quantidade e qualidade adequadas e submetida a uma série de reações químicas vinculadas com a maturação térmica e craqueamento do querogênio em óleo e gás.

A caracterização quantitativa de matéria orgânica se baseia no teor de carbono orgânico total (COT), sendo o valor mínimo satisfatório de 0,5%. Rochas geradoras de relevância econômica apresentam COT superiores a 3%. Sobre o aspecto qualitativo, McCarthy *et al.* (2011) classificaram a matéria orgânica em quatro tipos: I, II, III e IV (Quadro 3), com o aumento do potencial de geração de hidrocarbonetos de I para IV.

Quadro 3 - Tipos de querogênio e material fonte (McCarthy *et al.*, 2011).

Tipo de Querogênio	Organismos geradores	Ambiente deposicional
I	Algas	Lacustre
II	Plânctons e alguma contribuição de algas	Marinho
III	Plantas	Terrestre
IV	Material retrabalhado e oxidado	Misto

Devido à subsidência da bacia, o querogênio é soterrado a maiores profundidades e exposto a temperaturas elevadas (50-150°C) o que acarreta na degradação térmica e geração de óleo. Na Bacia do Parnaíba, por exemplo, a geração foi favorecida por intrusões de rochas subvulcânicas das Fm. Mosquito e Fm. Sardinha nas rochas geradoras das Fm. Pimenteiras e Tianguá (Góes *et al.*, 1994, Figura 19).

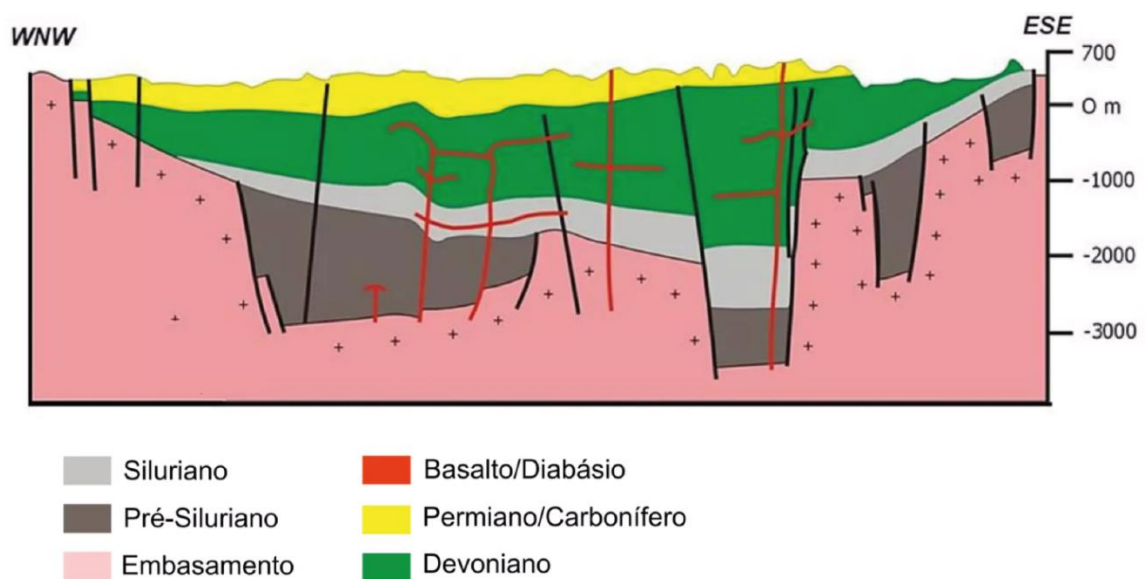


Figura 19 - Seção geológica esquemática da Bacia do Parnaíba. Em vermelhos diques e soleiras de basaltos/diabásio (Fm. Mosquito e Sardinha) intrudindo as rochas geradoras, Fm. Pimenteiras (Devoniano) e Tianguá (Siluriano). Fonte: modificado de Góes *et al.*, (1994).

2.6.2 Maturação

A maturação térmica compreende o estágio da evolução térmica desenvolvido pela rocha geradora. As rochas podem ser classificadas como imaturas, maduras e senis. A rocha imatura não apresenta geração de volumes significativos de hidrocarbonetos, correspondendo à fase de diagênese. A rocha madura se encontra na fase de catagênese. A parte inicial da catagênese representa a zona de geração de óleo, com predomínio de geração de hidrocarbonetos líquidos. No final da catagênese, a rocha geradora atinge a zona de geração de gás, sendo considerada senil (Quadro 4).

Quadro 4 - Nível de maturação térmica.

Estágio	Nível de Maturação
Diagênese	Imaturo
Catagênese	Maturo - zona óleo
	Maturo - zona regressiva
	Maturo - zona gás úmido
Metagênese	Senil - zona gás seco

As intrusões magmáticas podem colaborar para maturação de hidrocarbonetos. As soleiras de diabásio, associadas ao magmatismo Penatecaua, na Bacia do Solimões, foram colocadas acima da rocha geradora e atuaram como uma fonte térmica auxiliando na geração e maturação de petróleo e gás, em virtude do aumento da carga de soterramento (Figura 20).

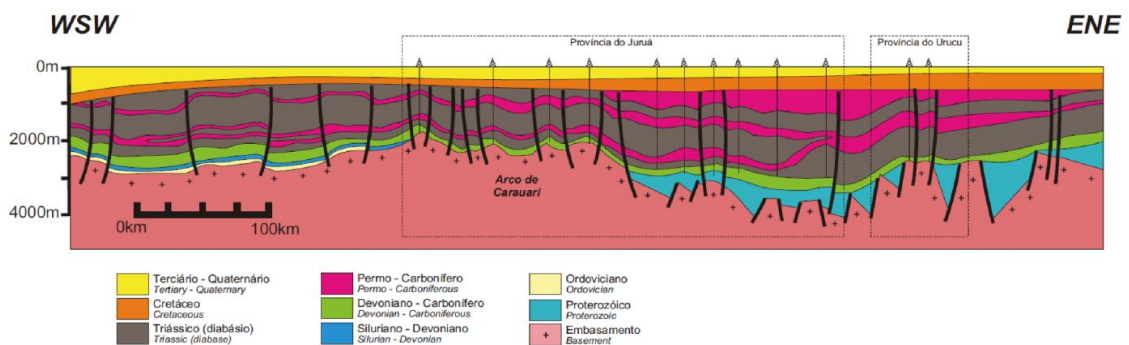


Figura 20 - Seção geológica esquemática da Bacia do Solimões. Fonte: modificado de Eiras, 1996.

2.6.3 Rochas reservatório

A rocha reservatório apresenta porosidade e permeabilidade ideais para armazenar e transmitir fluidos. A qualidade do reservatório é definida por essas propriedades físicas, sendo influenciada por distintos aspectos, como tamanho e forma dos grãos, grau de seleção, empacotamento e continuidade lateral e vertical da rocha. Desse modo, os reservatórios de óleo podem ser quantificados de acordo com valores de porosidade e permeabilidade (Hyne, 2012) (Quadro 5). A caracterização física dos reservatórios consiste em uma análise fundamental na exploração de campos petrolíferos por estimar o volume de hidrocarbonetos, compreender o comportamento das litologias e prever o deslocamento dos fluidos.

Quadro 5 - Valores de porosidade em percentual (%) e de permeabilidade em milidarcy (mD) que qualificam um reservatório de óleo de acordo com Hyne (2012).

Porosidade (%)		Permeabilidade (mD)	
0-5	Insignificante	1-10	Pobre
5-10	Pobre	10-100	Bom
10-15	Razoável	100-1000	Excelente
15-20	Bom		
20-25	Excelente		

As rochas-reservatório magmáticas correspondem a reservatórios não convencionais de óleo e gás. Lavas e tufos, além de soleiras, podem ser bons reservatórios, dependendo da quantidade de vesículas, grau de fraturamento e da diagênese. Há registros em diversas partes do planeta de sistemas petrolíferos contendo hidrocarbonetos em rochas ígneas. Na América do Sul, há ocorrências desses tipos de reversas na Argentina (Bacia de Neuquén), na Guiana (Bacia do Tacutu) e no Brasil (Bacia de Campos nos campos de Badejo e Linguado em basaltos fraturados, basaltos vesiculados e vulcanoclásticas).

Na Bacia de Campos, as litologias da Formação Cabiúnas (Neocomiano) consistem em um reservatório em rochas ígneas com produção de óleo e gás nos

campos de Badejo (Figura 21) e Linguado. Esta Formação é composta por derrames basálticos e diabásios intercalados com rochas vulcanoclásticas e sedimentares. De acordo com Mizusaki *et al.* (1988), a porosidade dominante é por fraturamento e de maneira subordinada é observado porosidade vesicular e de matriz. A porosidade vesicular se localiza mais tipicamente no topo e na base dos derrames, onde as vesículas estão concentradas e interconectadas via microfraturamento, proporcionando permeabilidade a esta zona. A dissolução do cimento calcífero nas vesículas e fraturas favorece o alargamento destas feições, contribuindo no aumento dos valores iniciais de porosidade e permeabilidade (Mizusaki *et al.*, 1988). Potenciais reservatórios em rochas basálticas fraturadas apresentam porosidades similares às de reservatórios do pré-sal (10-15%) nos intervalos contendo hidrocarbonetos (Ma *et al.*, 2011; Vieira de Luca *et al.*, 2015). Em virtude da alta heterogeneidade e baixa continuidade das fraturas, o acúmulo de petróleo comercial ocorre em porções com alta densidade de fraturas e intensa dissolução secundária (Guardado *et al.*, 1989; Ren *et al.*, 2020).

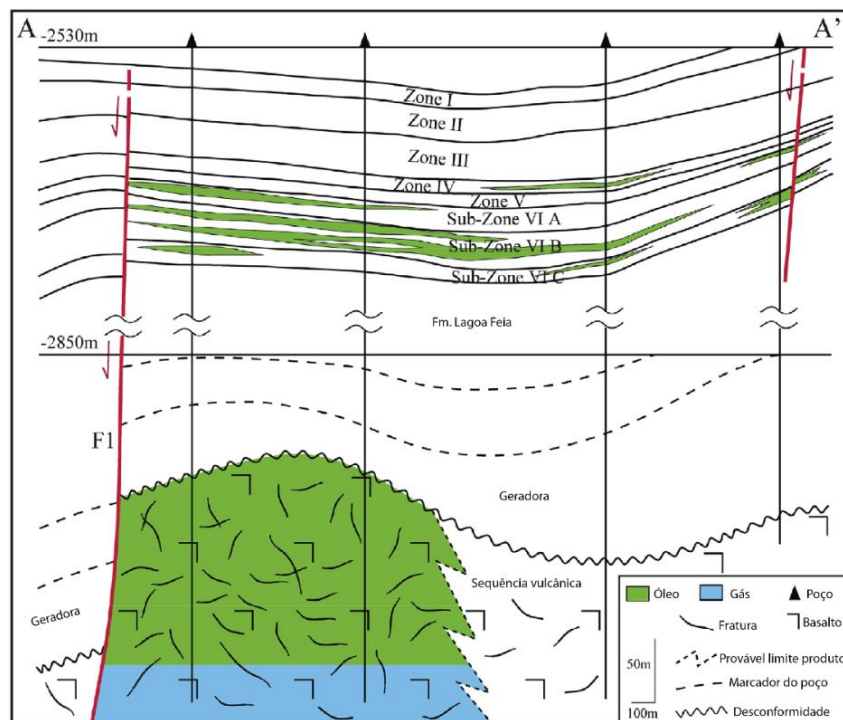


Figura 21 - Perfis de rocha ígnea do Campo petrolífero de Badejo. Fonte: modificado após Guardado *et al.*, 1989.

Ólavsdóttir *et al.* (2015) estudaram a qualidade de unidades vulcanoclásticas como reservatórios atípicos de hidrocarbonetos das Ilhas Faroese, relacionadas com a

Província Ígnea do Atlântico Norte. As unidades consistem em depósitos piroclásticos e/ou epiclásticos das Fms. Enni, Argir, Sneis, Malinstindur, Prestfjall e Beinivørð, de idade Cenozoica. A qualidade de reservatório é diretamente dependente do tipo de fácies que a amostra pertence. Consideraram que as melhores amostras com aspectos de reservatório apresentaram 20-43% de porosidade e 1-110 mD de permeabilidade. A porosidade analisada em lâmina delgada apresentou variação de inexistente a 25,78%. O estudo identificou quatro tipos de porosidade primária (intershard, intercrystalina, vesicular, interclastos) e um tipo de porosidade secundária (fratura).

2.6.4 Rochas selantes

As rochas selantes têm a função de reter o óleo e gás, impedindo a migração vertical. Desse modo, essas litologias necessitam de baixa permeabilidade junto com alta pressão capilar para concentrar os fluidos (Selley & Sonnenberg, 2022).

Rochas magmáticas, como derrames basálticos, diques e soleiras de diabásio, atuam muitas vezes como selantes e impedem a migração no reservatório e retêm o óleo ou o gás. No campo de gás de Barra Bonita, Bacia do Paraná, as soleiras de diabásio atuam como rochas selos (Figura 22; Eiras e Filho, 2003).

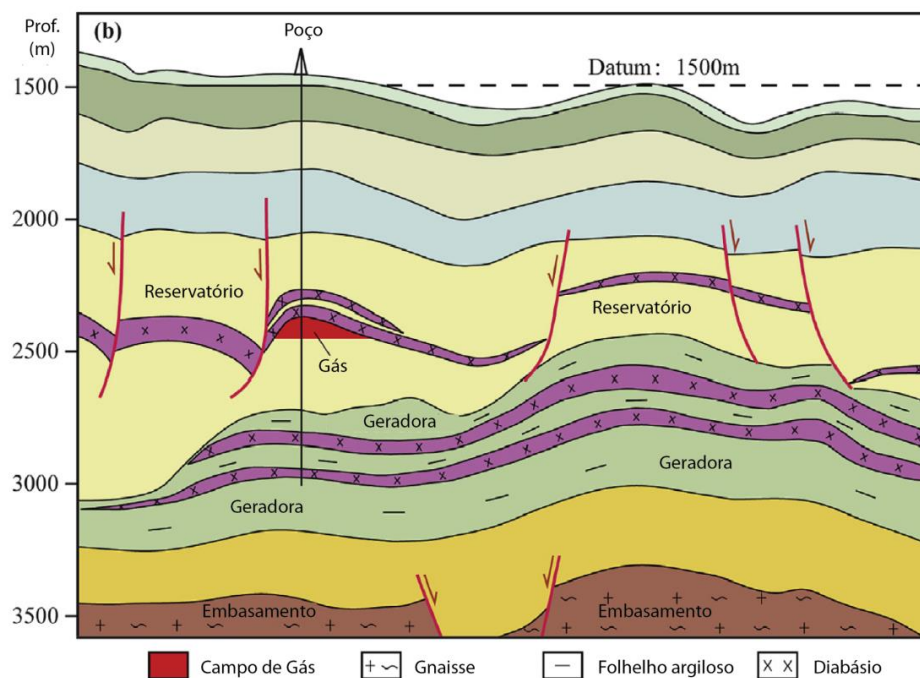


Figura 22 - Seção geológica do reservatório de gás de Barra Bonita (Fonte: modificado após Eiras e Filho, 2003).

2.6.5 Traps

As *traps* ou armadilhas consistem em situações geológicas em que o arranjo espacial de rochas reservatório e selante é propício à acumulação de óleo e gás. São classificadas em estruturais, estratigráficas, hidrodinâmicas e mistas (Selley & Sonnenberg, 2022).

Armadilhas formadas por intrusões magmáticas contribuem para o aprisionamento de hidrocarbonetos no sistema petrolífero, ao gerarem campos de tensões que podem deformar as rochas sedimentares encaixantes. Soleiras de diabásio (Fm. Mosquito) exercem a função de *traps* sobre os reservatórios areníticos das Fms. Cabeças e Poti na Bacia do Parnaíba (Figura 23; Miranda *et al.*, 2018).

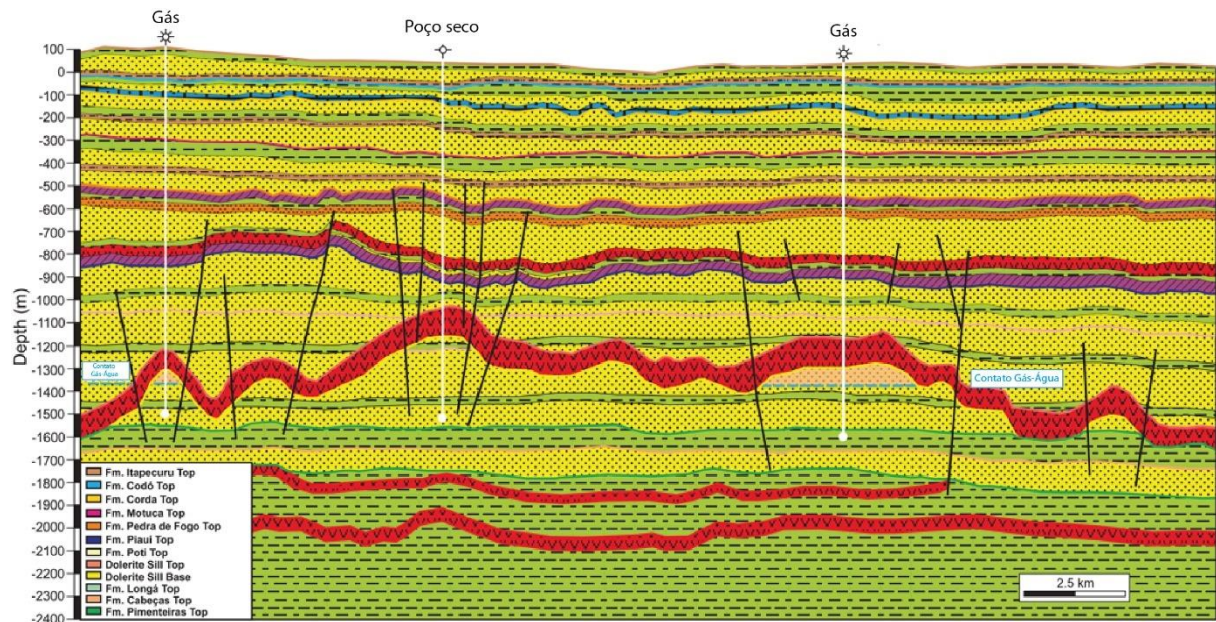


Figura 23 - Seção geológica esquemática com o modelo do principal mecanismo de trapeamento para acumulação comercial de gás. As soleiras de diabásio criam estruturas de fechamento e selam as acumulações de gás nos estratos sedimentares. Fonte: Miranda *et al.*, 2018.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Etapa Pré-Campo

Na etapa pré-campo foram realizadas a revisão bibliográfica e utilizadas técnicas de sensoriamento remoto.

3.1.1 Revisão Bibliográfica

O levantamento bibliográfico estabeleceu a base para o estado da arte do tema proposto, a partir de trabalhos e artigos científicos com a finalidade de construir o embasamento teórico para o desenvolvimento deste projeto. O foco desta etapa compreendeu a revisão de conceitos sobre o contexto geológico regional e local da área em estudo, da petrologia e geoquímica do Grupo Serra Geral, estratigrafia e padrões de porosidade em depósitos vulcânicos e sistemas petrolíferos ígneos-sedimentares.

3.1.2 Sensoriamento Remoto

O sensoriamento remoto foi proposto como uma ferramenta para a confecção de mapas, auxiliando no mapeamento e na estratigrafia do local de estudo. Para isso, foram utilizados os softwares QGis 3.16 e Google Earth PRO 7.3.4, ambos de acesso gratuito. De base para os programas, foram utilizados mapas geológicos do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), cartas topográficas do exército brasileiro (EB) na escala 1:50.000, mapa base *Open Street Map* (OSM) e rede de drenagens e curvas de nível fornecidos pela Fundação Estadual de Proteção Ambiental - RS (FEPAM).

3.2 Etapa de Campo

Realizou-se uma saída de campo no período 2 a 5 de janeiro de 2023, na porção nordeste do Rio Grande do Sul, contemplando as cidades de Osório, Santo Antônio da Patrulha, Riozinho e Torres (Figura 24). Descreveu-se 20 afloramentos, sendo confeccionadas 17 seções colunares.

Nesta etapa ocorreu a identificação e classificação dos tipos de derrames vulcânicos, bem como a caracterização de litofácies e suas associações para elaborar o arcabouço estratigráfico. Para isso, foram levantadas seções colunares dos afloramentos visitados.

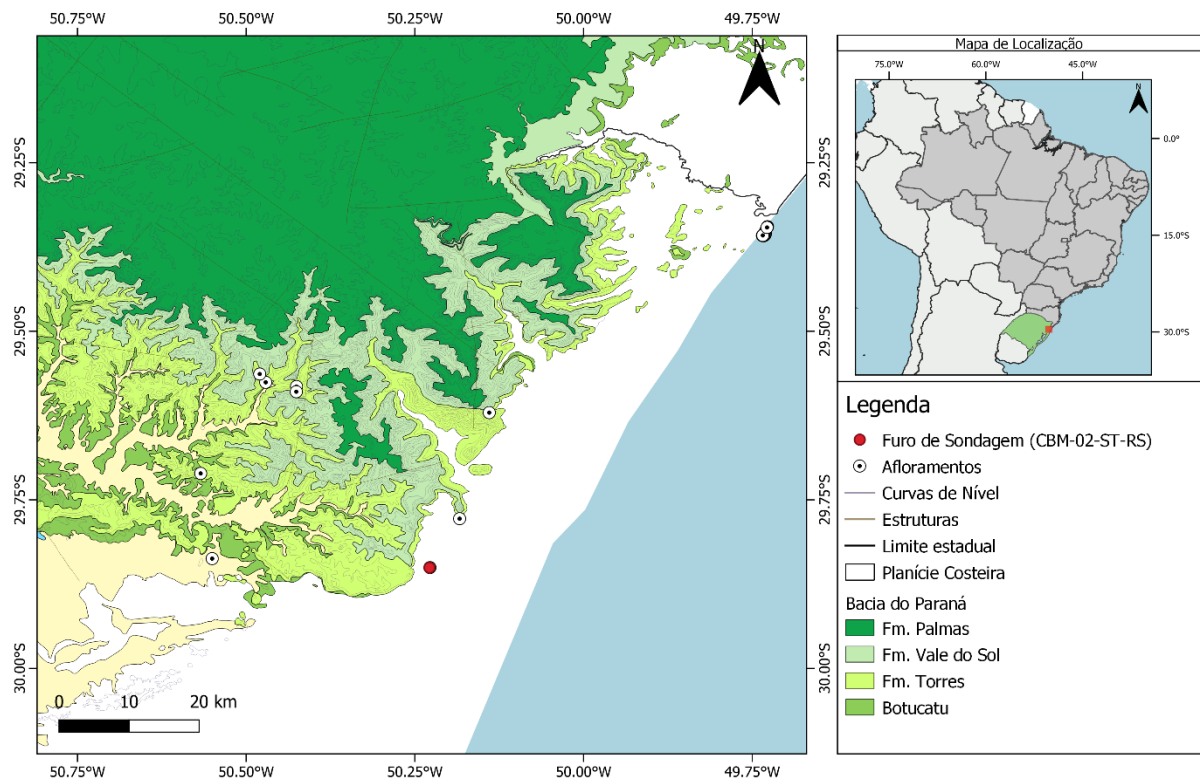


Figura 24 - Mapa geológico com a localização dos afloramentos e do furo de sondagem (Fonte: do autor).

O estudo conta ainda com um testemunho de sondagem (CBM-02-ST-RS), realizado no município de Osório (29° 51'1,945" S, 50° 13' 39,602" O), com 831 m de profundidade e que abrange, da base para o topo, as formações Rio Bonito, Irati, Palermo, Estrada Nova, Botucatu e o Grupo Serra Geral. As rochas vulcânicas possuem espessura de 127,1 m (236,7–109,6 m). Este estudo restringe-se ao intervalo de 236,7-172,55 (64,15 m). O furo de sondagem foi executado a uma altitude de 3 m e a um ângulo de 90° em relação ao plano horizontal. O material coletado possui 63 mm de largura e seu aproveitamento no intervalo descrito foi aproximadamente 95%.

A descrição das litofácies se baseou no modelo adotado por Mcphie *et al.* (1993) (Figura 25), na qual fundamenta-se em um código com pelo menos duas letras,

sendo uma maiúscula, que se refere à condição litológica primária, e outra minúscula, que destaca os aspectos estruturais e/ou texturais.

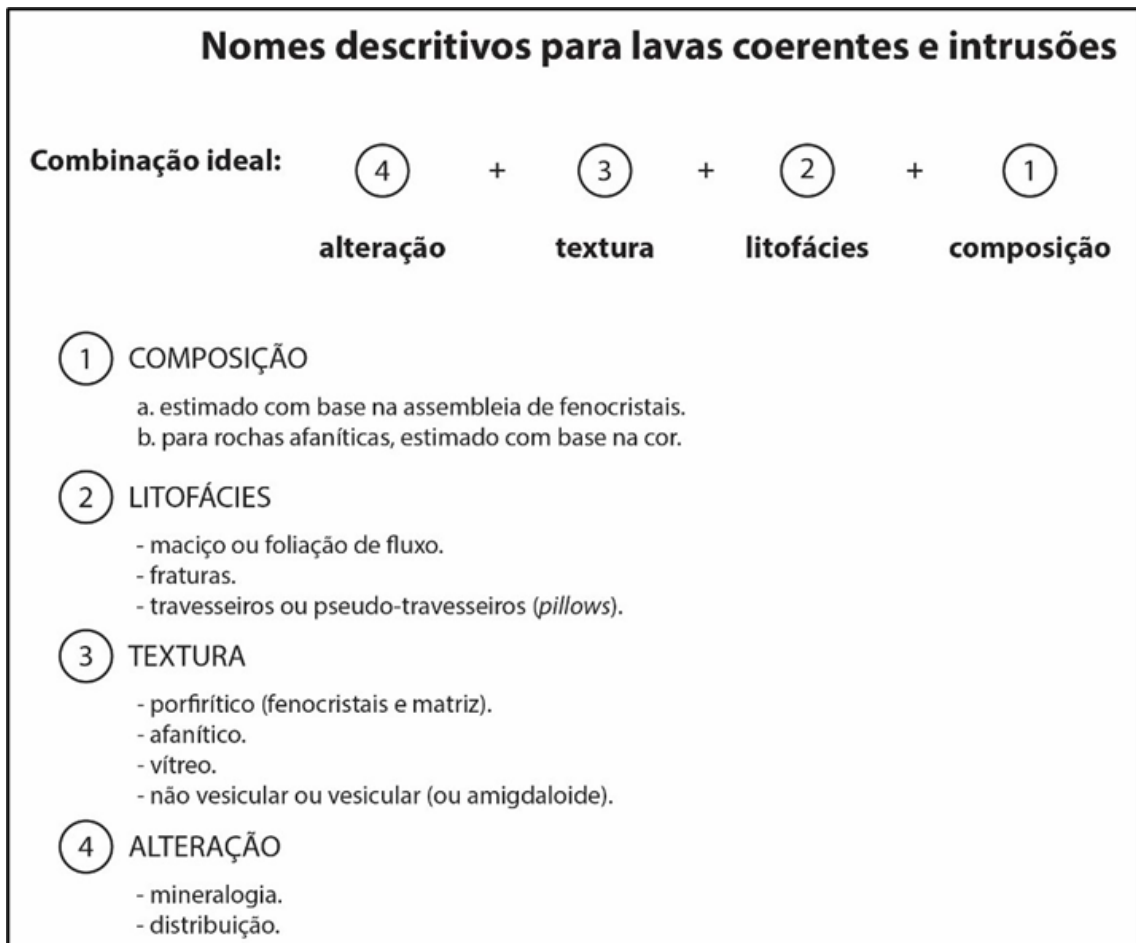


Figura 25 - Modelo utilizado para as litofácies (Fonte: modificado de McPhie *et al.*, 1993).

3.2.1 Seções Colunares

A construção do arcabouço estratigráfico foi elaborada com o levantamento de 17 seções colunares em escalas variáveis (1:200, 1:250, 1:600) para caracterizar graficamente a sucessão vertical das litofácies vulcânicas. Para cada seção, além do perfil colunar confeccionado, foi descrito a caracterização litológica, fundamentada na cor, textura, estrutura e mineralogia primária, e a designação de amostragem com letras, à esquerda do perfil (Figura 26).

Ponto/Seção: Localização:		Data: Escala:	
<p style="text-align: center;">Areia</p> <p style="text-align: center;">Bl Sx Gr G M F Mf S Ag</p> <p style="text-align: center;">Fanerítico Afanítico</p>		Fácies	Ass. de Fácies

Figura 26 - Planilha utilizada para o levantamento estratigráfico em campo (Fonte: do autor).

3.2.2 Amostragem e Aquisição Fotográfica

A amostragem foi realizada ao longo do levantamento das seções colunares para cada litofácies descrita na sucessão vertical, com o auxílio de martelo, marreta e talhadeira. Ao total foram coletadas 22 amostras, 10 em campo e 12 do testemunho de sondagem. Para a localização da amostragem utilizou-se um GPS Garmin 60 CSx com precisão de 3 m. Além disso, realizou-se a aquisição fotográfica dos afloramentos visitados e do testemunho de sondagem, evidenciando a sucessão vertical da sequência vulcânica.

3.3 Etapa Pós Campo

A etapa pós-campo envolveu a preparação de amostras para as análises, o tratamento dos dados de campo, análise petrográfica, aquisição e tratamento de dados geoquímicos, análise petrofísica e a integração final dos dados.

3.3.1 Tratamento dos Dados de Campo

As seções colunares levantadas na etapa de campo e do testemunho foram digitalizadas e desenhadas em softwares de design gráfico (Adobe Illustrator e CorelDraw). As fotografias das litofácies e associação destas foram tratadas com programas de edição de fotos (Adobe Photoshop).

3.3.2 Preparação das Amostras

As amostras coletadas em campo e do testemunho foram preparadas para petrografia e geoquímica de rocha total no Laboratório de Preparação de Amostras do Instituto de Geociências da UFRGS. Para a análise petrográfica, as amostras foram serradas a fim de confeccionar lâminas delgadas com 30 µm de espessura e impregnadas com resina azul para análise da porosidade em microescala. As lâminas foram confeccionadas pela PetrografiaBr, em Minas Gerais.

Para a análise geoquímica de rocha total, as amostras foram fracionadas até chegar ao tamanho argila e enviadas ao laboratório *Bureau Veritas Commodities Canada Ltd.*, no Canadá, que realizou a análise de elementos maiores, traços, ETR e

perda ao fogo pelo método de espectrometria por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP).

3.3.3 Petrografia

Foram descritas 10 lâminas delgadas impregnadas do testemunho, caracterizando a mineralogia, aspectos texturais e/ou estruturais e a microporosidade, podendo classificar litologicamente as amostras. A nomenclatura da classificação da microporosidade embasou-se em estudos de Sruoga & Rubinstein (2007). Desse modo, utilizou-se um microscópio petrográfico sob luz transmitida, modelo Leitz Laborlux 12, com uma câmera acoplada, sendo possível adquirir fotomicrografias das lâminas.

3.3.4 Aquisição e tratamento de dados geoquímicos

A análise geoquímica da rocha total foi realizada em sete amostras providas do testemunho pelo método de espectrometria por plasma acoplado indutivamente (ICP) no laboratório Bureau Veritas Commodities Canada Ltd. Para a concentração de elementos maiores e traços utilizou-se a técnica ICP-OES (Espectrometria de Emissão Óptica por Plasma Acoplado Indutivamente) e para os elementos terras raras e refratários a técnica ICP-MS (Espectrometria de Massa com Plasma Indutivamente Acoplado). Ambos os procedimentos consistem na detecção multielementar com a utilização de uma fonte de plasma indutivo no equipamento com a função de atomizar e ionizar os elementos de uma amostra em estudo.

A técnica ICP-OES (Figura 27) baseia-se na medição da radiação eletromagnética emitida por átomos ou íons excitados pelo plasma nas regiões do espectro visível e ultravioleta (160–800 nm). A amostra a ser analisada é utilizada na forma de solução e passa por um processo de nebulização para ser enviada para vaporização, atomização, ionização e excitação na fonte de plasma, com temperaturas acima de 6000K, e assim fornecer os espectros de emissão.

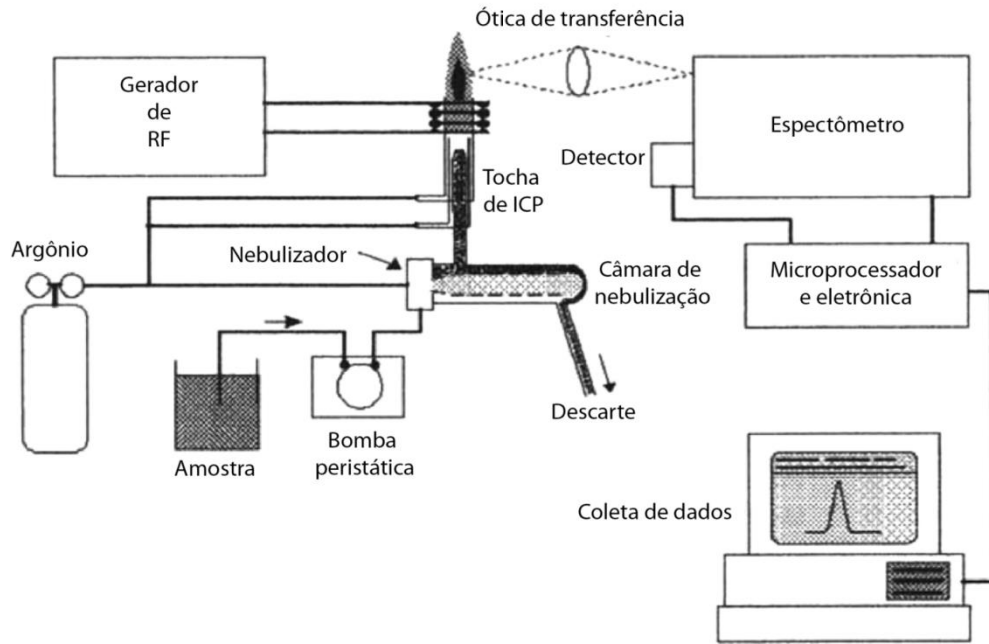


Figura 27 - Diagrama esquemático de um ICP-OES (Fonte: traduzido de Sneddon & Vincent, 2008).

A técnica ICP-MS (Figura 28) baseia-se na medição do número de íons gerados quando a amostra, que passa por nebulização prévia, é aquecida pelo plasma e estes são separados por um campo magnético de acordo com suas proporções massa/carga. A técnica possibilita a análise com baixo limite de detecção.

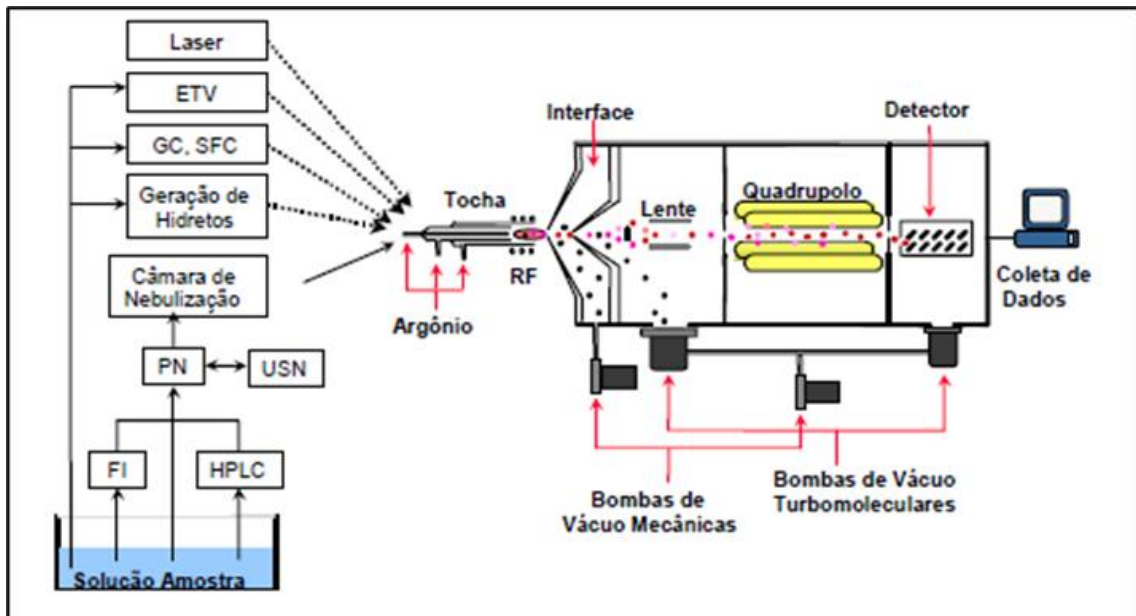


Figura 28 - Sistemas introdução da amostra no plasma (1) e o diagrama esquemático de um ICP-MS (2). As linhas pontilhadas representam a amostra introduzida na forma de vapor e as linhas cheias na forma de aerossol (Fonte: extraído de Pierre, 2004).

Nesta etapa, estudou-se o comportamento dos elementos maiores, traços, ETR e perda ao fogo. Para isso, as amostras foram analisadas pelas técnicas de ICP-OES e ICP-MS. O tratamento dos dados ocorreu através do software Petrograph (Petrelli *et al.*, 2005), sendo possível gerar diagramas de classificação litoquímica (Figura 29).

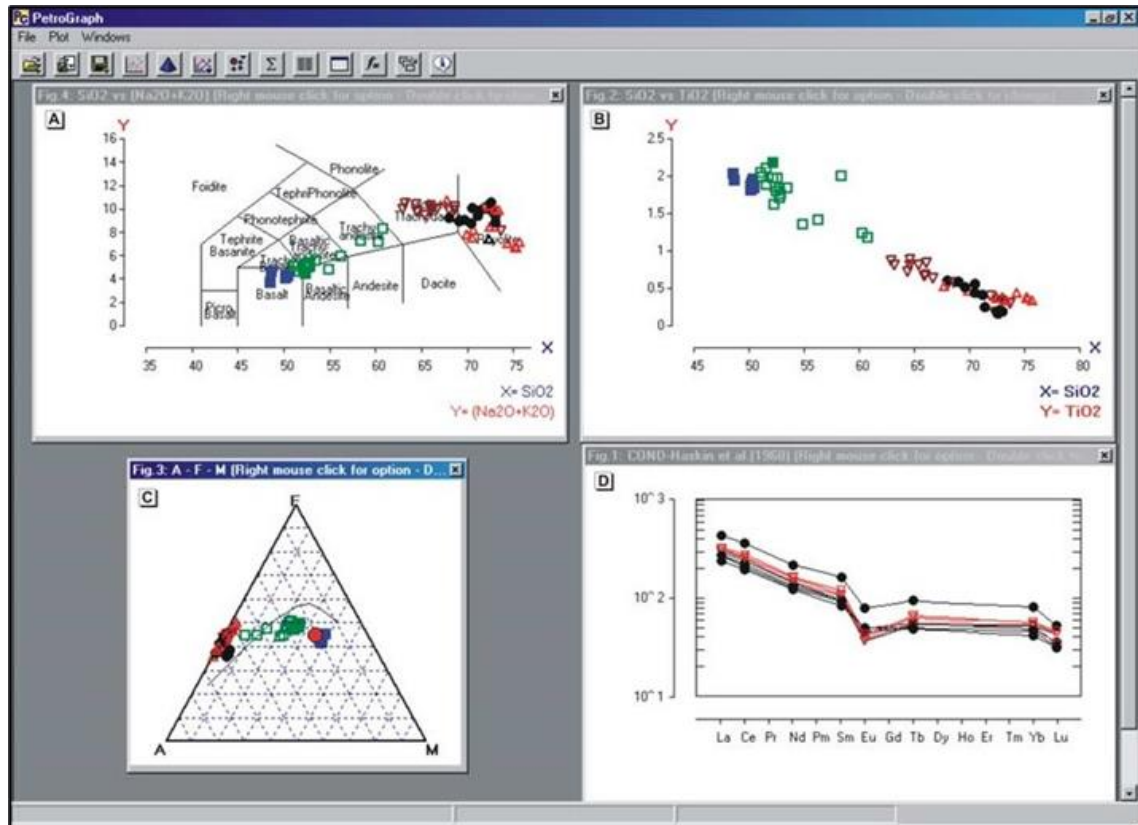


Figura 29 - Interface do programa Petrograph com diagramas de classificação litoquímica (Fonte: Petrelli *et al.*, 2005).

3.3.5 Ensaios Petrofísicos

Para estas análises, as quatro amostras de campo e oito amostras do testemunho, foram cortadas em plugues verticais, com as dimensões de 1 polegada de diâmetro por aproximadamente 2 polegadas de comprimento. As análises foram realizadas no Instituto do Petróleo e dos Recursos Naturais (IPR) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS).

Os ensaios realizados utilizaram o equipamento AP-608 *Automated Porosimeter-Permeameter* (Figura 30), através de medições do volume dos poros utilizando como método a expansão de gás, de acordo com a Lei de Boyle. Ambas as análises consistem em uma metodologia experimental, sendo uma com o foco de

investigar a porosidade (porosímetro) e a outra a permeabilidade (permeâmetro) da rocha. Realizaram-se três medidas de cada parâmetro petrofísico e obteve-se a média como resultado da análise.

A densidade aparente dos plugues foi calculada usando a seguinte fórmula:

$$D = M / V$$

Em que, D: Densidade aparente (g/cm³), M: Peso do plugue (g) e V: Volume do plugue (cm³). O peso dos plugues foi obtido utilizando uma balança de precisão e o volume por meio da medição da altura e raio dos plugues com o auxílio de um paquímetro.

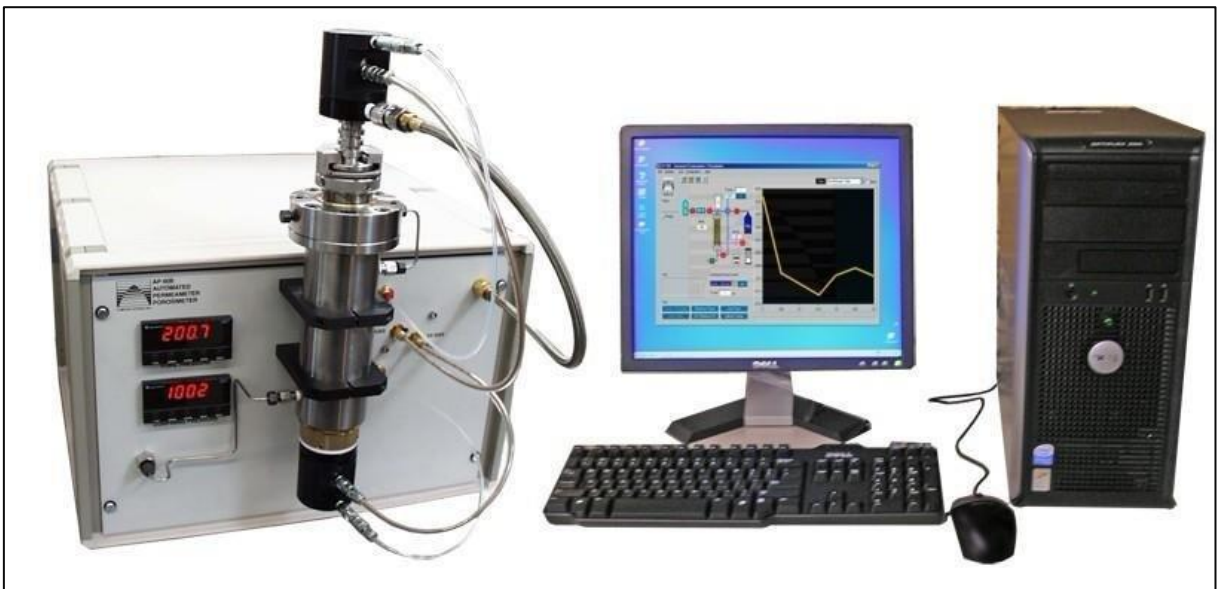


Figura 30 - Exemplo do equipamento utilizado para medição da porosidade e permeabilidade (Fonte: Turnadge *et al.*, 2018).

3.3.6 Integração dos Dados

A integração dos dados e interpretação dos resultados possibilitou a elaboração de um modelo para reservatórios não convencionais vulcânicos que correlaciona os estudos estratigráficos, petrológicos e petrofísicos do furo de sondagem e dos afloramentos em campo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os principais resultados da pesquisa e caracterização das rochas da Fm. Torres a partir da metodologia descrita no capítulo 3.

4.1 Estruturação interna e modelo de *emplacement*

A estruturação interna e distribuição espacial da Fm. Torres no nordeste do RS foi construída a partir do furo de sondagem realizado em Osório e de afloramentos situados em duas pedreiras, três cascatas e na seção tipo da Formação definida por Rossetti *et al.*, (2018), no Parque Municipal da Guarita. Para cada localidade, elaborou-se a interpretação de litofácies com base em estruturas e texturas e, posteriormente, a análise da associação destas.

Confeccionou-se três modelos de *emplacement* da Fm. Torres para os derrames definidos no testemunho de sondagem (Osório) e em afloramentos nas cascatas (Chuvisqueiro, Três Quedas e Ressaco) e na cidade de Torres, considerando a morfologia dos derrames, relações de contato e análogos de campo.

Durante as atividades de campo foram realizados 20 pontos de descrições geológicas, levantadas 17 seções colunares em cinco municípios. Os dados completos de campo com as respectivas coordenadas e cotas dos pontos visitados e a relação de amostras coletadas, confecção de lâminas e análise petrofísica estão inseridos no Apêndice A.

A partir do levantamento de seções colunares de afloramentos em campo e do testemunho de sondagem, identificou-se 16 litofácies (Quadro 6), sendo 12 vulcânicas básicas coerentes, duas vulcanoclásticas e duas sedimentares siliciclásticas (Figura 31, Figura 32, Figura 33, Figura 34 e Figura 35). As litofácies foram agrupadas em seis associações de fácies. As descrições de campo e seções colunares dos afloramentos se encontram no Apêndice B.

Quadro 6 - Descrição e interpretação das litofácies identificadas no campo e no testemunho.

Litofácies	Descrição	Interpretação	Localidade
Bam	Basalto amigdaloidal; amígdalas subarredondadas (mm a cm), preenchidas predominantemente por zeolitas e algumas por quartzo; subordinadamente ocorrem vesículas subarredondadas (mm)	Topo de derrame <i>pahoehoe</i>	Pedreira Morro Alto, Pedreira São Joaquim, Torres
Bvl	Basalto afanítico com vesículas/amígdalas do tipo <i>layering</i> , preenchidas por zeolita	Topo de derrame <i>pahoehoe</i>	Pedreira Morro Alto
Bv	Basalto vesiculado; vesículas esféricas (mm a cm)	Topo de derrame <i>pahoehoe</i>	Torres
Bc	Basalto afanítico com disjunções colunares do tipo colunata e em menor proporção tabulares (estrutura em cinzel) localizadas na porção basal	Núcleo de derrame do tipo <i>ponded</i>	Cascata Chuvisqueiro, Cascata Três Quedas, Torres
Bm	Basalto afanítico maciço	Núcleo de derrame <i>pahoehoe</i>	Pedreira Morro Alto, Cascata Chuvisqueiro, Cascata do Ressaco
Be	Basalto afanítico com disjunção colunar do tipo entablamento	Base de derrame do tipo <i>ponded</i>	Cascata Chuvisqueiro, Torres
Bpi	Basalto afanítico com vesículas/amígdalas alongadas do tipo pipe, preenchidas por zeolita	Base de derrame <i>pahoehoe</i>	Pedreira Morro Alto
Bdc	Basalto com disjunções colunares apertadas e regularmente espaçadas	Intrusão	Torres, Pedreira São Joaquim
Bpam	Basalto porfirítico com fenocristais de plagioclásio e piroxênio; amígdalas esféricas (mm a cm)	Topo de derrame <i>pahoehoe</i>	Osório (Testemunho)
Bps	Basalto profirítico com estruturas de segregação; fenocristais de plagioclásio e piroxênio; amígdalas estiradas (mm)	Núcleo de derrame <i>pahoehoe</i>	Osório (Testemunho)
Bpm	Basalto porfirítico maciço, com fenocristais de	Núcleo de derrame <i>pahoehoe</i>	Osório (Testemunho)

	plagioclásio e piroxênio		
Bpv	Basalto porfirítico vesiculado, com fenocristais de plagioclásio e piroxênio; vesículas esféricas (mm)	Base de derrame <i>pahoehoe</i>	Osório (Testemunho)
BBma [s]	Brecha basáltica vesicular/amigdaloidal de matriz arenosa superior, com proporção de clastos vulcânicos = sedimentos; fragmentos basálticos centimétricos a milimétricos (fragmentos milimétricos restritos a matriz), variando de angular a fluidal	Peperito formado pela interação de derrames basálticos e sedimentos inconsolidados	Torres
BBma [i]	Brecha basáltica vesicular/amigdaloidal de matriz sedimentar, com proporção de clastos vulcânicos > sedimentos; fragmentos basálticos centimétricos	Peperito formado pela interação de derrames basálticos e sedimentos inconsolidados	Torres
Act	Arenito médio quatzofeldspático, bem selecionado com estratificação cruzada tangencial de grande porte	Duna eólica	Torres, Cascata do Chuvisqueiro
App	Arenito médio quatzofeldspático, bem selecionado com estratificação plano-paralela	Lençol de areia	Torres



Figura 31 - Basalto com disjunções colunares (Bdj) típicas de intrusão na Pedreira São Joaquim (Fonte: do autor).

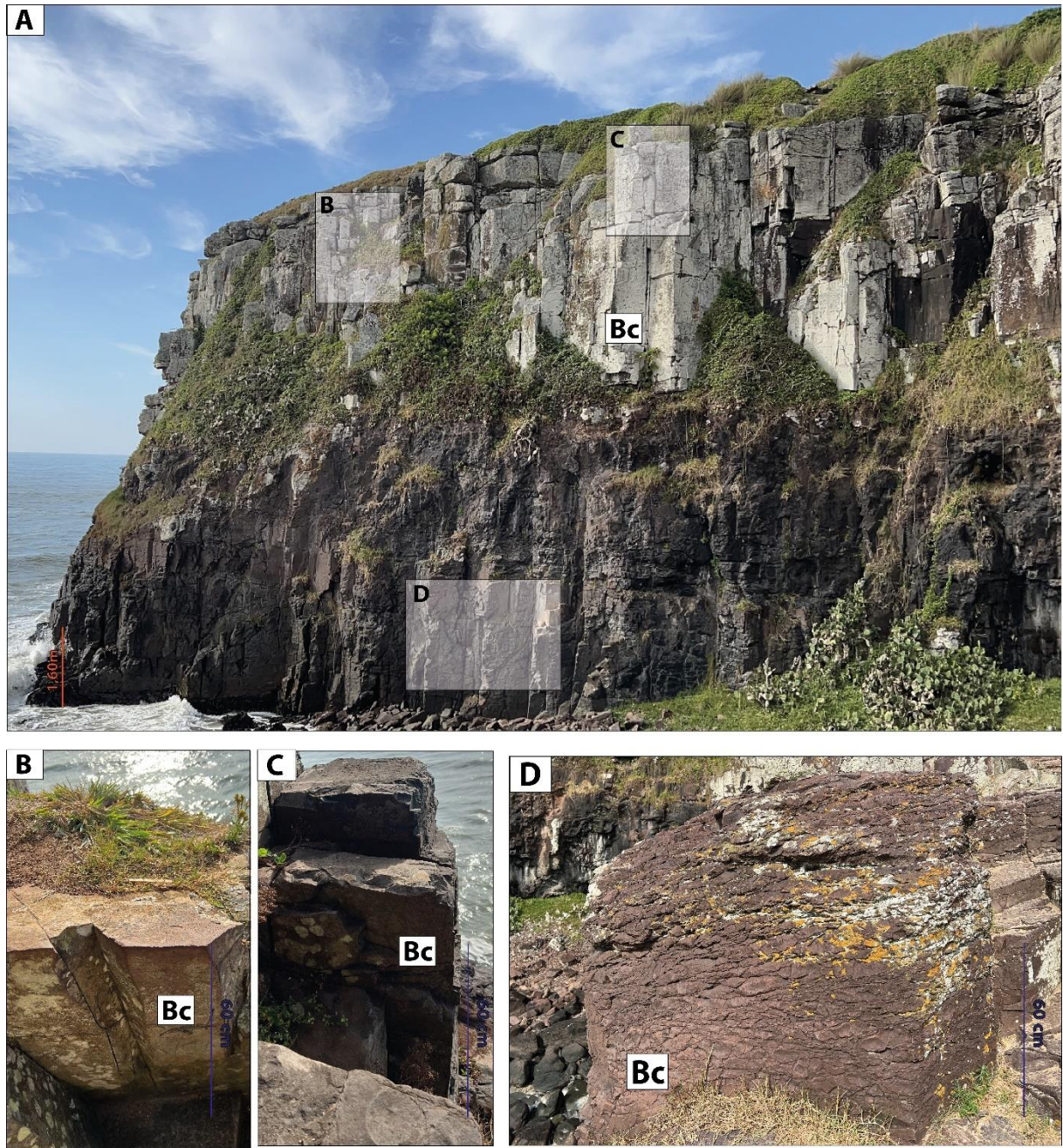


Figura 32 - Litofácies vulcânicas identificadas no campo. A) Morro das Furnas, próximo a seção 23-IM-09, destacando a litofácies Bc (Basalto com colunatas). B) Escada do Saltinho (23-IM-10), colunata em formato hexagonal. C) Escada do Saltinho (23-IM-10), colunata em forma de quadrado. D) Disjunções tabulares (estruturas em cinzel) na seção 23-IM-09. Fonte: do autor.

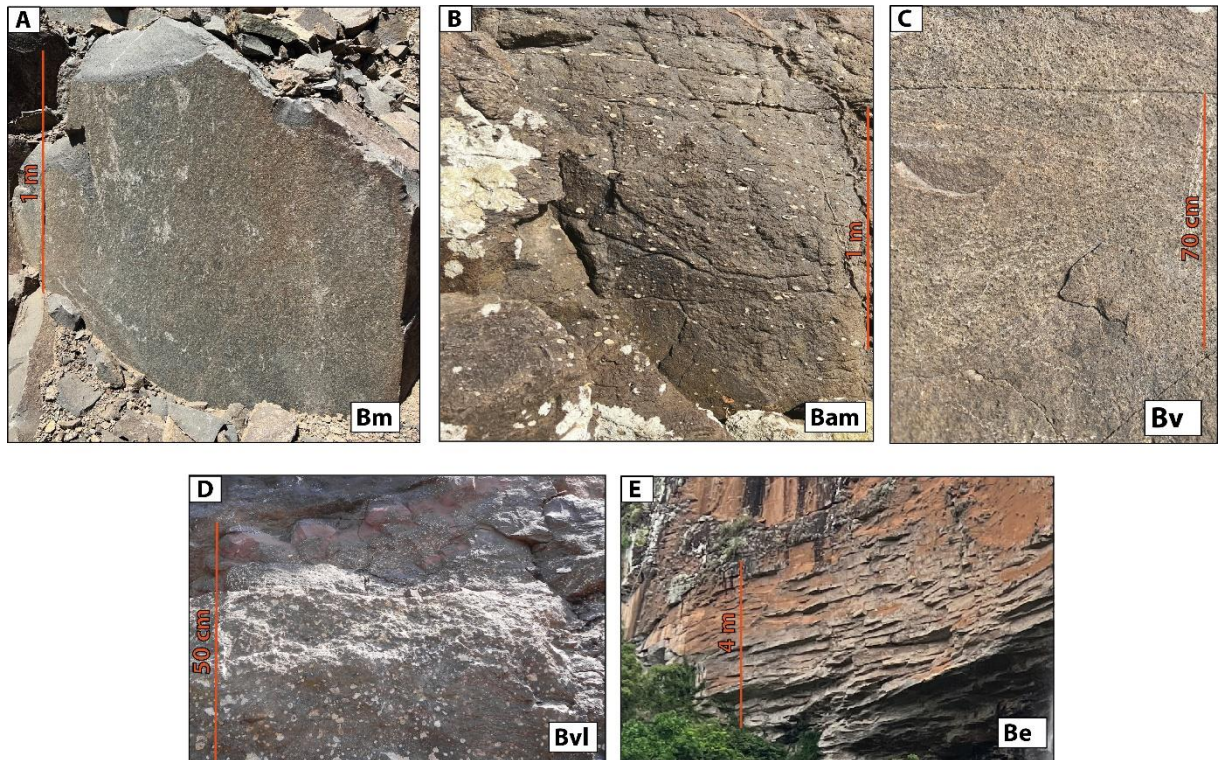


Figura 33 - Litofácies vulcânicas identificadas no campo. A) Núcleo maciço de derrame *pahoehoe* (Bm) na Pedreira São Joaquim. B) Topo amigdaloidal de derrame *pahoehoe* (Bam) na Escada do Saltinho (23-IM-10). C) Topo vesiculado e derrame *pahoehoe* (Bam) na Escada do Balcão e Pesqueiro Feio (23-IM-11). D) Topo com vesiculação em *layering* (Bvl) na Pedreira Morro Alto. E) Base de derrame com entablamento (Be) na Cascata do Chuisqueiro. Fonte: do autor.

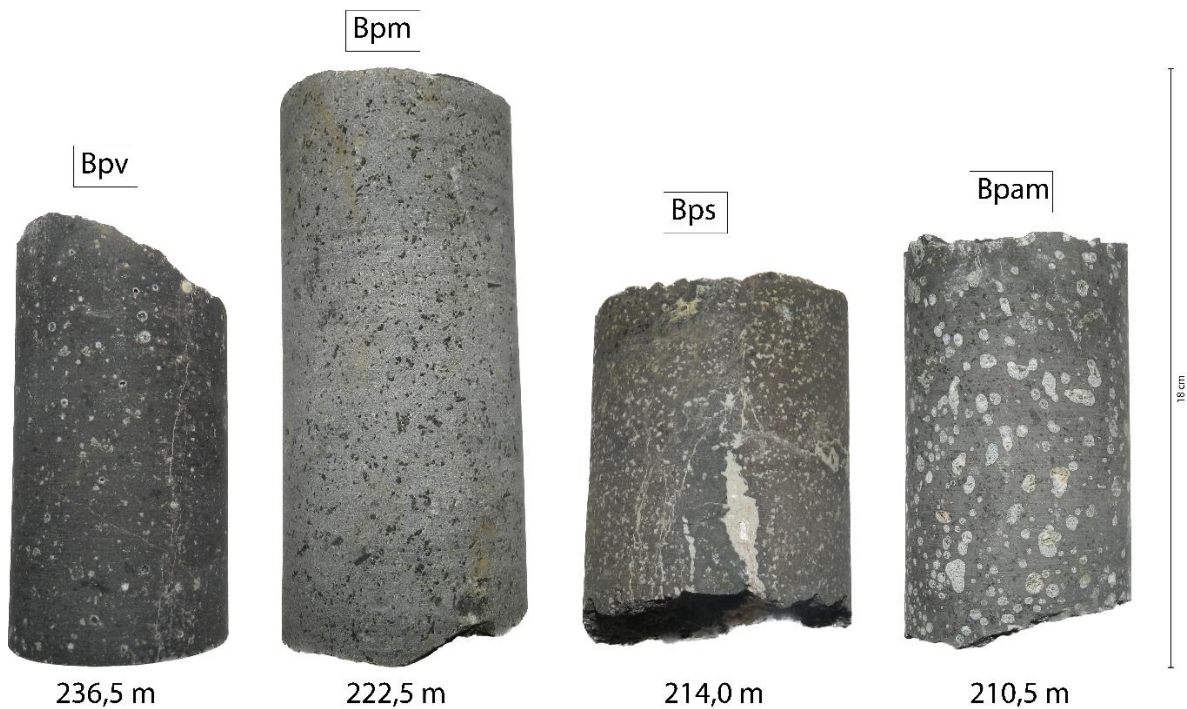


Figura 34 - Litofácies vulcânicas identificadas no testemunho de sondagem. Basalto porfirítico vesiculado (Bpv). Basalto porfirítico maciço (Bpm). Basalto porfirítico com estruturas de segregação (Bps). Basalto porfirítico amigdaloidal (Bpam). Fonte: do autor.

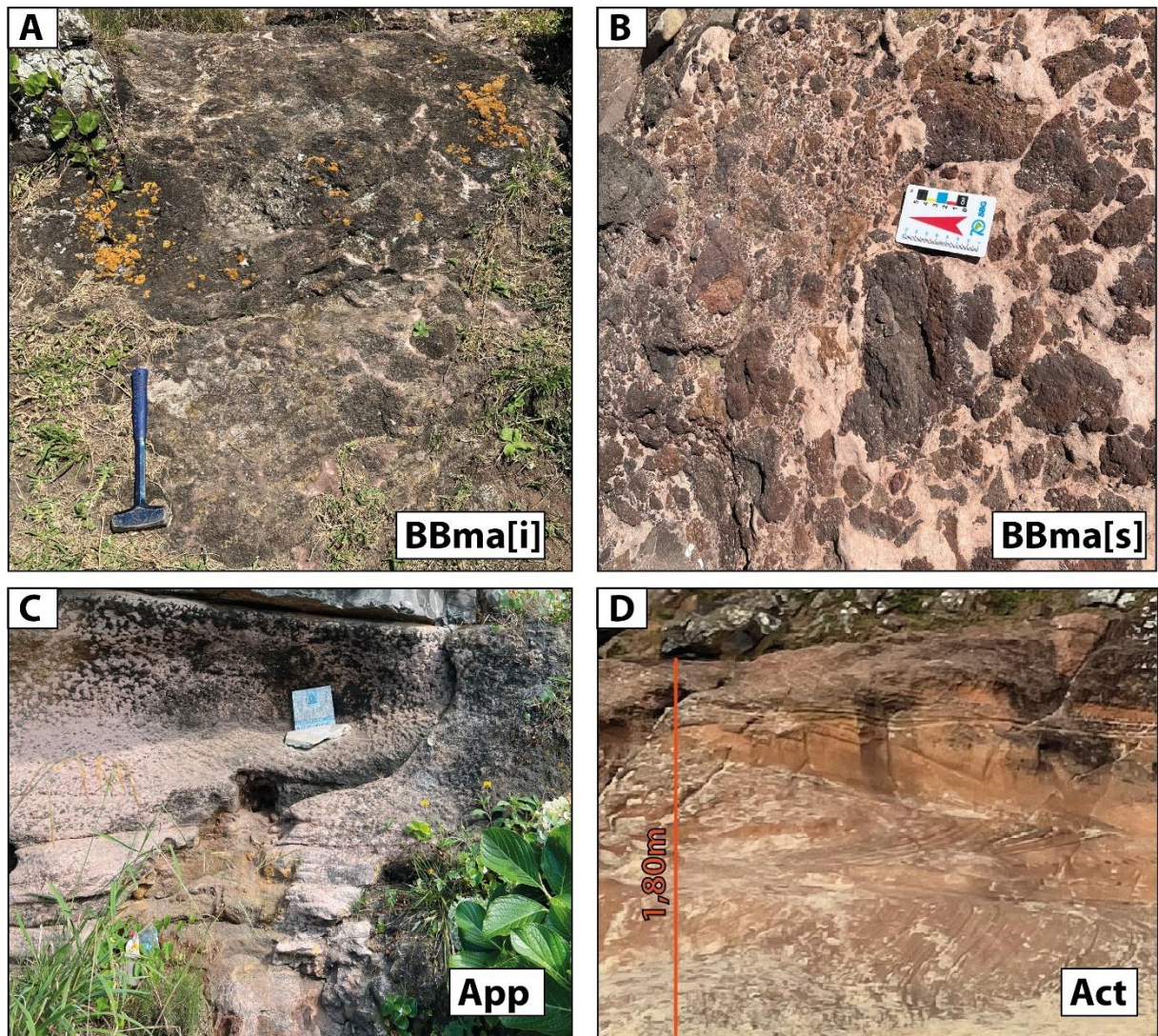


Figura 35 - Litofácies vulcanoclásticas (superior) e siliciclásticas (inferior) identificadas no campo. A) Peperito inferior (BBma[i]), com proporção de fragmentos vulcânicos maior que matriz sedimentar, no Morro do Farol (23-IM-19). B) Peperito superior (BBma[s]), com proporção de fragmentos vulcânicos similar à matriz sedimentar, no Morro do Farol (23-IM-19). C) Lençol de areia (App) no Morro do Farol (23-IM-20). D) Duna eólica (Act) na Torre da Guarita (23-IM-17). Fonte: do autor.

4.1.1 Osório

O testemunho de sondagem (CBM-02-ST-RS) cedido pelo Prof. Dr. Wolfgang Dieter Kalkreuth e equipe foi realizado em Osório. As rochas vulcânicas no testemunho possuem espessura de 127,1 m (236,7 – 109,6 m). Este estudo restringe-se ao intervalo de 236,7 - 172,55 m.

No intervalo estudado foram descritas litofácies de basalto porfirítico vesiculado (Bpv), basalto porfirítico maciço (Bpm), basalto porfirítico com estruturas de segregação (Bps) e basalto porfirítico amigdaloidal (Bpam).

A litofácies Bpv consiste em um basalto de cor cinza escura com matriz afanítica e fenocristais de plagioclásio (2%) e piroxênio (3%) com dimensões médias de 2 mm. Vesículas esféricas com 1 a 5 mm de diâmetro com população de 5% e preenchimento parcial por quartzo e zeolita. Devido à pequena espessura, vesículas subarredondadas pequenas e com baixa densidade é interpretado como base de derrame do tipo *pahoehoe* (Figura 36).

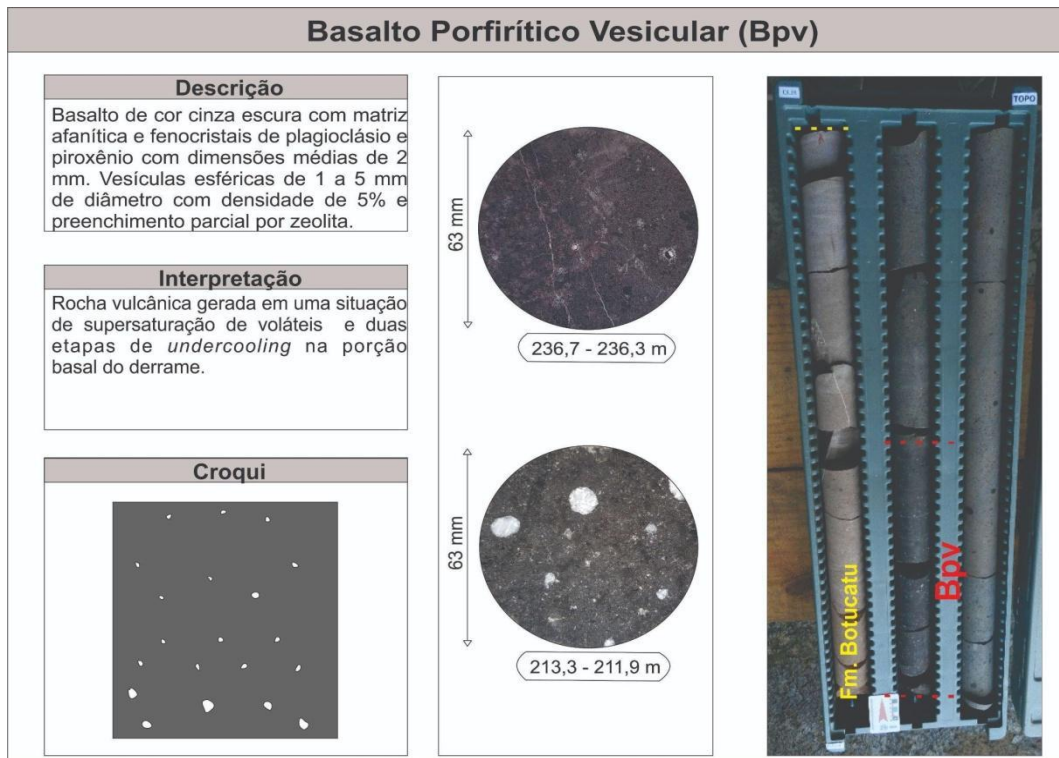


Figura 36 - Características da litofácies Bpv (Fonte: autor).

A litofácies Bpm compreende um basalto de cor cinza clara com matriz fernerítica fina a média e fenocristais de plagioclásio (5%) e piroxênio (7%) com dimensões médias de 3 mm. Amígdalas esféricas esparsas de em média 1 a 5 mm de diâmetro e população <1%, preenchidas por zeolita. Interpretado como núcleo de derrame do tipo *pahoehoe* (Figura 37).

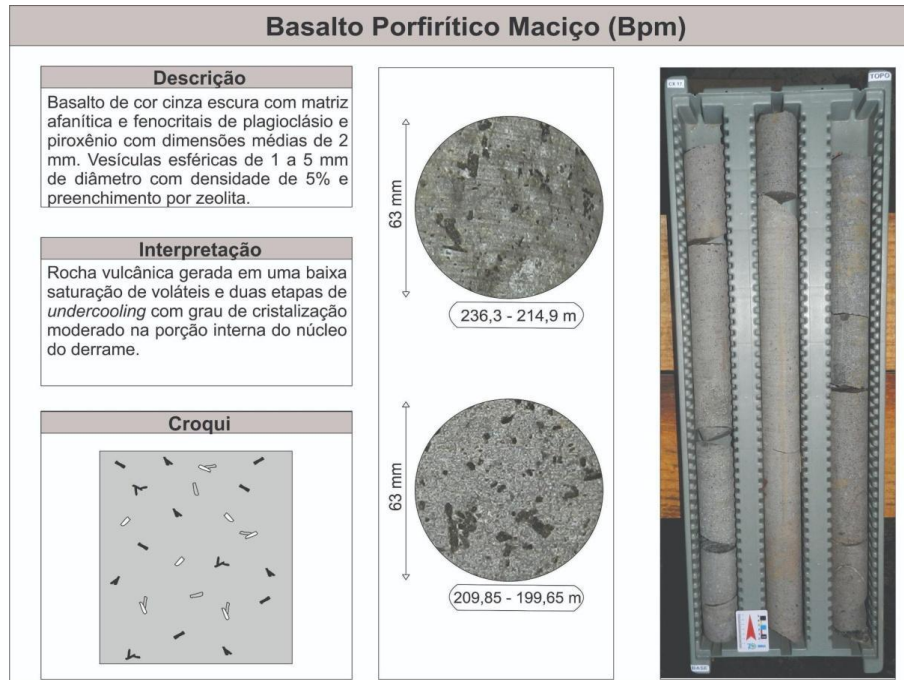


Figura 37 - Características da litofácies Bpm (Fonte: autor).

A litofácies Bps é definida como um basalto de cor cinza castanha com matriz afanítica e fenocristais de plagioclásio (3%) e piroxênio (5%) com dimensões médias de 2 mm. Amígdalas estiradas de 1 a 6 mm de diâmetro, população de 7% e preenchimento por zeolita. Apresenta estruturas de segregação. Interpretado como topo do núcleo de derrame do tipo *pahoehoe* (Figura 38).

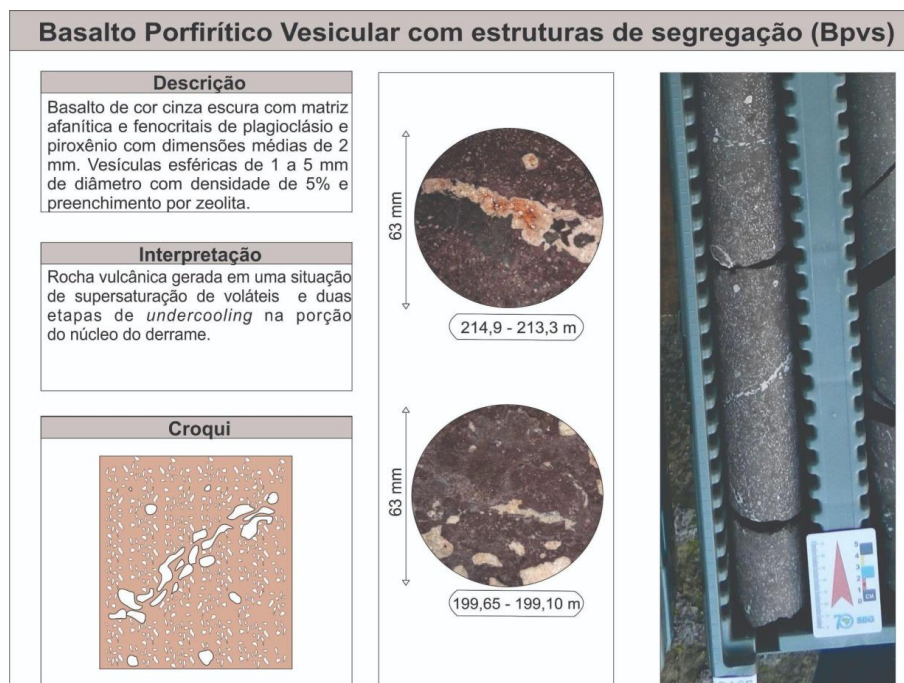


Figura 38 - Características da litofácies Bps (Fonte: autor).

A litofácies Bpam consiste em um basalto de cor cinza clara com matriz afanítica e fenocristais de plagioclásio (3%) e piroxênio (7%) com dimensões médias de 3 mm. Apresenta amígdalas esféricas de 0,5 cm a 2 cm de diâmetro e população de 10%, preenchidas por zeolita e quartzo. Interpretado como topo de derrame do tipo *pahoehoe* (Figura 39).

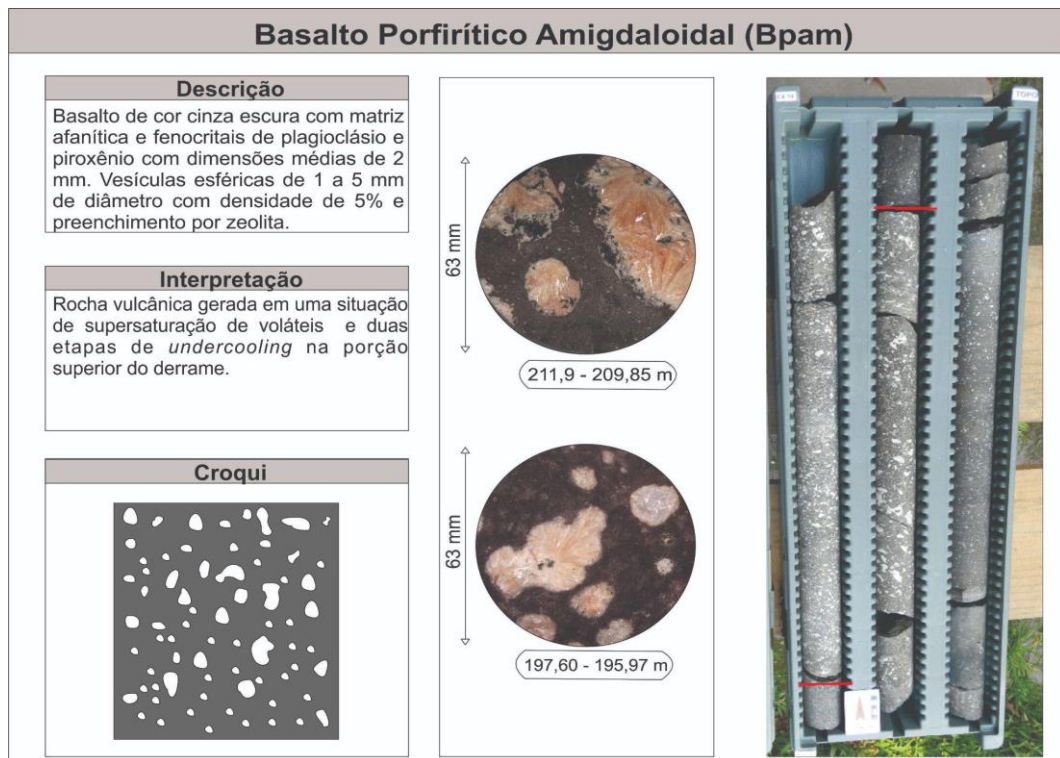


Figura 39 - Características da litofácies Bpam (Fonte: autor).

Ao longo de 64,15 m foram descritas quatro litofácies, agrupadas em duas associações de litofácies (Figura 40), interpretadas como derrames *pahoehoe*. Todas as litofácies descritas no testemunho são de rochas vulcânicas básicas. É importante ressaltar que a morfologia dos derrames foi interpretada com base na sucessão vertical de fácies, em uma direção (1D), devido a isso não é possível avaliar a continuidade lateral, pois se trata de um único furo de sondagem.

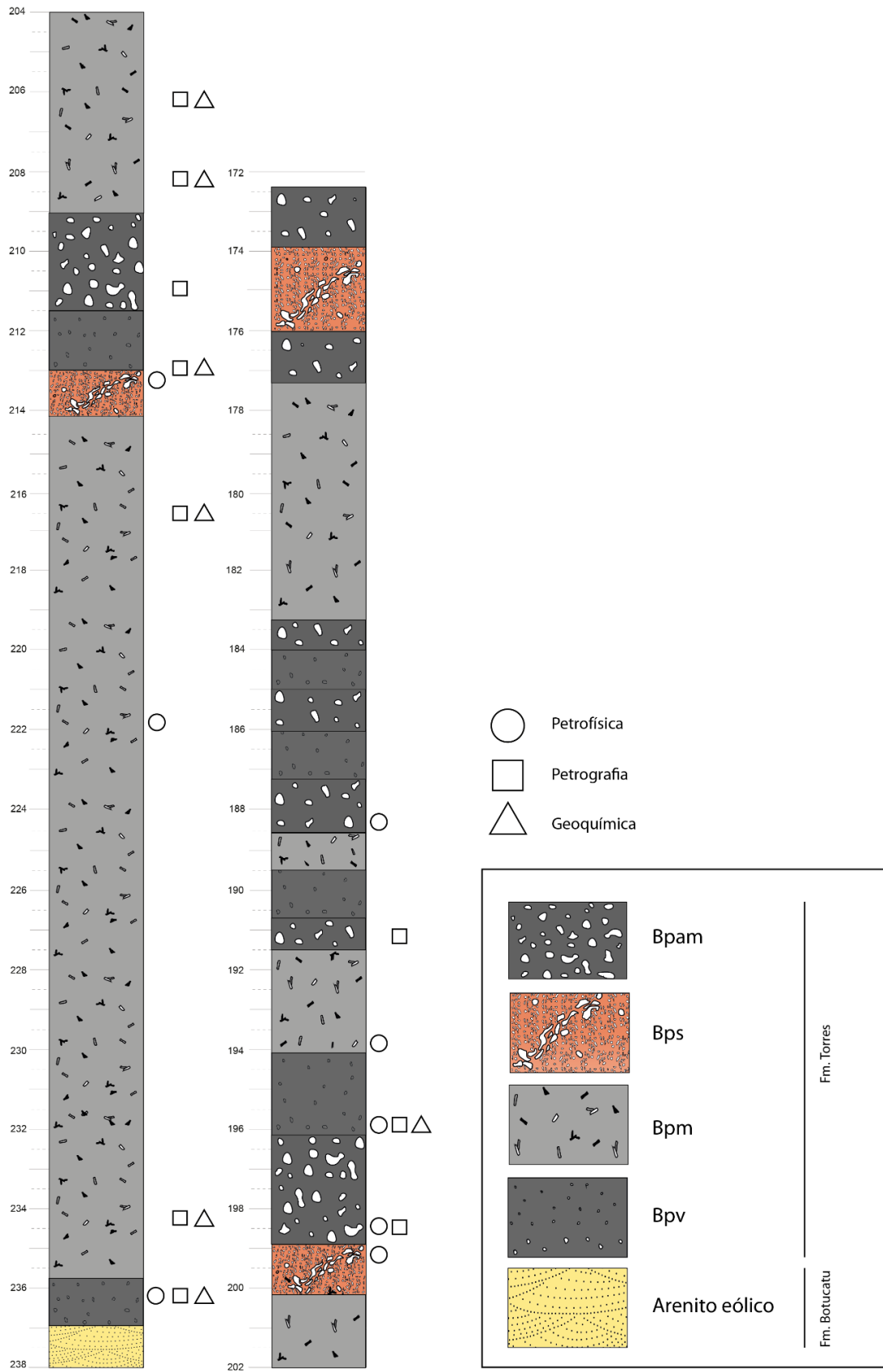
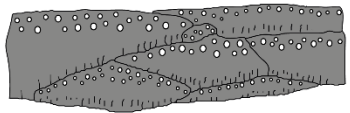
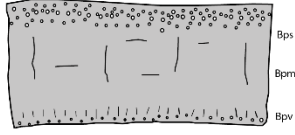


Figura 40 - Seção colunar do testemunho de sondagem, evidenciando as litofácies descritas (Fonte: autor).

Na sequência vulcânica analisada do testemunho de sondagem foi definida duas associações de fácies: *sheet pahoehoe* e *hummocky pahoehoe* (Quadro 7).

Quadro 7 - Descrição e interpretação das litofácies da sucessão vulcânica do testemunho.

Associação de Litofácies	Litofácies	Descrição	Interpretação	Geometria de Fácies
<i>Hummocky Pahoehoe</i>	Bpv, Bpam, Bpm, Bvs	Conjunto de lobos <i>pahoehoe</i> empilhados em um arranjo complexo	Baixa taxa de efusão, pequeno volume de lava, topografia ondulada, coalescência de lobos	
<i>Sheet pahoehoe</i>	Bpv, Bpm, Bvs	Lobos tabulares com estrutura interna dividida em porção basal, núcleo maciço e crosta superior vesiculada	Baixa taxa de efusão em erupções contínuas, topografia levemente ondulada	

A associação de fácies Bpv, Bpm e Bps foi interpretada como um derrame básico do tipo *sheet pahoehoe* com cerca de 24 m de espessura. A Bpv corresponde a base do derrame, composta por baixa densidade de vesículas e com pequena espessura (0,40 m). A Bpm consiste no núcleo maciço do derrame, com amígdalas esféricas esparsas. A Bps compreende no topo oxidado do derrame, no qual as estruturas de segregação marcam o nível superior do núcleo para a base do topo. Um possível análogo de campo para este tipo derrame é apresentado na Figura 41, com típica estruturação interna em tripartida (crosta vesicular inferior – núcleo – crosta vesicular superior).

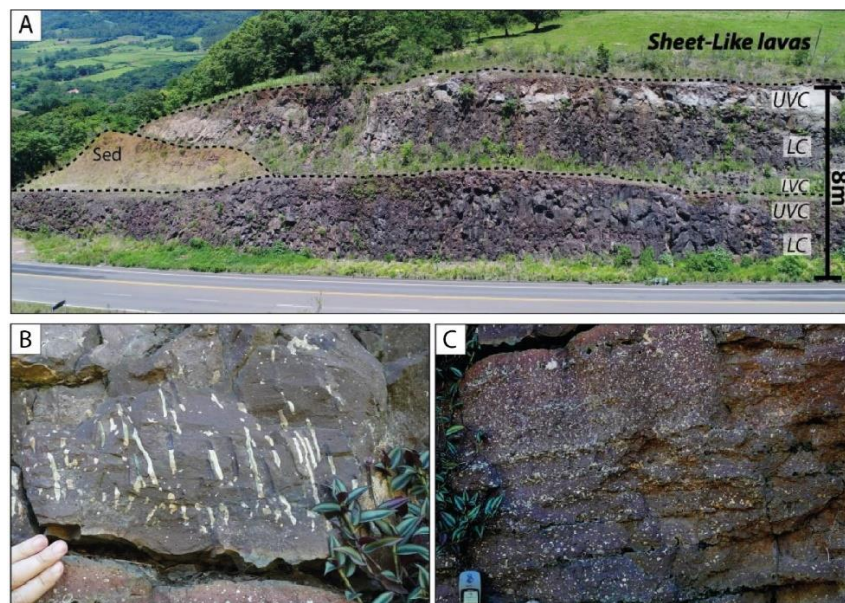


Figura 41 – A) Derrame *sheet pahoehoe* com uma estrutura tripartida de crosta vesicular inferior (LVC), núcleo de lava (LC) e crosta vesicular superior (UVC). B) Detalhe da LVC, com pipe vesicles. C) Detalhe da UVC, com vesículas em *layering*. Todas as figuras foram extraídas de Rossetti *et al.*, 2019.

A associação de litofácies Bpv, Bpm, Bps e Bpam, por sua heterogeneidade na morfologia e dimensões das vesículas, pode ser interpretada como derrame *hummocky pahoehoe*, formado pela coalescência de pequenos lobos devido a topografia ondulada. Identificou-se quatro conjuntos de lobos (Bpv, Bps e Bpam) com em média 5 m de espessura. Em determinadas profundidades o núcleo dos lobos tem estrutura maciça (Bpm) e podem ser mais espessos. Na Figura 42 é possível observar um possível análogo de campo deste derrame, constituído por um conjunto de lobos.

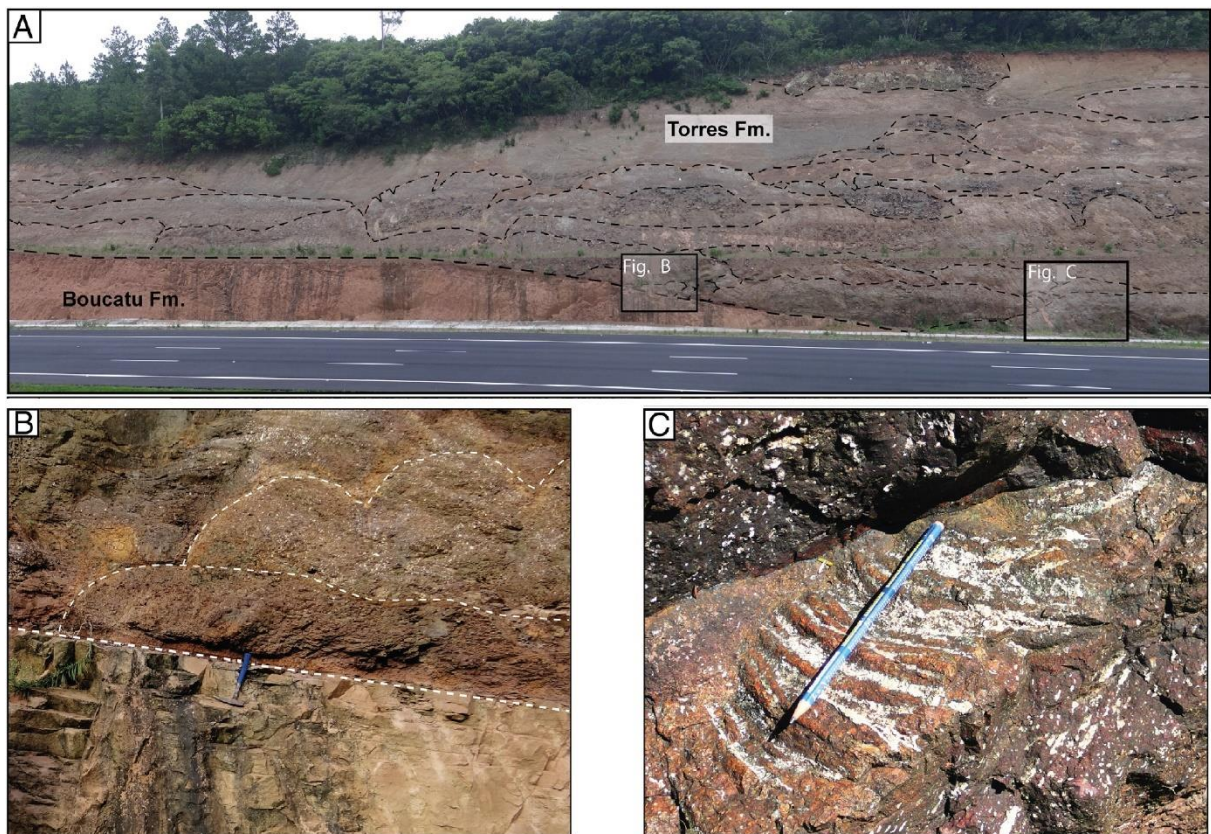


Figura 42 – A) Seção do afloramento evidenciando o contato entre os arenitos da Formação Botucatu e derrame *hummocky pahoehoe* da Formação Torres. Localização: 29° 52.652' S, 50° 23.688' W. B) Lobos recobertos por arenito da Fm. Botucatu. C) Crosta superior vesiculada em *layering* e com borda oxidada. Todas as figuras foram extraídas de Rossetti *et al.*, 2018.

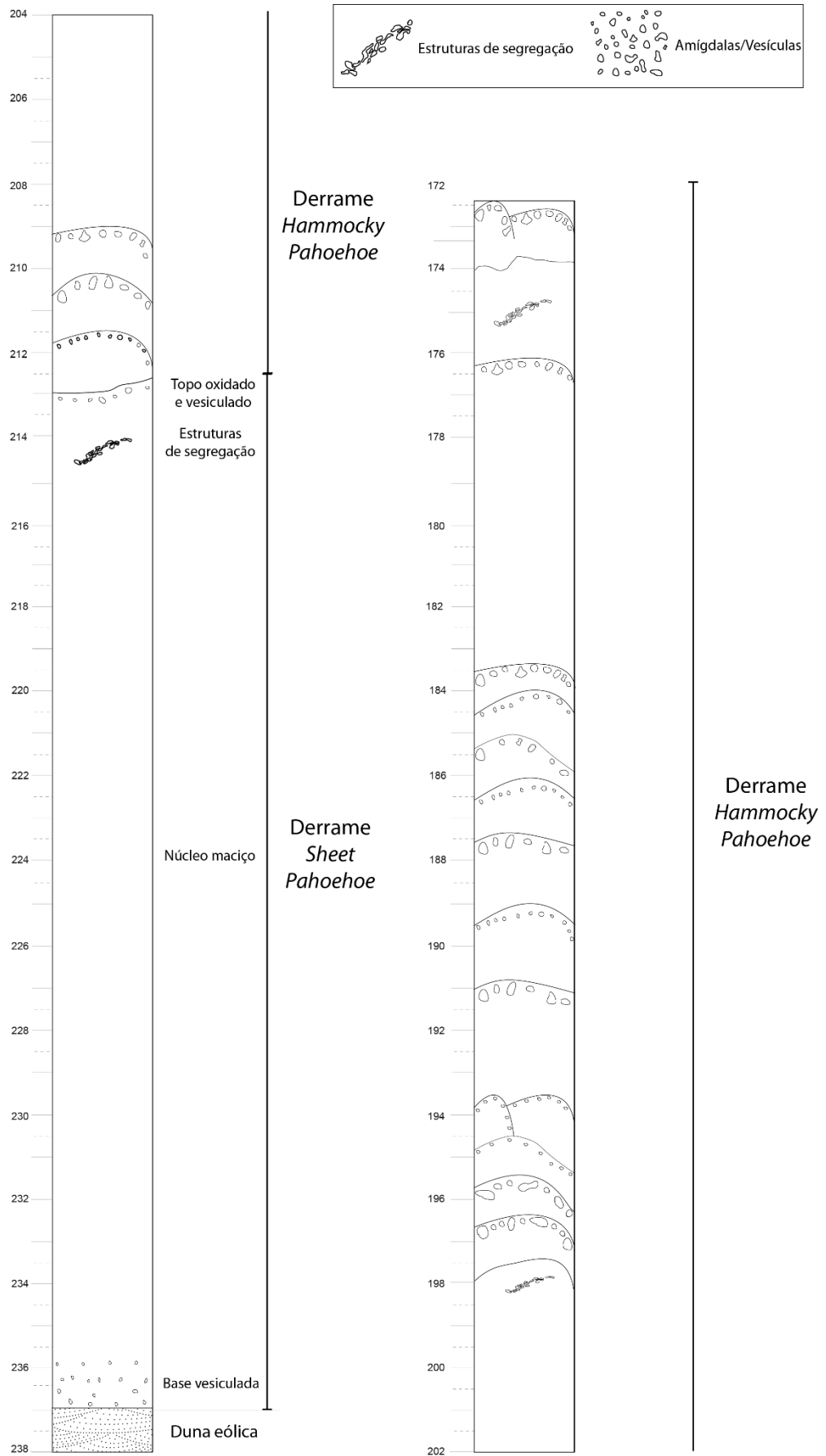


Figura 43 - Perfil esquemático da morfologia dos derrames e da associação das litofácies (Fonte: autor).

O modelo de *emplacement* proposto para a sucessão vulcânica do testemunho consiste no extravasamento de lava em uma superfície com baixa declividade, levemente ondulada, formando derrames *sheet pahoehoe* (Figura 44 A). Conforme a intensidade do fluxo de lava aumenta, este derrame avança para menores gradientes topográficos. No decorrer do resfriamento da crosta superior, é possível que se desenvolva uma superfície ondulada. O próximo fluxo de lava seguiria essas superfícies, configurando um derrame transicional do tipo *hummocky pahoehoe*, com inflação e coalescência dos lobos (Figura 44 B).

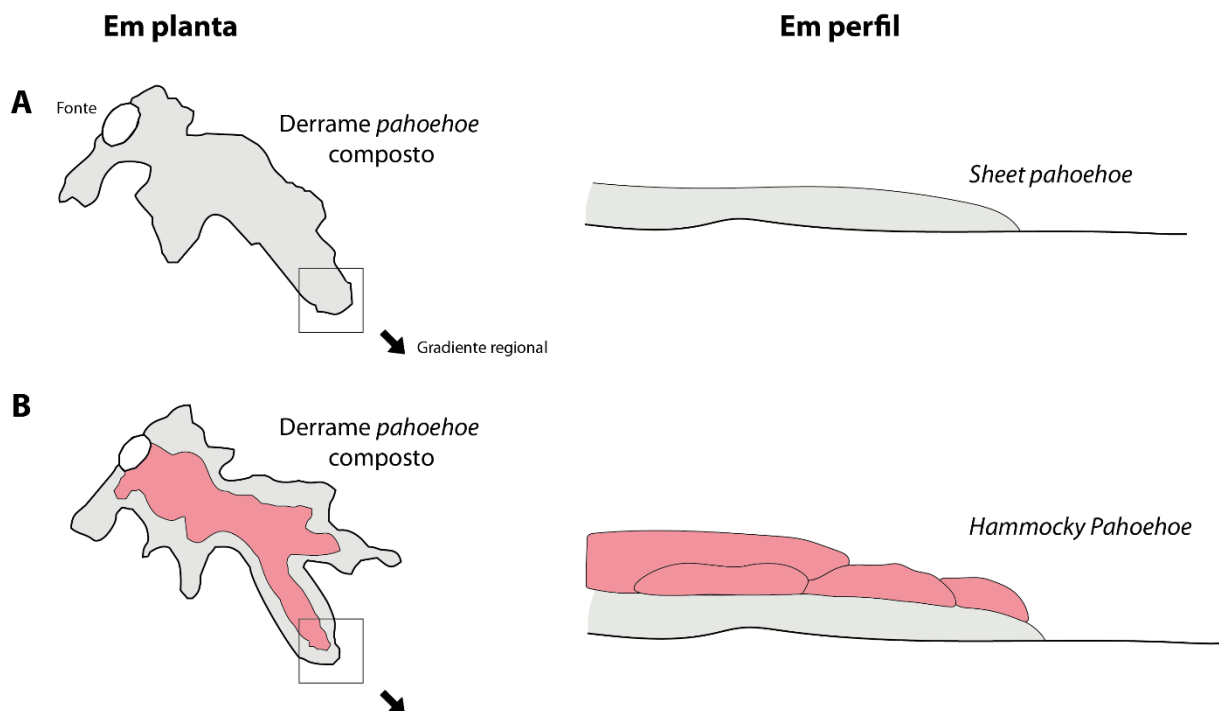


Figura 44 - Modelo de *emplacement* dos derrames descritos no testemunho de sondagem (Fonte: modificado de Duraiswamy *et al.*, 2014).

4.1.2 Pedreira Morro Alto

A Pedreira Morro Alto (Ponto 23-IM-01) se localiza no município de Osório (RS), às margens da RS-407. A mineração se desenvolve em lavra a céu aberto. A extração do material ocorre em duas cavas por meio de bancadas. Levantou-se duas seções colunares, uma para cada cava, onde foram definidas quatro litofácies (Bam, Bm, Bpi, Bvl). Identificou-se cinco derrames (D1, D2, D3, D4, D5), um na cava inferior e quatro na superior (Figura 45).

A cava inferior é formada por um derrame *pahoehoe* tabular (D1). A base possui 2 m de espessura e compreende um basalto amigdaloidal (Bam), com exposição irregular e intensamente alterado (Figura 46, B). As amígdalas são subarredondadas com dimensões médias de 2 a 5 mm, preenchidas por zeolita. O núcleo de basalto maciço (Bm), com 20 m de espessura, apresenta falhas NE-SW sistemáticas (Figura 46, A). O topo se encontra encoberto.

A cava superior consiste em duas bancadas. Na bancada inferior, a base é definida por basalto vesiculado com *pipe vesicles* (Bpi), com espessura de 8 m, formando um conjunto de lobos de lava *pahoehoe* (D2). As vesículas são em formato cilíndrico alongado preenchidas por zeolita. Sobreposto aos lobos, ocorre um derrame *pahoehoe* (D3), com núcleo maciço (Bm) e topo amigdaloidal (Bam) (Figura 47). A bancada superior apresenta dois derrames *pahoehoe*. O derrame inferior (D4) possui basalto amigdaloidal (Bam) na base, basalto maciço (Bm), com uma porção amigdalóide, indicando a inflação do derrame no núcleo e o topo formado por basalto vesiculado em *layering* (Bvl). As vesículas variam de 0,2 a 2 cm e são subarredondadas, preenchidas zeolita e gradam de tamanho em direção ao topo. O derrame superior (D5) é formado na parte basal por basalto amigdaloidal (Bam), o núcleo por basalto maciço (Bm) e o topo se encontra intemperizado, formando uma camada de solo (Figura 48). Na segunda bancada da cava superior um dique de cerca de 10 m de espessura corta o derrame 3.

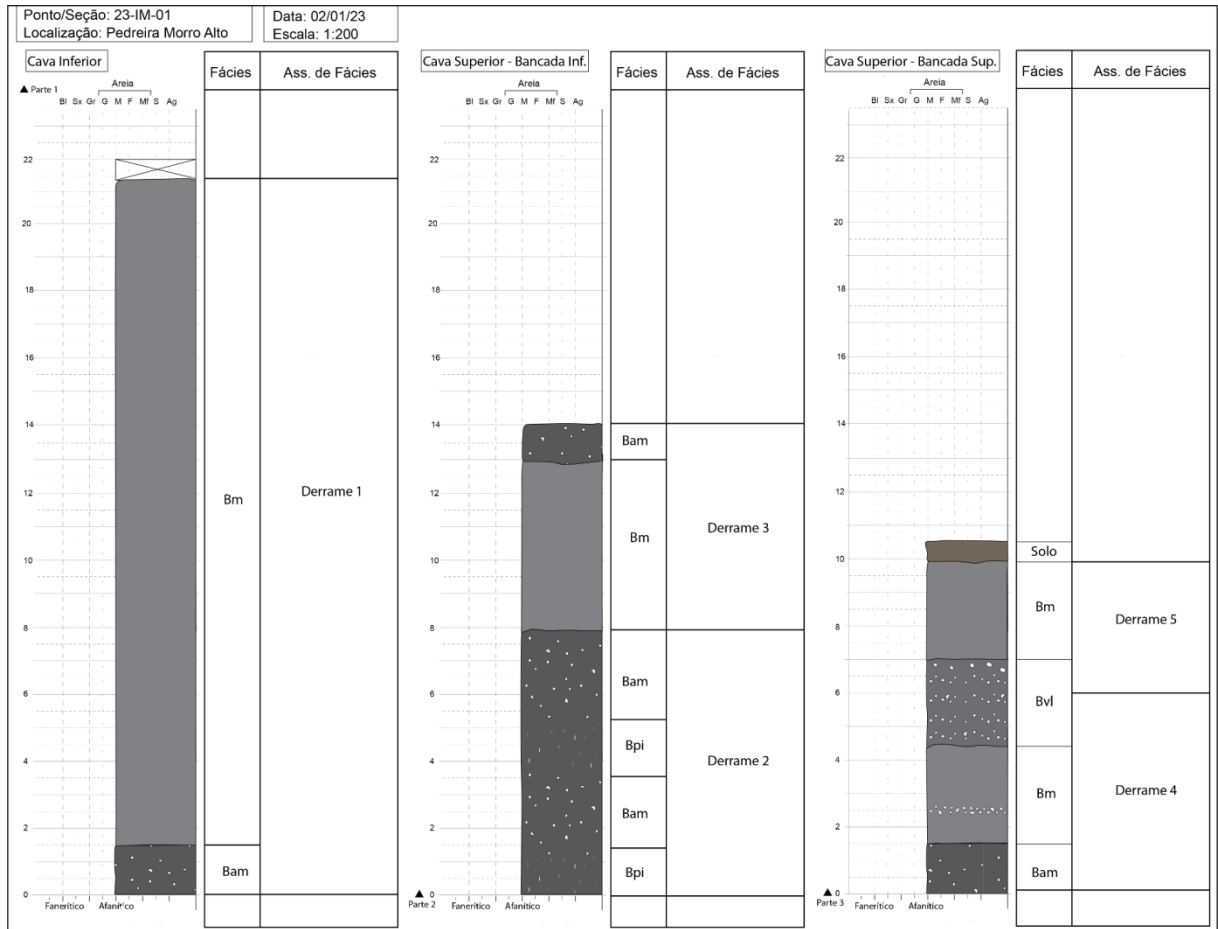


Figura 45 - Seção colunar da cava inferior (à esquerda) e da cava superior (no meio e à direita) da Pedreira Morro Alto (Fonte: autor).

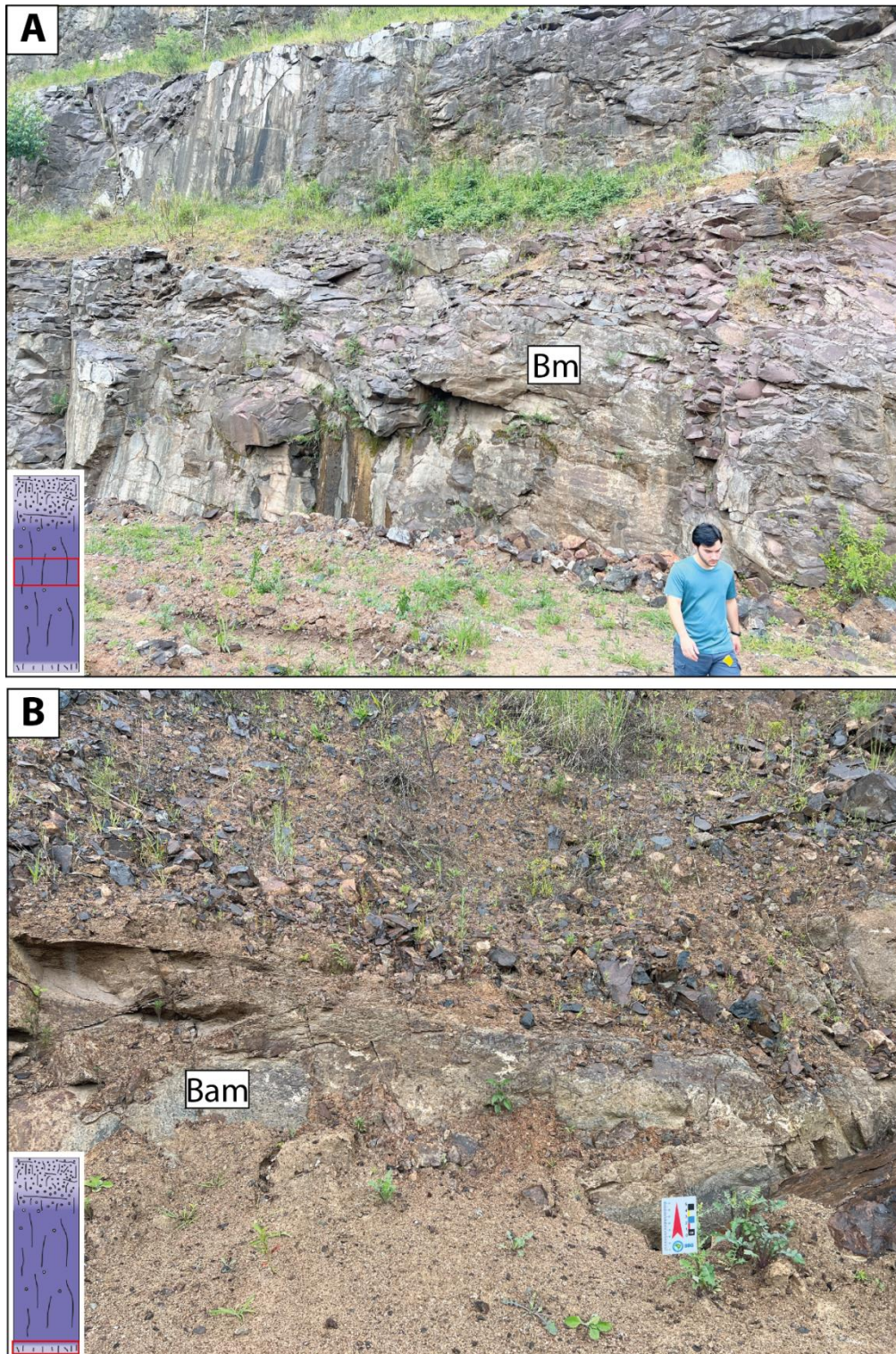


Figura 46 - Cava inferior da Pedreira Morro Alto. A) Derrame 1, aspecto do núcleo maciço (Bm). B) Base do derrame 1, basalto amigdaloidal (Bam) intensamente intemperizado. (Fonte: autor).

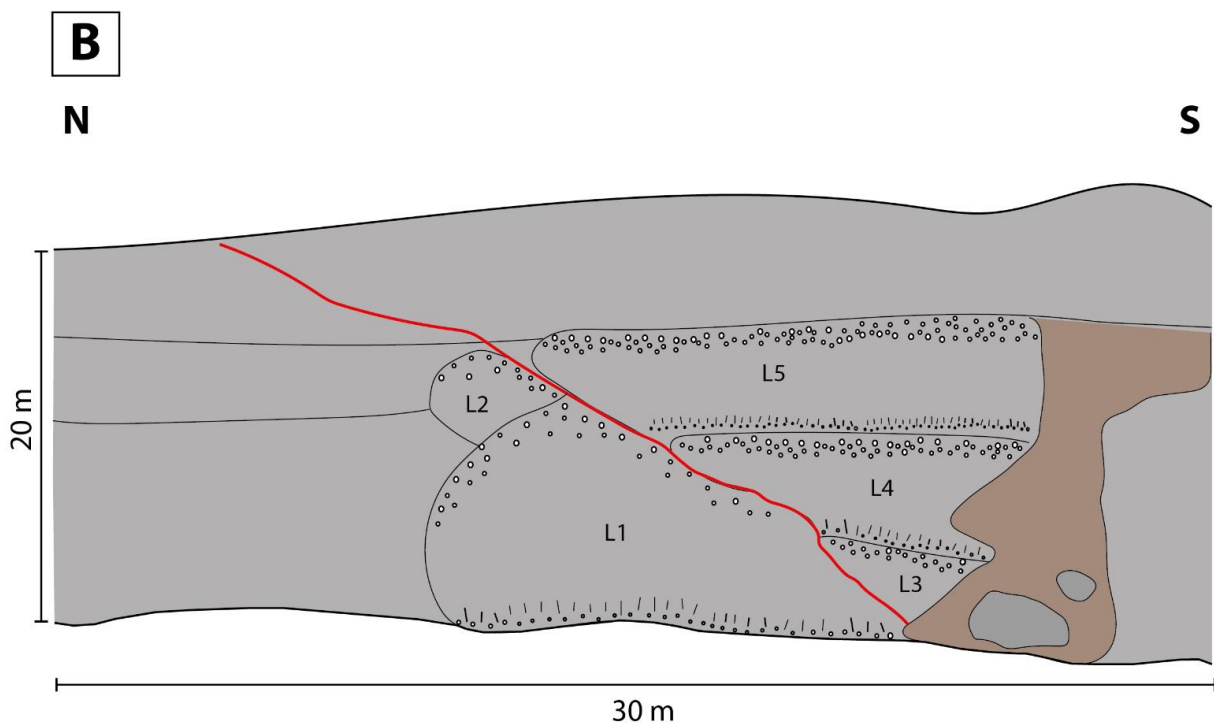


Figura 47 - A) Vista da cava superior, bancada inferior da Pedreira Morro Alto. B) Modelo esquemático da figura A, evidenciando os lobos do derrame 2 e o derrame 3 (Fonte: autor).

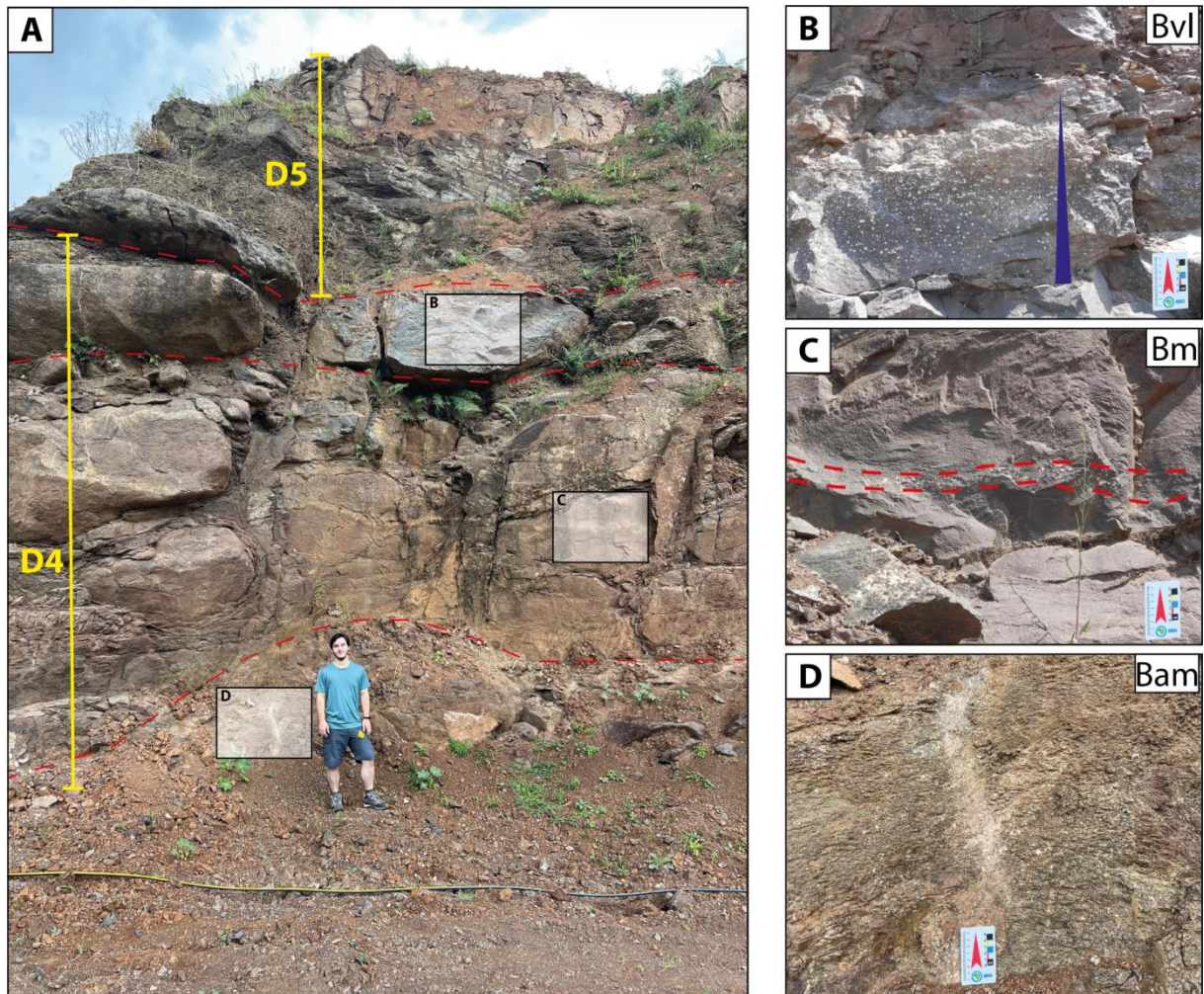


Figura 48 - A) Vista da cava superior, bancada superior da Pedreira Morro Alto. B) Base do derrame 4, basalto amigdaloidal. C) Núcleo do derrame 4, basalto maciço. D) Topo do derrame 4, basalto vesiculado do tipo *layering* (Fonte: autor).

4.1.3 Pedreira São Joaquim

A Pedreira São Joaquim (Ponto 23-IM-02) se encontra no município de Santo Antônio da Patrulha (RS) e consiste em lavra a céu aberto. A extração do material ocorre em uma única cava por meio de bancadas. Realizou-se o levantamento de uma seção colunar com identificação de três litofácies (Bdj, Bm, Bam), agrupadas em duas associações (Figura 49).

A bancada inferior é composta pela litofácies basalto com disjunções colunares (Bdj) apertadas, contínuas e regulares. Essa litofácies foi interpretada como uma intrusão do tipo soleira por estar concordante com as encaixantes, no caso com o derrame *pahoehoe* tabular. Localmente, identificou-se um xenólito arenítico na soleira,

com 2 m de comprimento e 1 m de altura. Esse corpo consiste em um arenito fino maciço. Devido ao contato com a soleira, ocorreu a silicificação do arenito e o desenvolvimento de uma borda avermelhada com aspecto vítreo em torno do xenólito. Observa-se um dique máfico, 1 m de espessura, cortando a soleira (Figura 50).

A bancada superior consiste em um derrame *pahoehoe* tabular. Não foi possível identificar a base, sendo provavelmente erodida. O núcleo do derrame consiste em basalto maciço (Bm) e o topo em basalto amigdaloidal (Bam). As amígdalas variam de 0,5 a 2 cm, subarredondadas e preenchidas por zeolita (Figura 51). O contato entre a soleira e o derrame é abrupto.

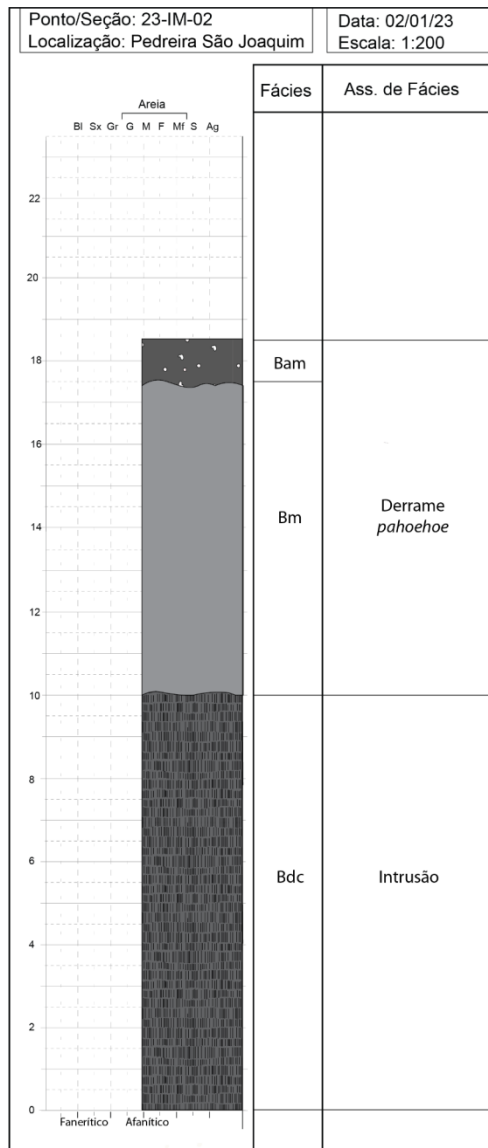


Figura 49 - Seção colunar da Pedreira São Joaquim (Fonte: autor).

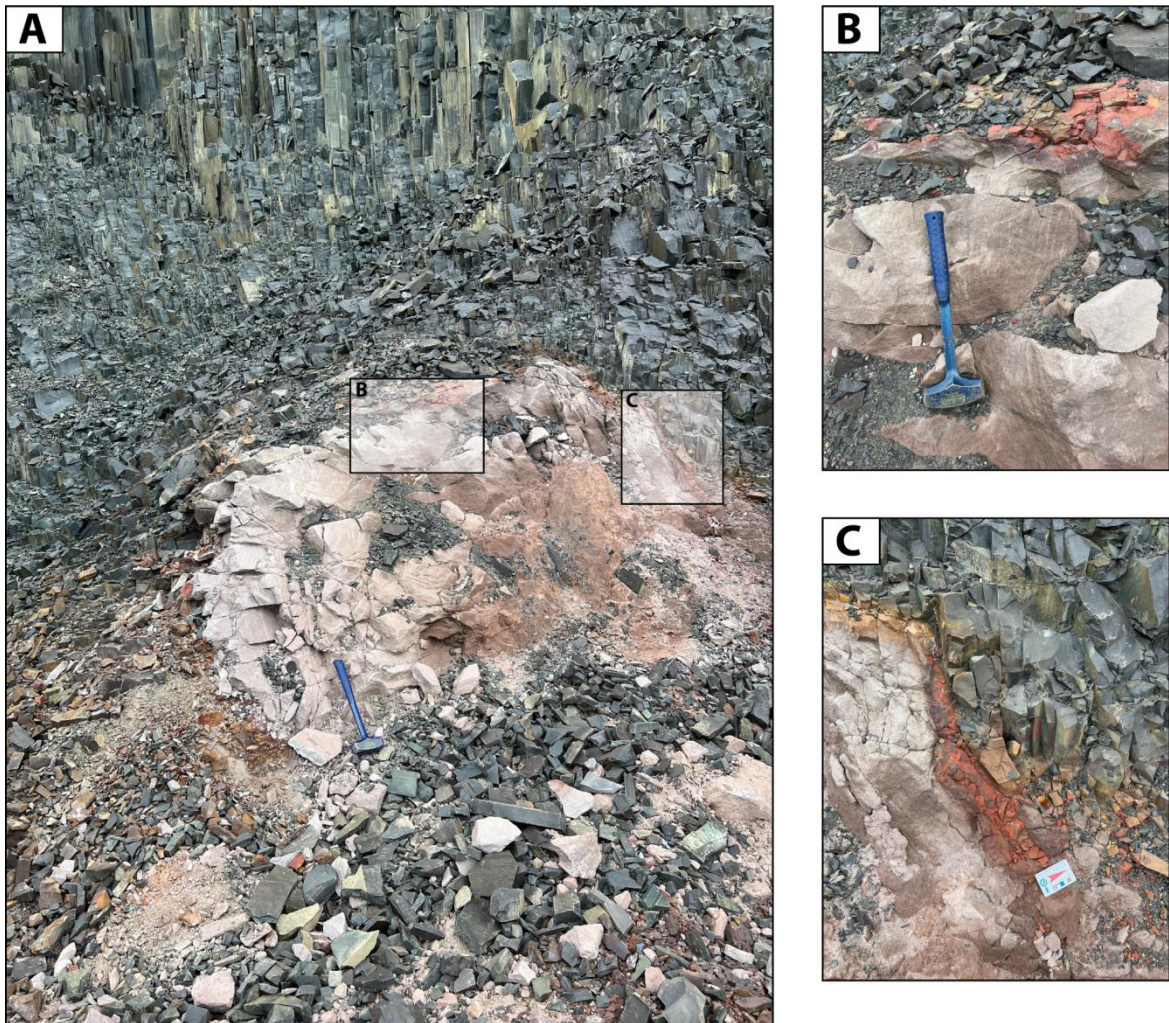


Figura 50 - Xenólito na soleira da Pedreira São Joaquim. B) Detalhe do arenito maciço silificado. C) Aspecto vítreo da borda do xenólito. (Fonte: autor).

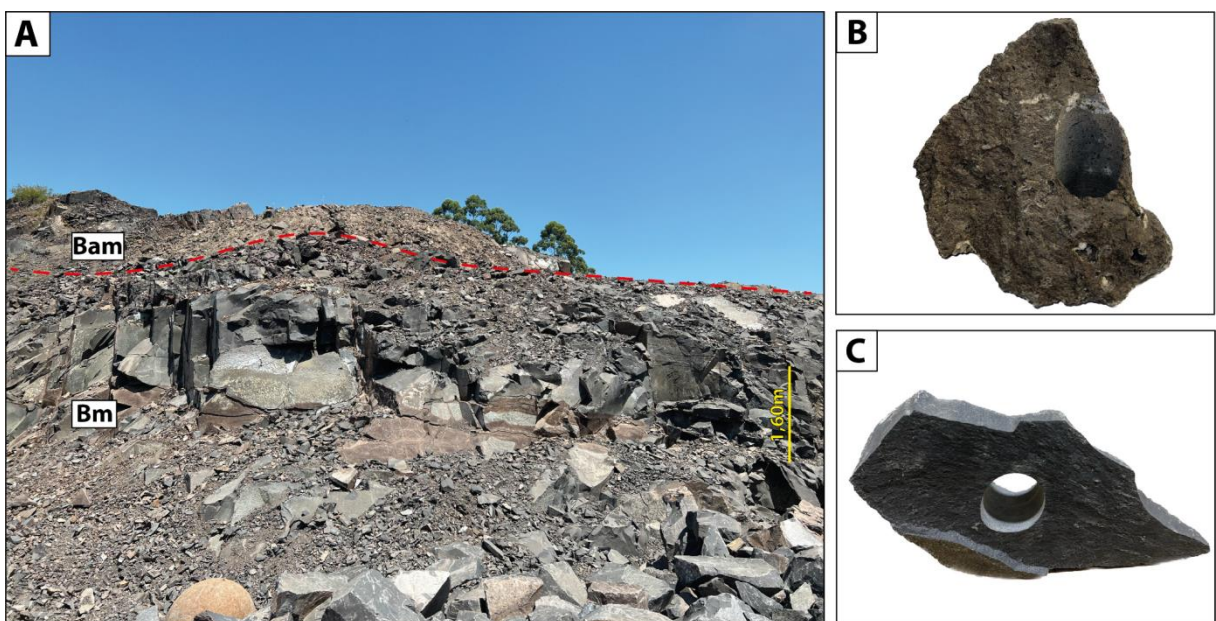


Figura 51 - A) Derrame *pahoehoe* tabular na Pedreira São Joaquim. B) Topo amigdaloidal do derrame. C) Núcleo maciço do derrame. (Fonte: autor).

4.1.4 Cascatas em Riozinho e Terra de Areia

No município de Riozinho visitou-se duas cascatas: Chuvisqueiro e Três Quedas. A Cascata do Chuvisqueiro (Ponto 23-IM-04) possui 60 m de altura e identificou-se quatro litofácies e duas associações de fácies. A litofácies arenito com cruzada tangencial (Act) consiste em uma camada de 2 m de espessura formada por arenito médio, bem selecionado com estratificação cruzada tangencial. Diretamente sobreposta ao arenito, a litofácies Bc apresenta 38 m de espessura e é definida como basalto afanítico com colunatas. A litofácies basalto com disjunção colunar do tipo entablamento (Be) ocorre juntamente com a Bc. A litofácies Bm compreende um basalto afanítico maciço com 20 m de espessura. A associação de fácies siliciclástica consiste na Act, que se encontra na base da Cascata, correspondente às dunas eólicas do paleodeserto do Botucatu. A associação de fácies vulcânicas (Bc, Be e Bm) é interpretada como um derrame do tipo *ponded* “de interduna”. Esta Cascata evidencia o contato abrupto do arenito eólico da Fm. Botucatu com a base da Fm. Torres (Figura 52).

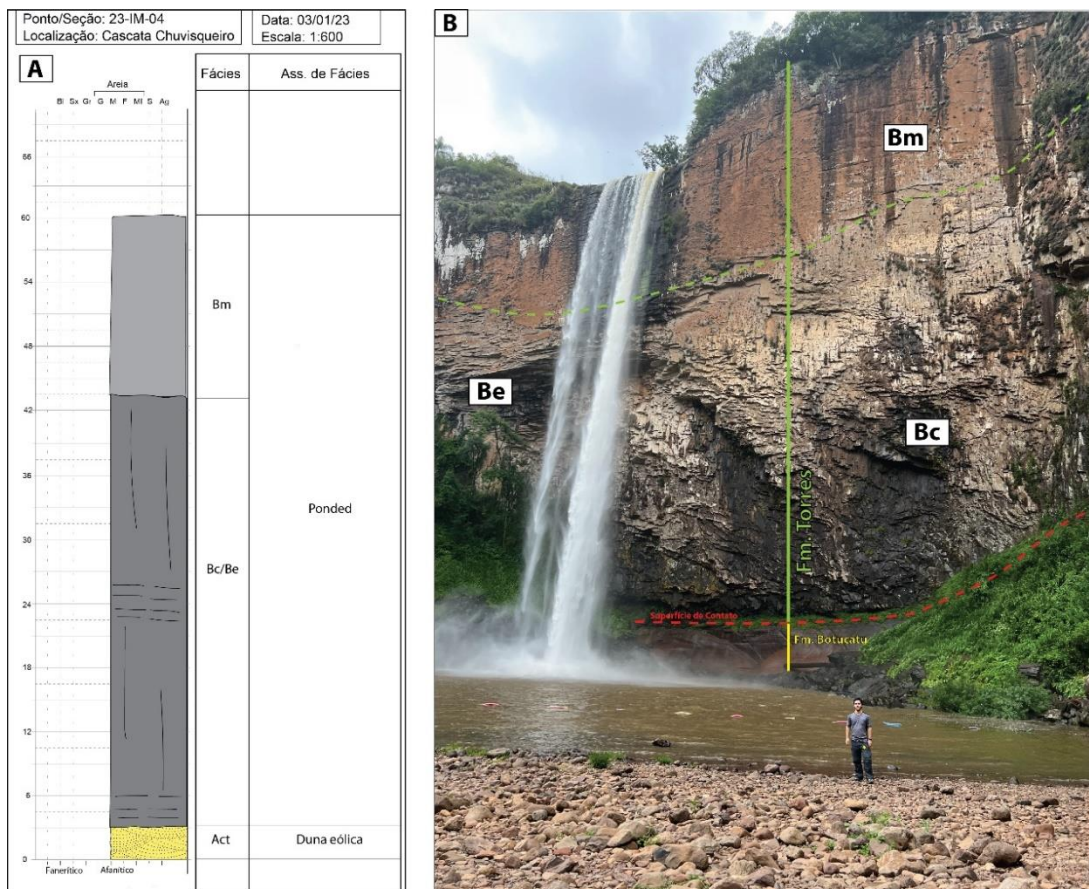


Figura 52 - Cascata do Chuvisqueiro. A) Seção colunar. B) Fotografia geral da Cascata, evidenciando o contato abrupto da Fm. Botucatu com a Fm. Torres (Fonte: autor).

Na Cascata Três Quedas (Ponto 23-IM-05) foi definida apenas uma litofácies vulcânica. A Bc consiste em basalto afanítico com colunatas com 25 m de espessura. Interpreta-se que a Bc compreende em um derrame do tipo *ponded*. O topo da cascata se encontra encoberto (Figura 53).

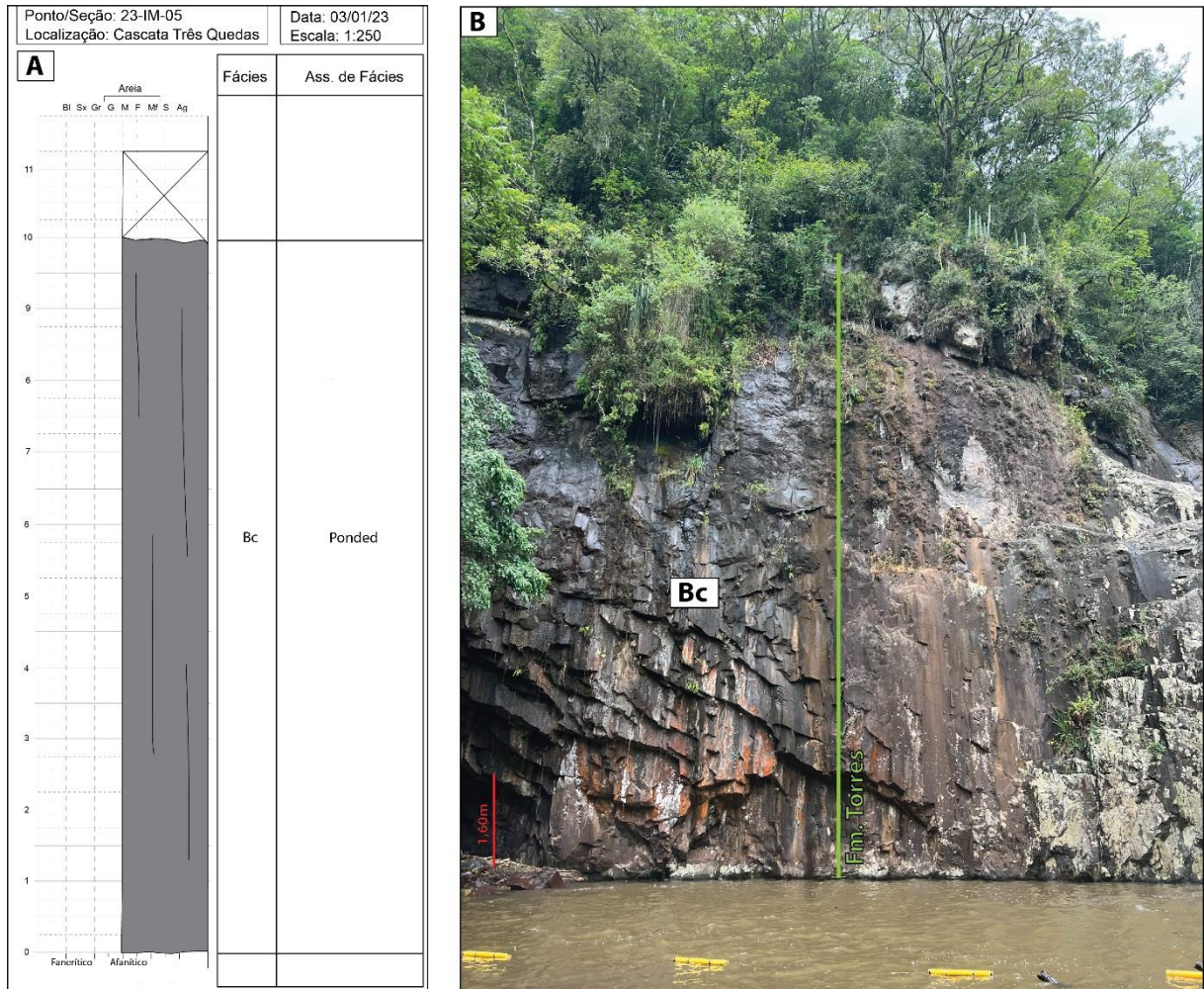


Figura 53 - Cascata Três Quedas. A) Seção colunar. B) Fotografia geral da Cascata, evidenciando as colunatas (Fonte: autor).

A Cascata do Ressaco (Ponto 23-IM-08), situada em Terra de Areia, possui 15 m de altura. A litofácies Bm consiste em um basalto maciço, com colunatas não desenvolvidas. Interpreta-se que a Bm compreende em um derrame *ponded* (Figura 54).

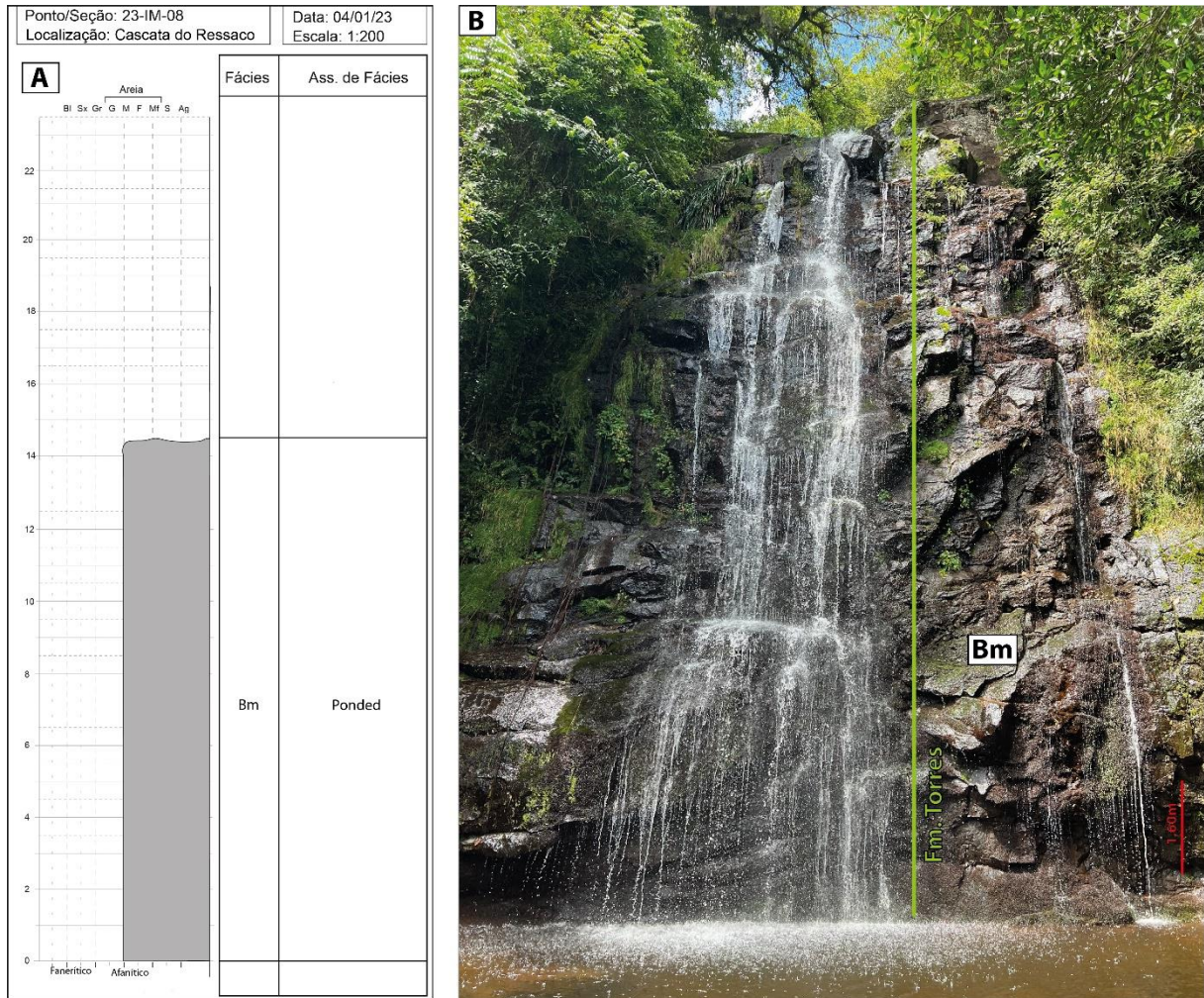


Figura 54 - Cascata do Ressaco. A) Seção colunar. B) Fotografia geral da Cascata, evidenciando o aspecto maciço da rocha (Fonte: autor).

Com correlação entre as seções e as associações de litofácies definidas foi possível estipular cotas de ocorrências de determinadas litologias e morfologias na região em análise. Cotas abaixo de 160 m compreendem nos arenitos eólicos da Fm. Botucatu. Entre as cotas 165 m e 200 m aflora basaltos com entablamento e colunatas referentes a parte inferior do derrame *ponded* de interduna. O núcleo desses derrames, constituído por basaltos maciços, é observado em cotas acima de 200 m até aproximadamente 240 m (Figura 55).

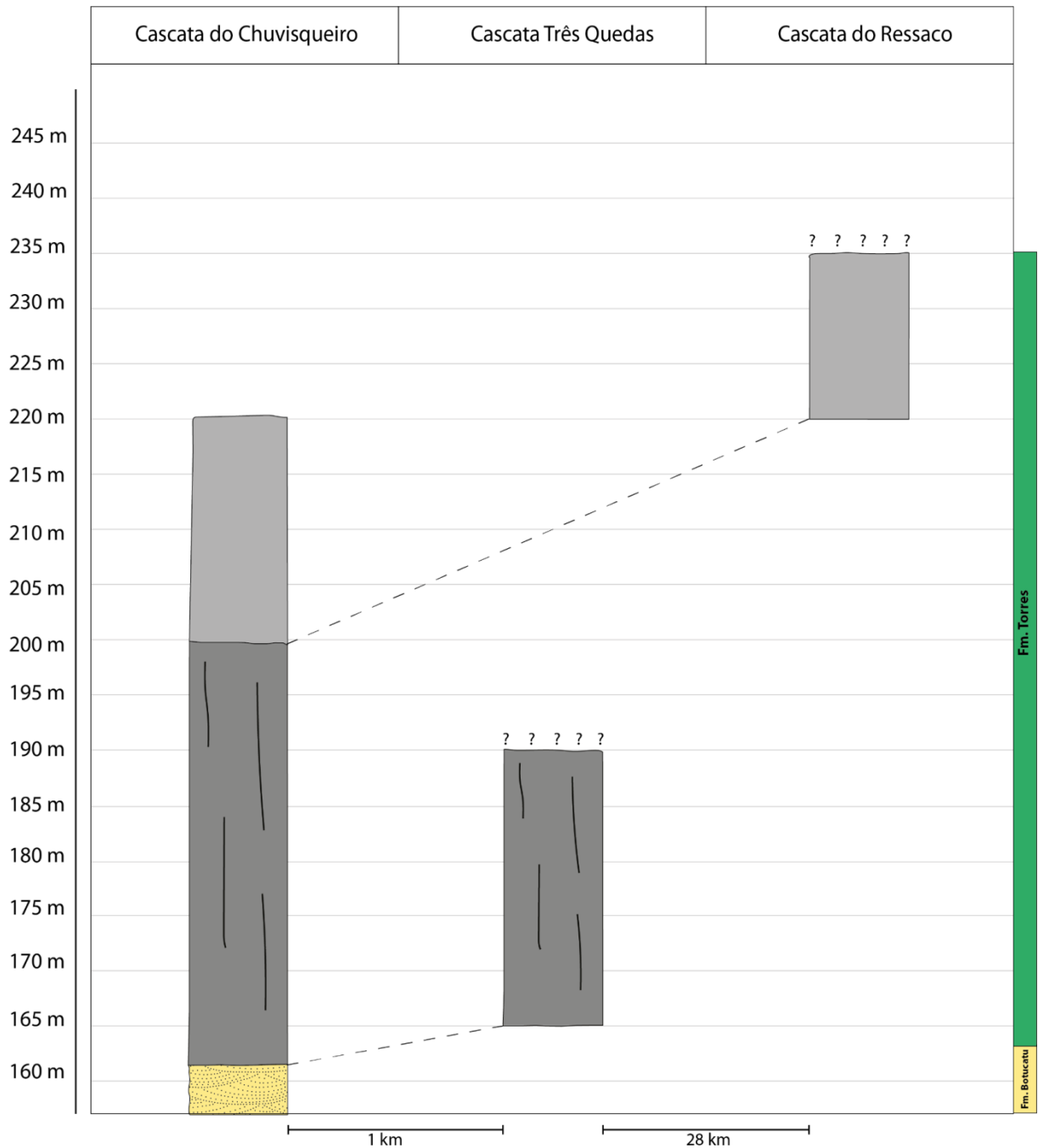


Figura 55 - Correlação das associações de litofácies identificadas na região de Riozinho-Terra de Areia (Fonte: autor).

O modelo de *emplacement* sugerido para as litologias vulcânicas das cascatas visitadas divide-se em três estágios, sendo similar ao que Waichel *et al.* (2012) propuseram para fluxo de lavas basálticas na região sul da Bacia do Paraná. Primeiro, a área de interduna seria preenchida por fluxos de lava canalizados entre os leitos eólicos (Figura 56 A). O preenchimento do vale pode ocorrer por um único pulso ou por diversos pulsos, dependendo da fonte (Figura 56 B). No segundo estágio, os fluxos

de lava atingiriam a linha da crista das dunas e avançariam pela superfície da duna (Figura 56 C). Neste momento, pode-se formar dedos de lava ou lóbulos de ruptura, e feições de interação lava-sedimento, como peperitos, diápiros de areia, xenólitos, estrias de fluxo, impressão de lava e marca em crescente (Waichel *et al.*, 2008; Petry, 2005). O último estágio consiste no soterramento completo das dunas pelos fluxos de lava subsequentes (Figura 56 D). Como não foi observado nenhuma estrutura referente ao estágio dois, infere-se que o derrame *ponded* identificado nos afloramentos estaria localizado no vale de interduna, longe das cristas das dunas.

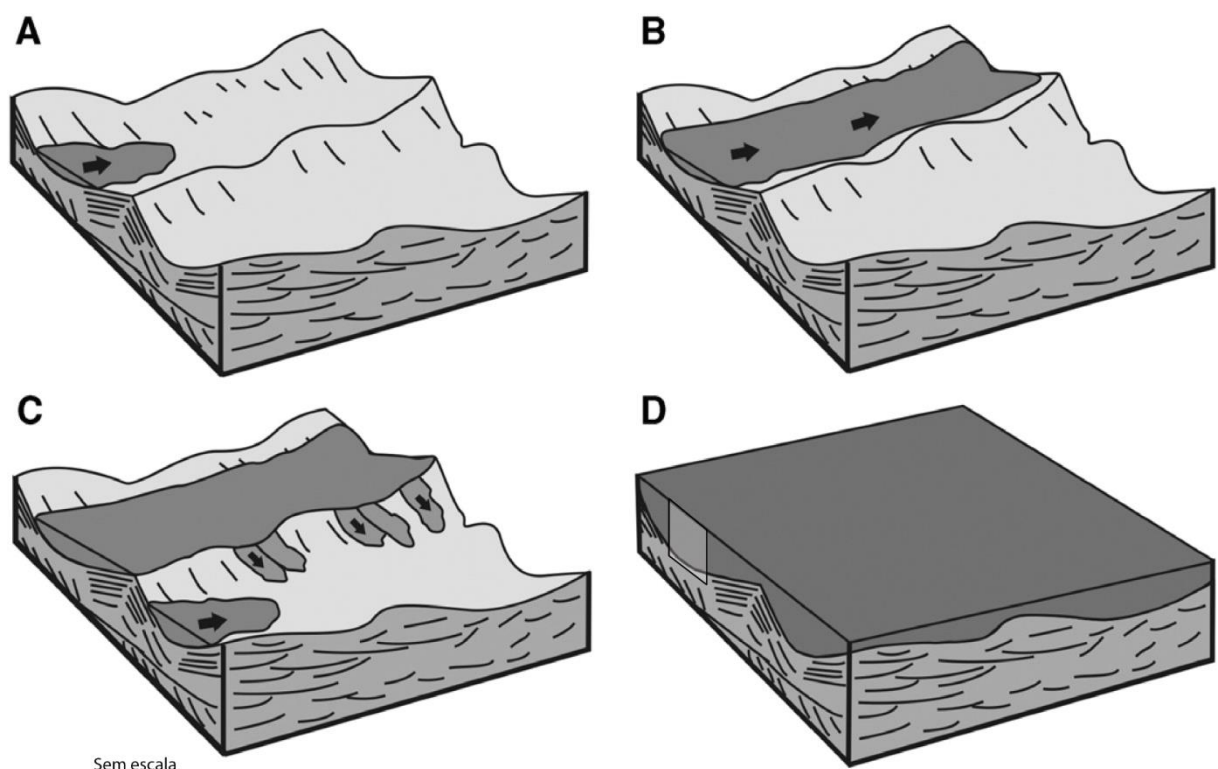


Figura 56 - Modelo de *emplacement* para os derrames observados nas Cascatas Chuvisqueiro, Três Quedas e Ressaco (Fonte: modificado de Waichel *et al.*, 2008).

4.1.5 Torres

A cidade de Torres é o local onde se encontra a seção-tipo da Formação homônima (Rossetti *et al.*, 2019). Os afloramentos fazem parte do Parque Estadual José Lutzenberger (popularmente conhecido como Parque da Guarita) e do Morro do Farol. As exposições rochosas consistem em quatro morros localizados na beira da praia (Figura 57).

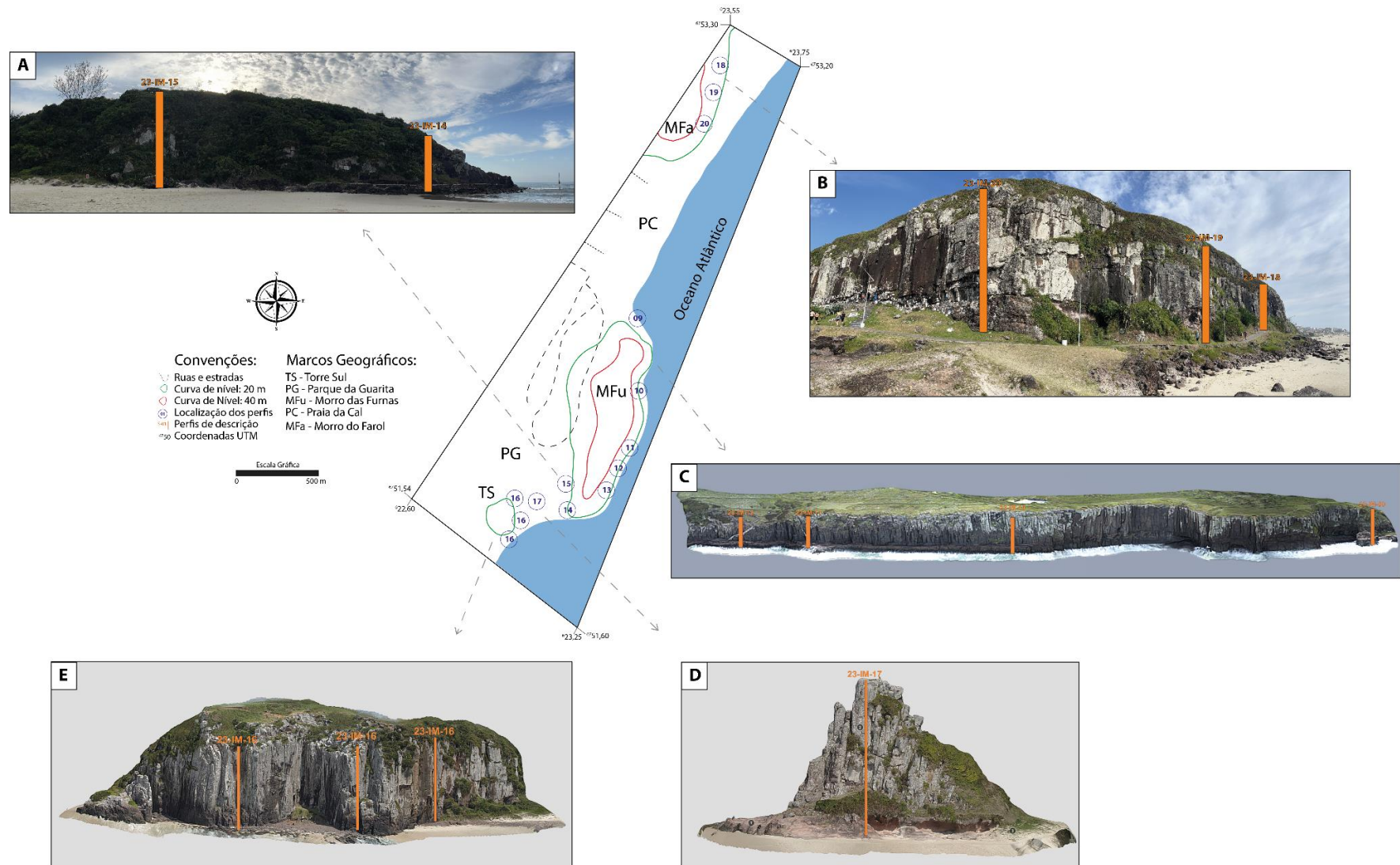


Figura 57 - Localização das seções colunares realizadas na praia de Torres (Fonte: modificado de Petry *et al.*, 2005). A) Morro das Furnas, parte sul (Fonte: do autor). B) Morro do Farol (Fonte: do autor). C) Morro das Furnas (Fonte: BRGeo). D) Torre da Guarita (Fonte: BRGeo). E) Torre Sul (Fonte: BRGeo).

O levantamento de 12 seções colunares (Figura 58) permitiu identificar nove litofácies, agrupadas em quatro associações de fácies (derrame, intrusão, peperito e lençol de areia).

A Torre Sul (TS), ponto 23-IM-16 (Figura 57 E), está localizada entre as praias de Itapeva e da Guarita, fazendo parte do Parque da Guarita. Nos 18 m da seção colunar, identificou-se um derrame caracterizado pela litofácies Bc. Ao longo do intervalo analisado, a porção basal apresenta níveis com estruturas em cinzel. Fluxos de lava com multicamadas mostram marcações horizontais na porção basal das colunas que foram comparadas a marcas de cinzel (James, 1920), e há um consenso de que elas representam incrementos de crescimento sucessivos das disjunções. Ryan & Sammis (1978) argumentam que as colunatas resultam de ciclos de acúmulo de tensão de tração durante o resfriamento, seguido de liberação de tensão quando ocorre fratura (Lyle, 2000). As colunatas ocorrem ao longo de toda TS, sendo a maioria contínuas. Na parte do topo, observa-se fraturas de forma losangular. A TS se encontra sobreposta diretamente às areias da praia.

A Torre da Guarita (TG), ponto 23-IM-17 (Figura 57 D), faz parte do complexo do Parque da Guarita e está localizada na Praia da Guarita. A seção colunar apresenta 16 m de altura e duas litofácies foram definidas. A base é formada por uma camada de 2 m de espessura de Act, interpretada como uma duna eólica, pertencente a Fm. Botucatu. Os 14 m restantes consistem em um derrame marcado pela litofácies Bc, com colunatas contínuas. Não foram observadas estruturas em cinzel. O contato entre as duas litologias é abrupto. É possível observar estrias de fluxo de derrame no topo do arenito.

O Morro das Furnas está localizado entre a Praia da Guarita e a Praia da Cal, dentro do Parque da Guarita (Figura 57 A e C). Foram levantadas sete seções colunares (23-IM-09 até 23-IM-15). A seção 23-IM-09, denominada Parque da Guarita, possui 22 m de espessura. O primeiro derrame apresenta cerca de 11 m, formado por um núcleo com estruturas em cinzel na base e colunatas bem desenvolvidas (Bc) e pelo topo amigdaloidal (Bam). O segundo derrame, com 11 m, é composto por um núcleo com colunatas contínuas (Bc).

A seção 23-IM-10, denominada Escada do Saltinho, possui 25 m de espessura. A porção basal consiste no topo de um derrame marcada pela litofácies Bam com 2,5

m de espessura. Uma fina camada na parte superior, com 20 cm, se encontra oxidada com a presença de vesículas. Um segundo derrame, 12,5 m de espessura, caracterizado pela litofácies Bc, com predomínio de colunatas, mas com estruturas em cinzel na base. Segue três camadas de Bam, com amígdalas subarredondadas, variando de 0,5 a 1 cm. O terceiro derrame (Bc) apresenta apenas colunatas, com espessura de 2,5 m, coberto por uma camada de solo.

A seção 23-IM-11, denominada Escada do Balcão e Pesqueiro Feio, apresenta na base uma camada peperítica (BBma[s]) com 2,5 m de espessura. Sobreposto a esta camada, observa-se um derrame com 10 m de espessura, definido pela litofácies Bc, na qual possui colunatas ao longo do derrame. As estruturas em cinzel são restritas à base. No meio do derrame, ocorre um nível com amígdalas, indicando inflação. O topo do derrame é marcado pela camada de Bv com 2 m de espessura. Observa-se outro derrame (Bc) de 2,5 m de espessura, caracterizado apenas por colunatas.

A seção 23-IM-12, denominada Escada Furninha, apresenta na parte basal uma camada peperítica (BBma[s]) com 3,5 m de espessura. Sobreposto a esta camada, ocorre um derrame composto por Bc, exclusivamente com colunatas. O topo do derrame é identificado pela litofácies Bam com 2,5 m de espessura. Observa-se outro derrame (Bc), semelhante ao anterior, com espessura de 6,5 m. Uma camada de solo ocorre no topo da seção.

A seção 23-IM-13, denominada Escada Furna do Diamante, apresenta a base formada por uma camada peperítica (BBma[s]) de 2,5 m. Sobreposto, ocorre um derrame, na qual a base do núcleo é caracterizada por estruturas em cinzel e o restante por colunatas e o topo amigdaloidal. Segue outra camada peperítica (BBma[s]) com 2,5 m. O segundo derrame consiste em um núcleo similar ao derrame inferior e o topo vesiculado (Bv) se encontra intensamente alterado.

A seção 23-IM-14, denominada Escada da Praia da Guarita, possui na base o topo de um derrame, com espessura de 0,5 m, marcado pela litofácies Bam. Segue uma camada peperítica (BBma[s]) com 5 m de espessura. Sobreposto a esta camada, ocorre um derrame (Bam), com 7 m de espessura, na qual a base é formada por estruturas em cinzel e, ao longo do derrame o predomínio de colunatas. O topo do derrame é definido pela litofácies Bam, com espessura de 1 m. Uma segunda camada

peperítica (BBma[s]) é observada com 4,5 m de espessura. Recobrimo esta camada, ocorre outro derrame (Bc), com 5 m de espessura, sendo composto exclusivamente por colunatas. O topo do derrame é identificado pela litofácies Bam, com 1 m de espessura.

A seção 23-IM-15, denominada Praia Guarita, apresenta na base uma camada peperítica (BBma[s]) com 5 m de espessura. O restante da seção (9,5 m) consiste em um núcleo de derrame (Bc), em que na base observa-se estruturas em cinzel e no restante, colunatas.

O Morro do Farol (MF) está localizado entre as praias da Cal e a Prainha e possui 35 m de altura (Figura 57 B). Foram levantadas três seções colunares (23-IM-18 até 23-IM-20). A seção 23-IM-18 é composta por dois derrames intercalados por um nível peperítico. O derrame basal (1,5 m de espessura) consiste em Bv, sendo interpretado como topo de derrame. A camada peperítica possui 4 m de espessura e é definida pela litofácies BBma[s], na qual apresenta brechas basálticas maciças a vesiculares/amigdaloides com tamanhos variáveis imersas em uma matriz sedimentar arenosa quartzo-feldspática. O segundo derrame, com espessura de 10,5 m, é definido pela litofácies Bc, com colunatas contínuas, demarcando a porção do núcleo de derrame.

Na seção 23-IM-19 é possível observar a continuidade lateral dos dois derrames identificados na seção anterior. O derrame basal definido pela litofácies Bv apresenta 1 m de espessura. A camada peperítica, com 6 m de espessura, é caracterizada pelas litofácies BBma[i] na base e a BBma[s] no topo. A BBma[i] apresenta maior conteúdo de brechas basálticas de contatos apertados, com uma proporção de matriz sedimentar. Já os contatos das brechas na BBma[s] são frouxos, ocasionando mais espaço para a matriz arenosa. Sobreposta ao peperito, ocorre uma lente de arenito com estratificação plano paralela (App) com 2 m de espessura. Devido a sua geometria, a App poderia ter recoberto o paleo-relevo deixado pelo peperito. O segundo derrame com 7 m de espessura é identificado pela litofácies Bc.

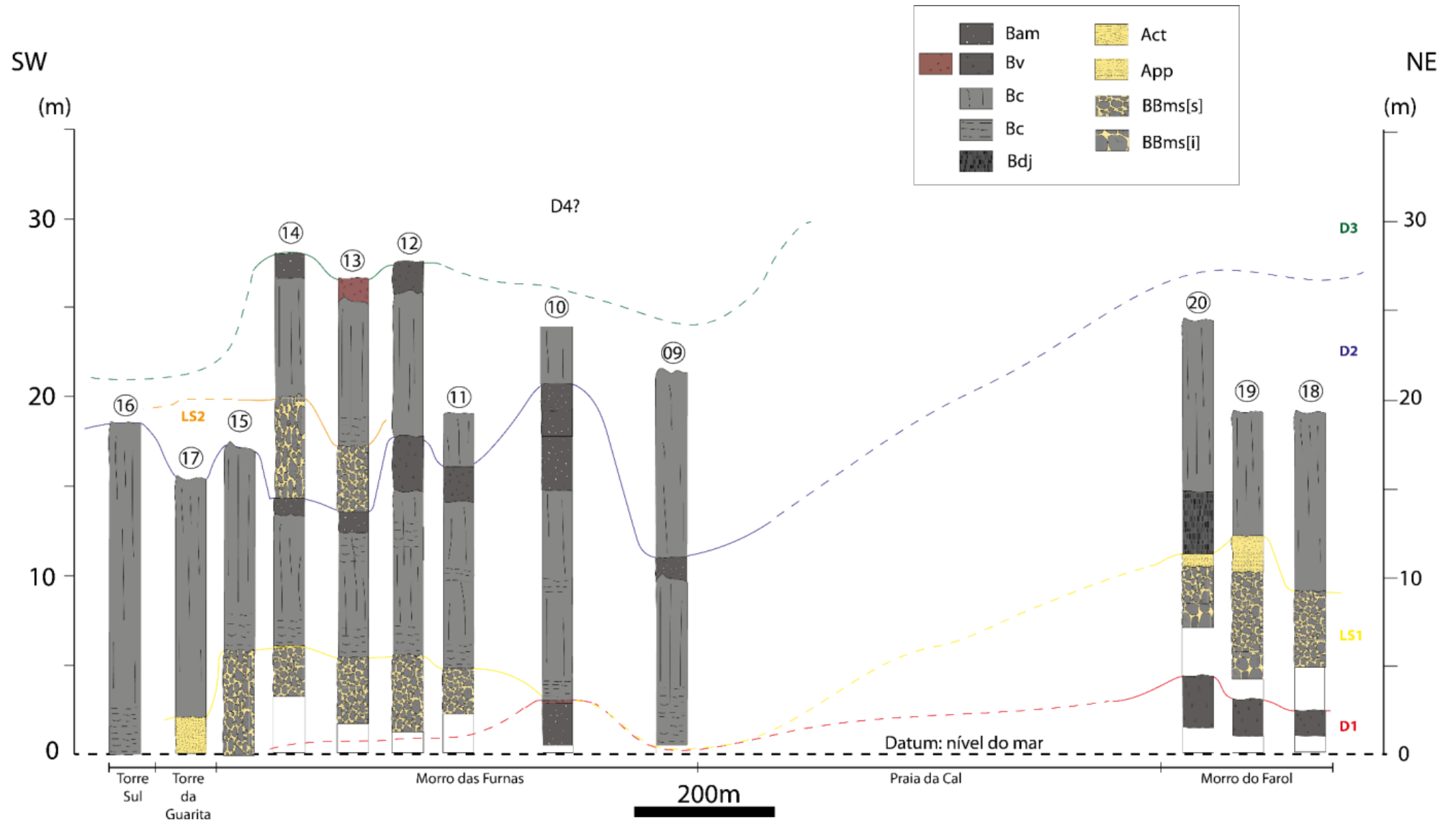


Figura 58 - Estratigrafia da sequência vulcânica dos afloramentos em Torres. Numeração dos perfis de acordo com a Figura 57. Fonte: do autor.

Na seção 23-IM-20 volta a aflorar o derrame basal marcado pela litofácies Bv, com aproximadamente 1,5 m de espessura. A camada peperítica (BBma[s] e BBma[i]) segue aflorante com espessura de 4 m. A lente de arenito (App) também reaparece com 0,5 m de espessura. Sobreposto a lente, observa-se a ocorrência de uma soleira (Bdj) com 1 m de espessura, sendo que perto de uma das estátuas religiosas é visto salto de soleira. O segundo derrame (Bc), cortado pela soleira, possui 10 m de espessura e é caracterizado na base pela predominância de colunatas pouco desenvolvidas.

O modelo de *emplacement* proposto para a sequência vulcânica aflorante na praia de Torres consiste em quatro eventos. O paleorelevo, antes do vulcanismo ocorrer, seria formado por dunas eólicas da Fm. Botucatu com ~100 m de altura (Figura 59 A). No primeiro evento, o fluxo de lava iniciaria no vale de interdunas, gerando o D1 (Figura 59 B). Na correlação entre os perfis é possível inferir o topo (Bam) desse derrame. O segundo evento estaria relacionado com a interação de lava-sedimento (LS1), desenvolvendo peperitos (BBma[i] e BBma[s]) (Figura 59 C). Os processos que formariam essa mistura poderiam ser: 1) lava flui encosta abaixo na areia não consolidada e fragmenta-se; 2) lava flui como “efeito cascata” na face da duna; 3) injeção de areia no fluxo de lava gerando diques de areia localizados e 4) erosão da base da duna por fluxo de lava e conseqüente colapso da duna (Petry *et al.*, 2007). O terceiro evento resultaria no D2, composto por núcleo com colunatas (Bc) e estruturas em cinzel, estas restritas na base, e o topo amigdaloidal (Bam) (Figura 59 D). A interação de lava e sedimento (LS2) marcaria o quarto evento (Figura 59 E). O quinto evento registraria o D3, com estruturação interna similar aos derrames D1 e D2 (Figura 59 F). Infere-se que haveria ainda a deposição de um quarto derrame (D4). O último evento englobaria uma série de processos pós-deposição da Fm. Torres. Provavelmente, o vulcanismo teria continuado, depositando uma espessa sequência vulcânica correspondente às unidades superiores do GSG (Rossetti *et al.*, 2018; Zerfass *et al.*, 2020). Com o fim da atividade vulcânica, ocorreria a deposição de unidades sedimentares da margem passiva da Bacia de Pelotas (Bueno *et al.*, 2007; Anjos-Zerfass *et al.*, 2009, 2013). A elevação da região costeira e a erosão levaram à forma atual do relevo (Figura 59 G).

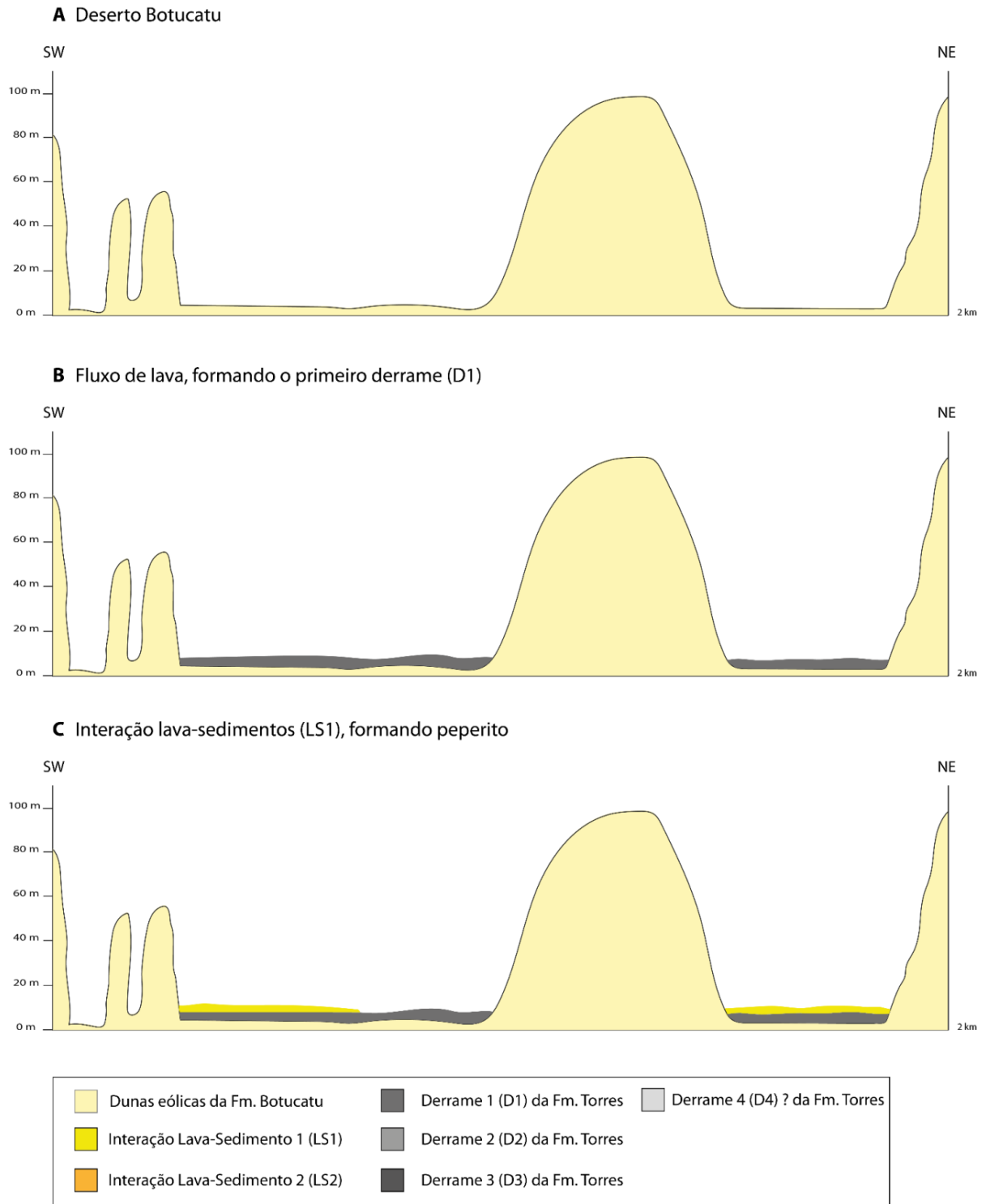
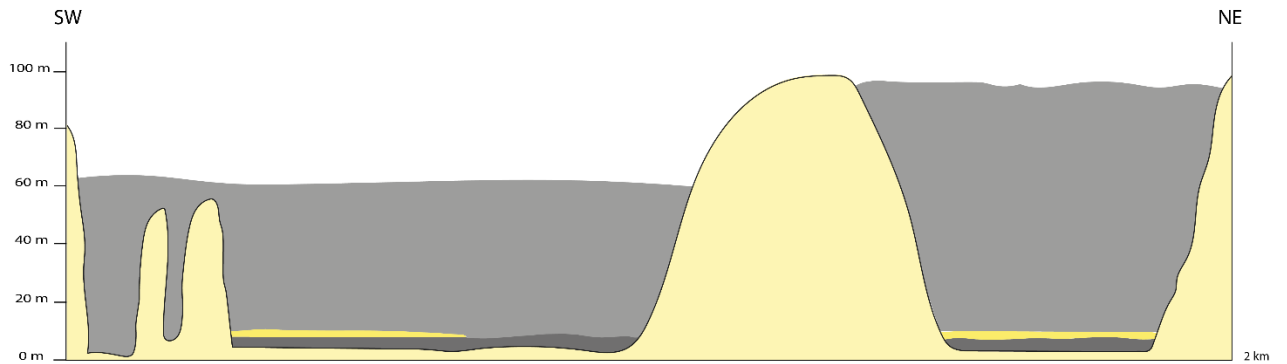
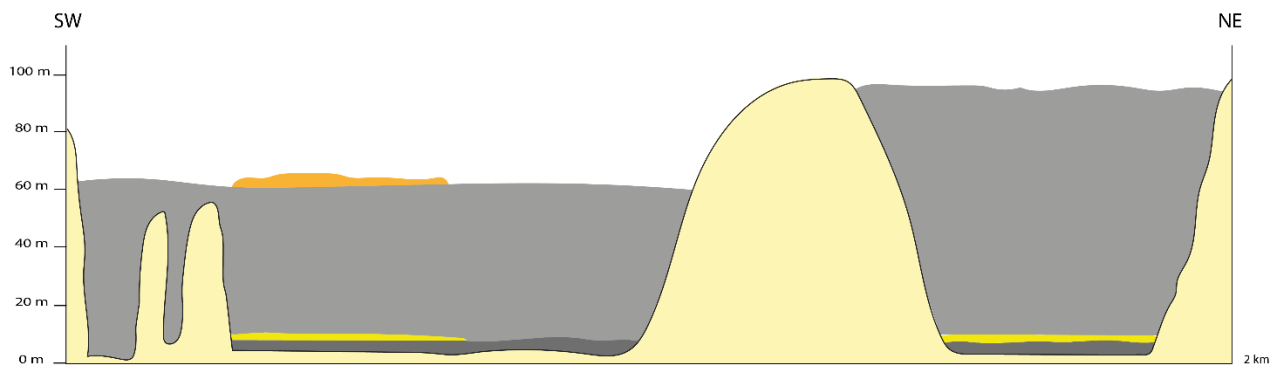


Figura 59 - Modelo de *emplacement* das rochas vulcânicas na Praia de Torres.

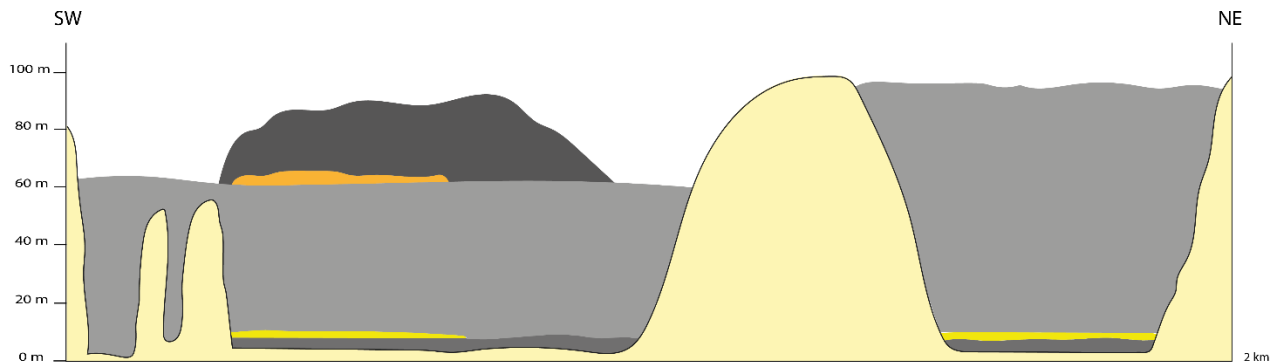
D Fluxo de lava, formando o segundo derrame (D2)



E Interação lava-sedimentos (LS2), formando peperito



F Fluxo de lava, formando o terceiro derrame (D3)



G Possível quarto derrame (?), processo de erosão e subsidência, até a configuração atual do relevo

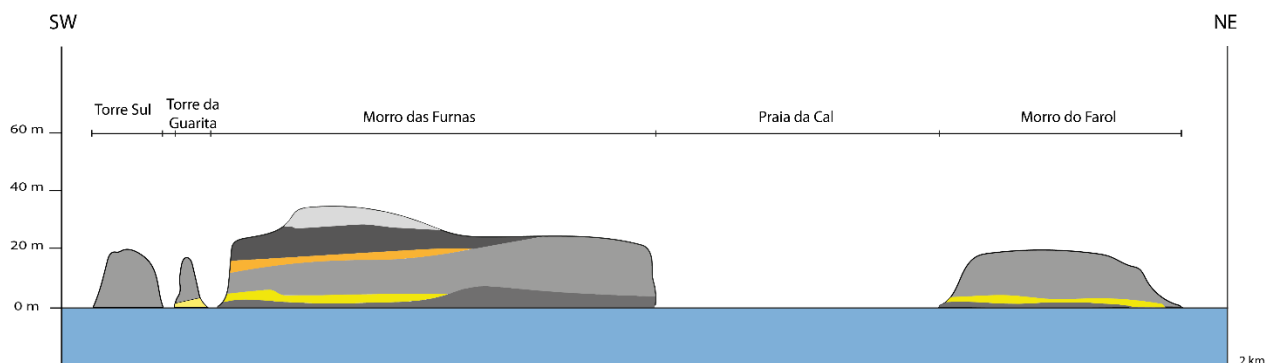


Figura 59 (cont.) - Modelo de *emplacement* das rochas vulcânicas na Praia de Torres.

4.2 Petrografia da Fm. Torres

Os derrames definidos no testemunho de sondagem foram classificados petrograficamente como basaltos porfiríticos. O grau de cristalinidade varia para cada litofácies, podendo ser holocristalina, hipocristalina ou hipohialina. Texturalmente são rochas porfiríticas e glomeroporfiríticas, compostas por fenocristais de plagioclásio, ortopiroxênio e clinopiroxênio em uma matriz afanítica microcristalina de plagioclásio, ortopiroxênio e clinopiroxênio.

Apresentam 8 a 13% de fenocristais de plagioclásio cálcico subédricos a euédricos, com tamanhos que variam de 0,3 a 3,5 mm, com hábito prismático. Apresentam maclas polissintéticas e podem estar zonados (Figura 60, A e B). A alteração comum é a argilização (Figura 62 G e H). Os fenocristais de ortopiroxênio são majoritariamente euédricos, com tamanhos de 0,3 a 1,5 mm e abundância de 5 a 10%, frequentemente com hábito prismático. De maneira localizada, observa-se o processo de uralitização, em que os ortopiroxênios estão transformados em anfibólio, provavelmente em actinolita pelo hábito fibroso e pleocroísmo (Figura 62 E e F). Outro processo de alteração que ocorre nos ortopiroxênios é a formação de iddingsita na borda desses minerais (Figura 62 C e D) e o aspecto “serpentizado” (Figura 62 A e B). Os fenocristais de clinopiroxênios são subédricos, de hábito prismático, com tamanhos de 0,25 a 0,8 mm e abundância de 2 a 8%.

Nos termos holo a hipocristalinos, a matriz é formada por plagioclásio cálcico e ortopiroxênios euédricos a subédricos, ambos com hábito prismático (Figura 60 C e D). Os clinopiroxênios ocorrem subédricos a anédricos intergranulares (Figura 61 G e H) e o vidro máfico maciço é do tipo taquilítico (Figura 60 E e F). De maneira localizada, observa-se as texturas subofítica (clinopiroxênio e plagioclásio; Figura 61 A e B), coronítica (ortopiroxênio e clinopiroxênio; Figura 61 C e D), peneira (plagioclásio) e esqueletal (ortopiroxênio; Figura 61 E e F). Na litofácies hipohialina, a matriz é composta por vidro máfico maciço do tipo sideromelano (Figura 60 E e F) e, de modo subordinado, cristais de plagioclásio cálcico e ortopiroxênio euédricos, com hábito prismático.

As vesículas são subarredondadas a alogadas com tamanhos que variam de 0,1 mm a 1 cm com abundância de 4 a 23% e preenchimento secundário composto por zeolitas, e subordinadamente por calcedônia, quartzo e carbonato. Os padrões

arredondados das vesículas sugerem uma baixa taxa de viscosidade durante o *emplacement*, típicas de lavas do tipo *pahoehoe*. Observa-se fraturas contínuas e descontínuas com 0,1 a 0,3 mm de espessura, com o preenchimento similar a das vesículas (Figura 60, G e H).

A partir da análise petrográfica, pode-se inferir que houve duas etapas de cristalização. Os fenocristais de plagioclásio e piroxênios indicam que a cristalização teve início precocemente. A matriz afanítica a fanerítica fina sugere um segundo momento de cristalização com maior *undercooling*.

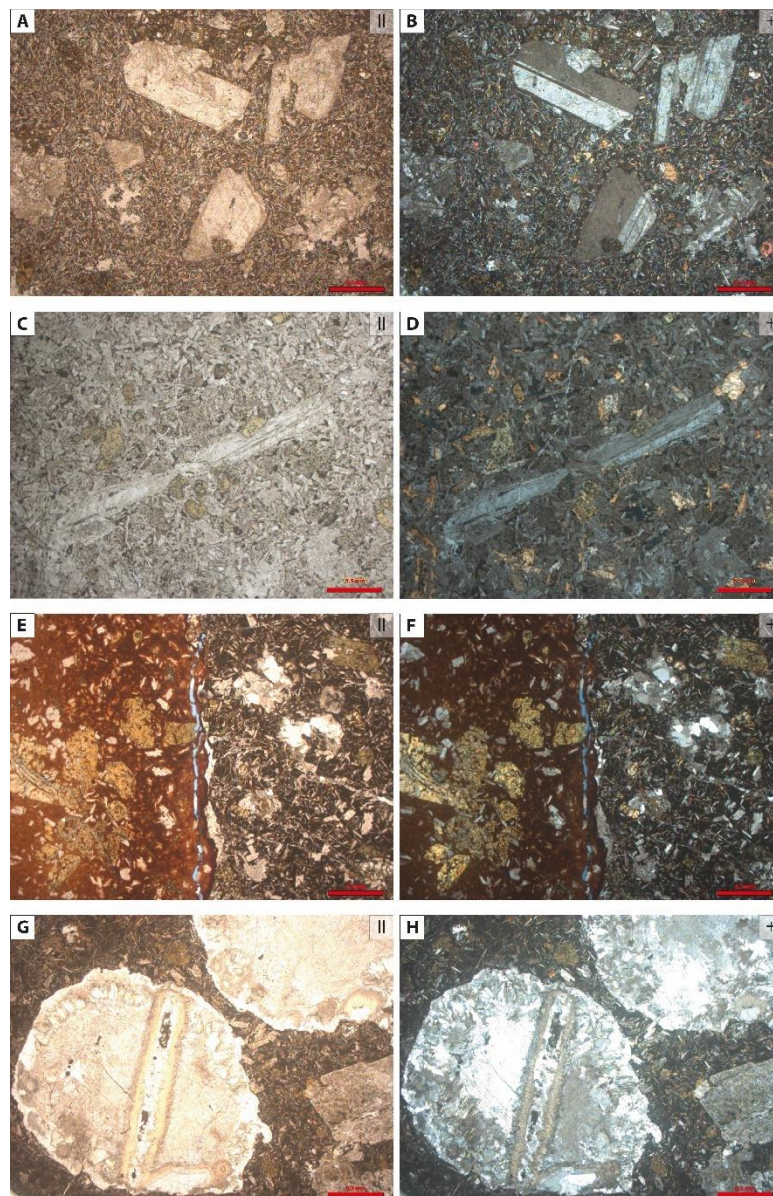


Figura 60 - Fotomicrografias da mineralogia e texturas gerais. A e B) Textura porfirítica e glomeroporfirítica, evidenciada por fenocristais de plagioclásio. C e D) Textura holocristalina, com um fenocristal de plagioclásio no centro da figura. E e F) Textura hipocristalina. Vidro do tipo sideromelano (avermelhado) à esquerda da lâmina. Vidro do tipo taquilito (preto), à direita da lâmina. G e H) Amígdalas preenchidas por zeolita. Nicóis paralelos (II) e Nicóis perpendiculares (+). (Fonte: autor).

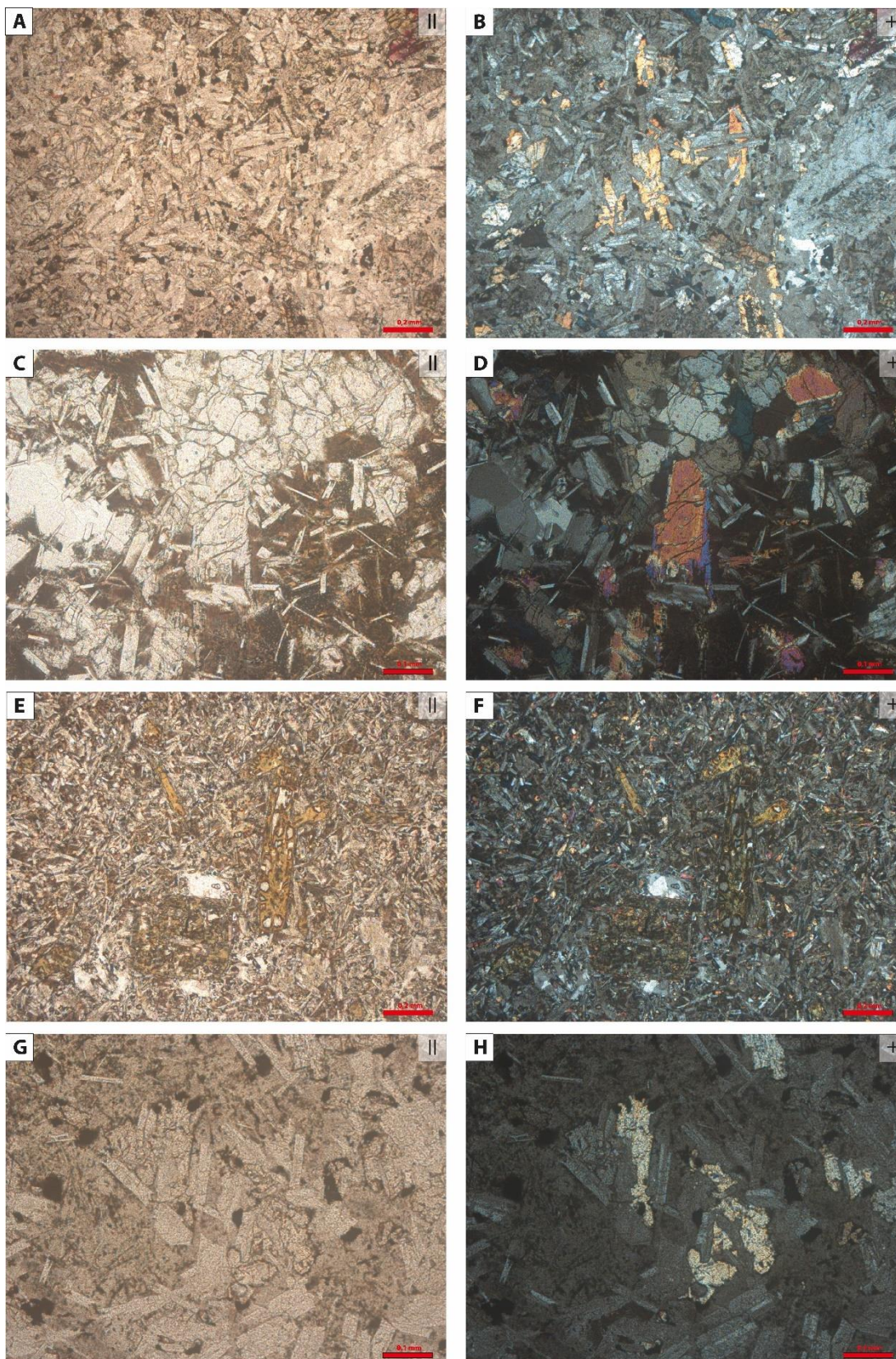


Figura 61 - Fotomicrografias da mineralogia e texturas específicas. A e B) Textura subóptica, evidenciada por cristais de plagioclásio parcialmente inclusos em cristais de piroxênios. C e D) Textura coronítica, coroa de reação de um clinopiroxênio envolvendo um núcleo de ortopiroxênio. E e F) Cristal de ortopiroxênio com hábito esquelético. G e H) Textura intergranular, espaços entre os cristais de plagioclásios são ocupados por clinopiroxênio. Nicóis paralelos (II) e Nicóis perpendiculares (+). (Fonte: autor).

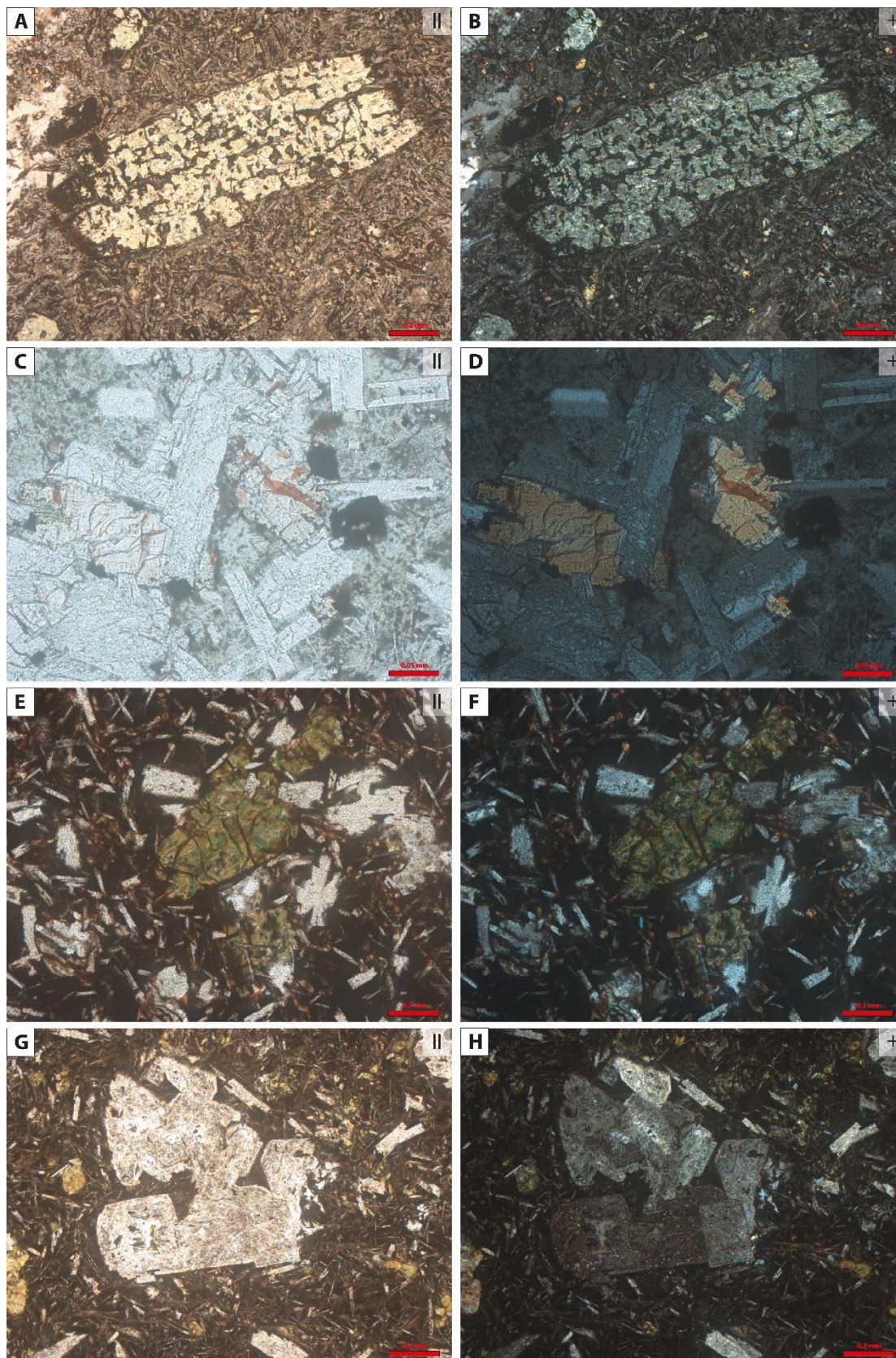


Figura 62 - Fotomicrografias das alterações. A e B) Aspecto “serpentinizado” do cristal de ortopiroxênio. C e D) Iddingsita, bordeando cristal de ortopiroxênio. E e F) Uralitização, transformação de um ortopiroxênio em um anfibólio, provavelmente em actinolita. G e H) Argilização em cristais de plagioclásio. Nicóis paralelos (II) e Nicóis perpendiculares (+). (Fonte: autor).

4.3 Geoquímica

A análise geoquímica de rocha total foi realizada em sete amostras do testemunho de sondagem, representativa das quatro litofácies (Bpv, Bpm, Bps e Bam). A perda ao fogo (PF) das amostras é de 1,4 – 5,9% e as análises dos elementos maiores foram recalculadas para 100% em base anidra, para minimizar o efeito da alteração. As litofácies vulcânicas do testemunho apresentam teores de SiO_2 recalculados que variam de 54,89% a 58,49%, indicando que as rochas são intermediárias. O teor de álcalis ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) varia de 3,6 – 6,2 %. De acordo com o diagrama TAS (modificado de Le Bas, 1986), que leva em consideração as razões entre álcalis x sílica, as amostras são classificadas como andesito basáltico (2), andesito (4) e traquiandesito basáltico (1). Realizou-se uma análise comparativa com dados de Rossetti *et al.*, (2019) da Fm. Torres. Observa-se que a maioria das amostras plotam nos campos com afinidade geoquímica para esta Formação. Apenas uma amostra (OS-236,55) não se encaixa neste padrão. Isso ocorre pelo fato de apresentar a PF mais elevada quando comparado com as outras amostras (Figura 63). Os dados completos da análise geoquímica de rocha total se encontram no Anexo B.

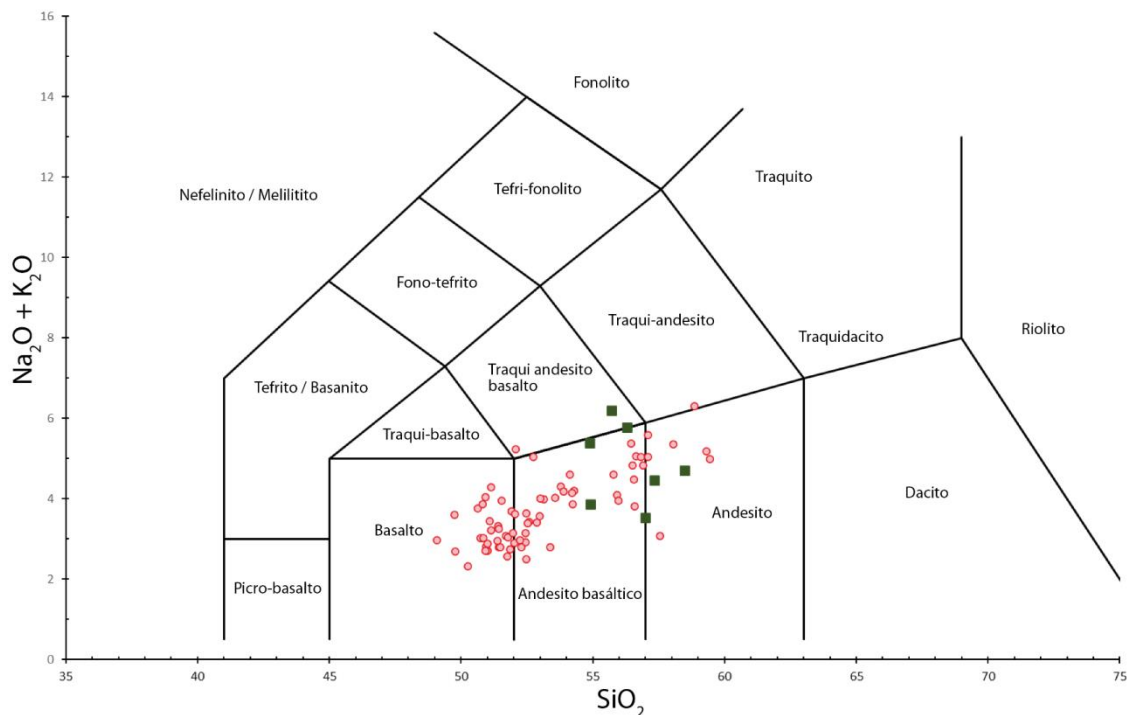


Figura 63 - Distribuição das composições em diagrama de classificação de SiO_2 versus álcalis (TAS – Le Maitre, 1989). Quadrados verdes = dados deste trabalho; Círculos Vermelhos = dados de Rossetti *et al.*, (2019).

Analisando a variação de elementos maiores em relação com a profundidade, utilizando o MgO como índice de diferenciação, observa-se que ocorre depleção de Al_2O_3 , FeO^* , MnO , K_2O e o enriquecimento nos elementos SiO_2 , CaO , Na_2O para o topo do intervalo em estudo. A distribuição do conteúdo de MgO apresenta uma leve variação, entre 4,85% e 7,18%. A base do derrame *sheet pahoehoe* corresponde a afinidade geoquímica mais primitiva, com o maior valor de MgO. O núcleo e a parte mais espessa do derrame *hummocky pahoehoe* são os termos mais diferenciados (Figura 64). As rochas são toleíticas, supersaturadas em sílica, com quartzo normativo (Figura 65).

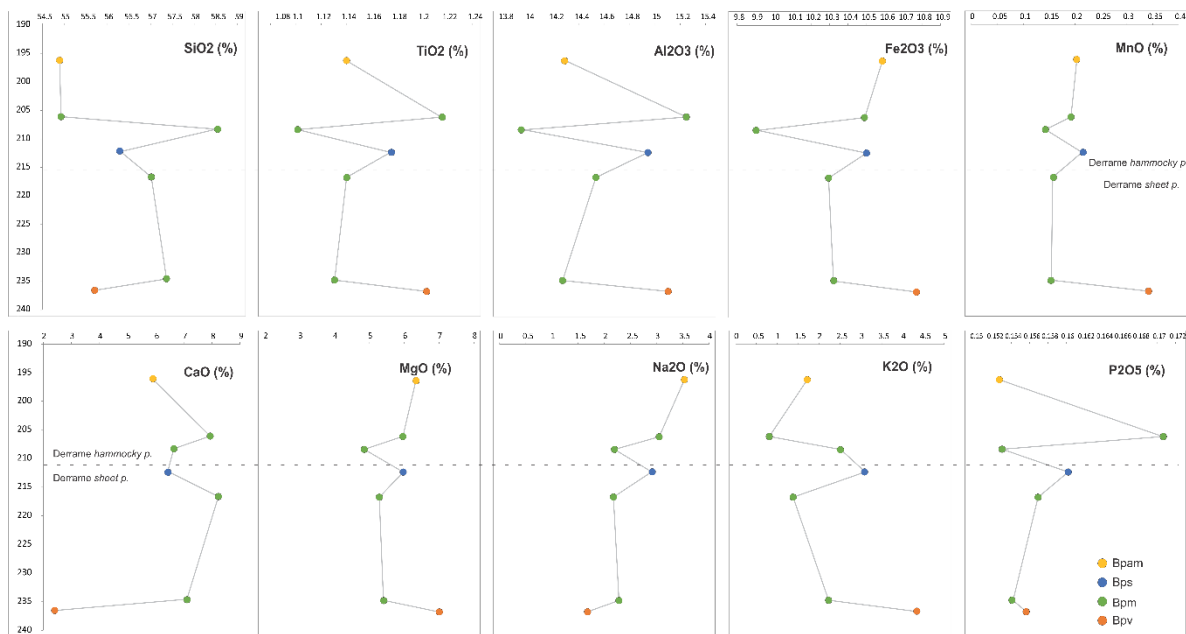


Figura 64 - Diagramas mostrando a variação dos elementos maiores com a profundidade no furo de sondagem (Fonte: autor).

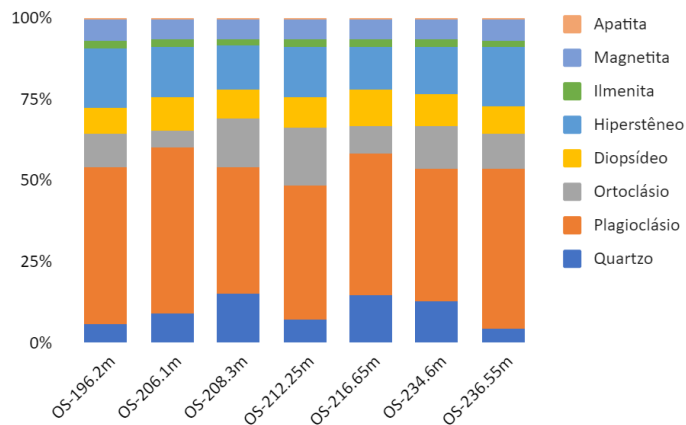


Figura 65 – Proporção de minerais normativos para as amostras do testemunho de sondagem, segundo o cálculo da norma CIPW.

4.4 Microporosidade

A microporosidade nas litofácies Bpv, Bpm, Bps e Bpam é baixa, estimada em entre 0% – 0,4%, sendo a maior parte da microporosidade obstruída pela precipitação de minerais secundários nas vesículas e fraturas, como zeolita, quartzo, calcedônia e carbonato. A microporosidade presente nas rochas é secundária do tipo intra-cristal (Figura 66 A e B) formada pela dissolução parcial de minerais primários, como clino e ortopiroxênio, de fratura *quench* (Figura 66 C e D), pelo rápido resfriamento da lava e do tipo *drusy* (Figura 66 E e F), associada a porosidade residual (Quadro 8). Na maioria dos casos, a microporosidade intra-cristal acompanha a direção de clivagem dos minerais. A microporosidade de fratura *quench* não segue nenhuma direção preferencial. A microporosidade do tipo *drusy* é restrita a amostra OS-196,2. As amígdalas nas litofácies são subarredondadas a alongadas com 0,1 mm a 1,5 cm de diâmetro, preenchidas majoritariamente por zeolita.

Quadro 8 - Análise da microporosidade em lâmina delgada.

Fácies	Amostra	Microporosidade total (%)	Intra-cristalina (%)	Fratura (%)	Drusy (%)
Bpv	OS-236,55	0,2	0,1	-	0,1
Bpm	OS-234,6	0,2	0,2	-	-
Bpm	OS-216,65	0,1	0,1	-	-
Bps	OS-212,25	0,5	0,1	0,4	-
Bpv	OS-212,25	0,2	0,1	0,1	-
Bpam	OS-211,0	0	-	-	-
Bpm	OS-208,3	0	-	-	-
Bpm	OS-206,1	0,2	0,2	-	-
Bpam	OS-198,8	0	-	-	-
Bpv	OS-196,2	0,1	-	-	0,1
Bpam	OS-191,0	0	-	-	-

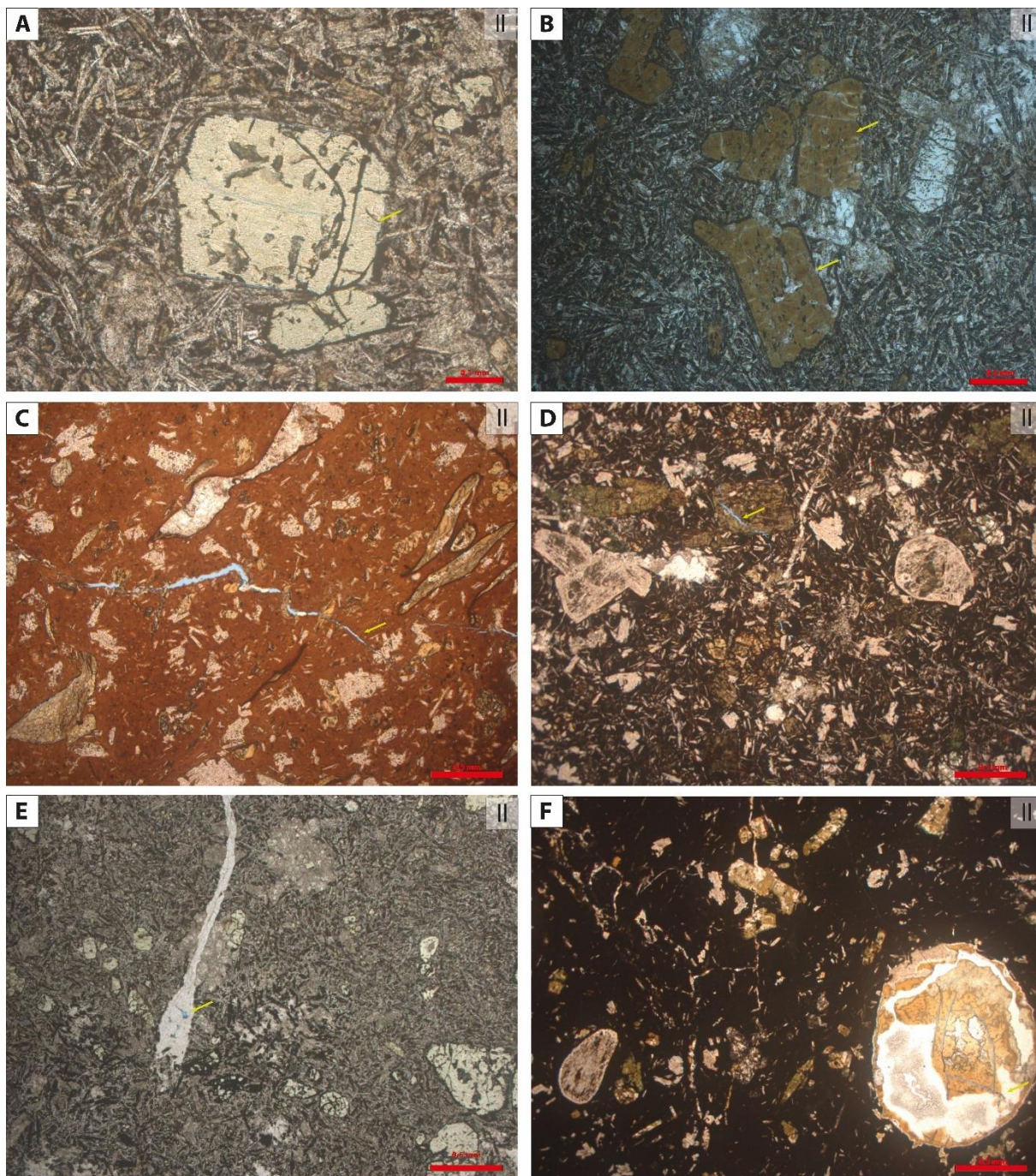


Figura 66 - Fotomicrografias da microporosidade. A) Microporosidade secundária do tipo intra-cristal em clinopiroxênio. B) Microporosidade secundária do tipo intra-cristal em ortopiroxênio. C e D) Microporosidade secundária do tipo fratura. E e F) Microporosidade secundária residual (*drusy*) em uma amígdala. Nicóis paralelos (II). (Fonte: autor).

4.5 Petrofísica

Ensaio petrofísicos foram realizados em oito amostras providas do testemunho e quatro amostras do campo, totalizando 12 amostras (Quadro 9). As amostras de campo são oriundas de derrame do tipo *ponded* (2) e derrame *pahoehoe* tabular (2). Em relação ao testemunho, as amostras são de derrame *hummocky pahoehoe* composto (5) e derrame *sheet pahoehoe* (3). A análise da porosidade demonstra baixos valores, variando de 0,38% a 4,8%. A litofácies Bpam detém os maiores valores de porosidade, 1,03% e 4,8%. O restante das litofácies apresenta valores inferiores a 1%. A permeabilidade é basicamente nula em todos os casos (Quadro 9). A densidade das rochas varia de 2,379 até 2,962 g/cm³. As litologias maciças geralmente são as mais densas, variando de 2,808 a 2,901 g/cm³. Já os litotipos que apresentam amígdalas/vesículas tendem a ser relativamente menos densos, valores entre 2,379 a 2,793 g/cm³. O relatório do laboratório que realizou as análises se encontra no Anexo A.

Quadro 9 - Resultados da análise de porosímetro, permeâmetro e densidade.

Amostra	Litofácies	Origem	Porosidade (%)	Permeabilidade (mD)	Densidade (g/cm ³)
OS-236,55	Bpv	Testemunho	0,49	0	2,763
OS-222,45	Bpm	Testemunho	0,38	0	2,859
OS-212,25	Bps	Testemunho	0,9	0,04	2,708
OS-198,8	Bpam	Testemunho	4,8	0,11	2,719
OS-199	Bps	Testemunho	0,57	0	2,379
OS-196,2	Bpv	Testemunho	0,65	0	2,793
OS-194,1	Bpm	Testemunho	0,4	0	2,739
OS-188,35	Bpam	Testemunho	1,03	0	2,561
23-IM-08-A	Bc	Campo	0,73	0	2,835
23-IM-04-A	Bc	Campo	0,67	0	2,901
23-IM-02-E	Bm	Campo	0,61	0	2,808
23-IM-02-F	Ba	Campo	0,75	0	2,962

Rossetti *et al.* (2019) analisaram os aspectos petrofísicos do GSG. Plotando os dados da Fm. Torres no gráfico de porosidade versus permeabilidade, definiram três campos com base na morfologia dos derrames *pahoehoe*: (1) Crosta inferior com porosidade intermediária, variando de 5,42% a 8,47%; (2) Núcleo com baixa porosidade, de 0,41% a até 7,43%; (3) Crosta superior com alta porosidade, variando de 3,39% a 22,55%. Comparando com os dados obtidos neste trabalho, as amostras

se encontram no campo do núcleo de derrame, apesar de serem provindas tanto do núcleo quanto de ambas as crostas (Figura 67). Isso ocorre pelo fato de que as vesículas das litofácies analisadas estarem obliterando a porosidade, com o preenchimento de minerais secundários como zeolita, quartzo, calcedônia e carbonato.

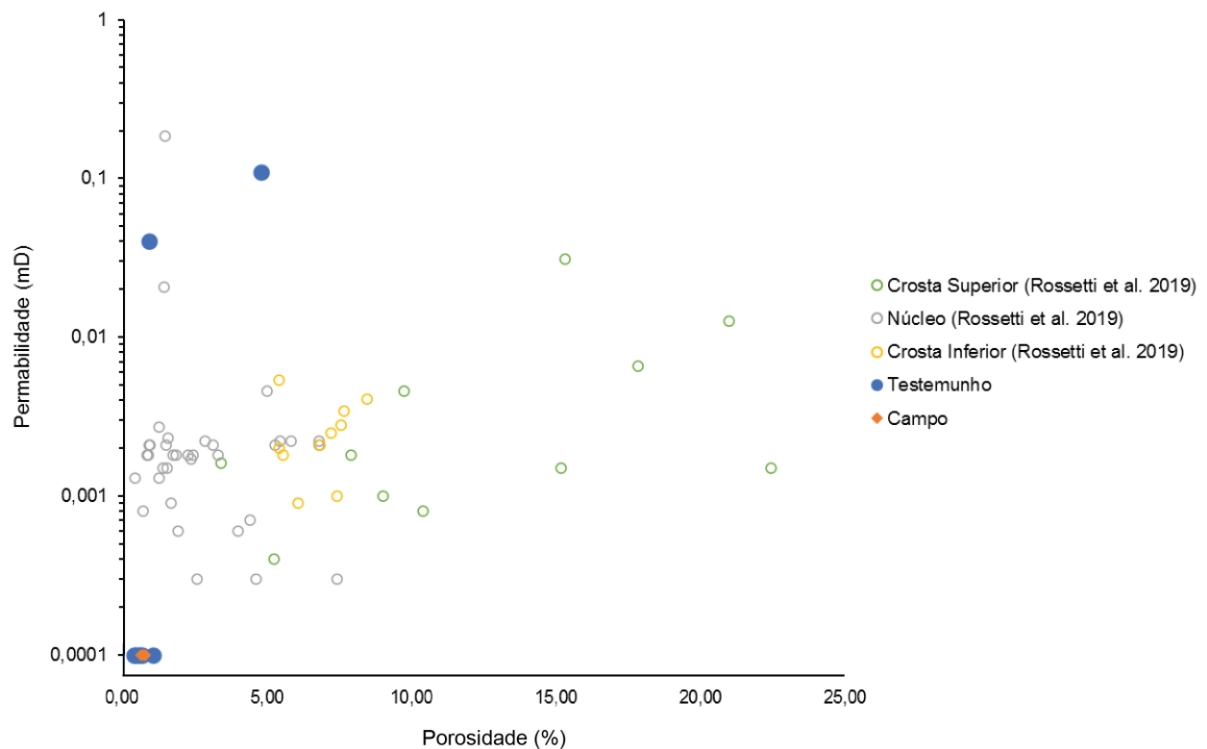


Figura 67 - Gráfico comparando os resultados obtidos neste trabalho com análises petrofísicas da Fm. Torres (Fonte: autor).

A porosidade e permeabilidade aumentam, em pequena proporção, em direção ao topo do derrame *sheet pahoehoe* (Bpv, Bpm, Bps). No derrame *hummocky pahoehoe* composto (Bpv, Bpm, Bps, Bpam), por ser formado pelo conjunto de lobos, a porosidade apresenta um comportamento heterogêneo, sendo maior na litofácies Bpam (Figura 68).

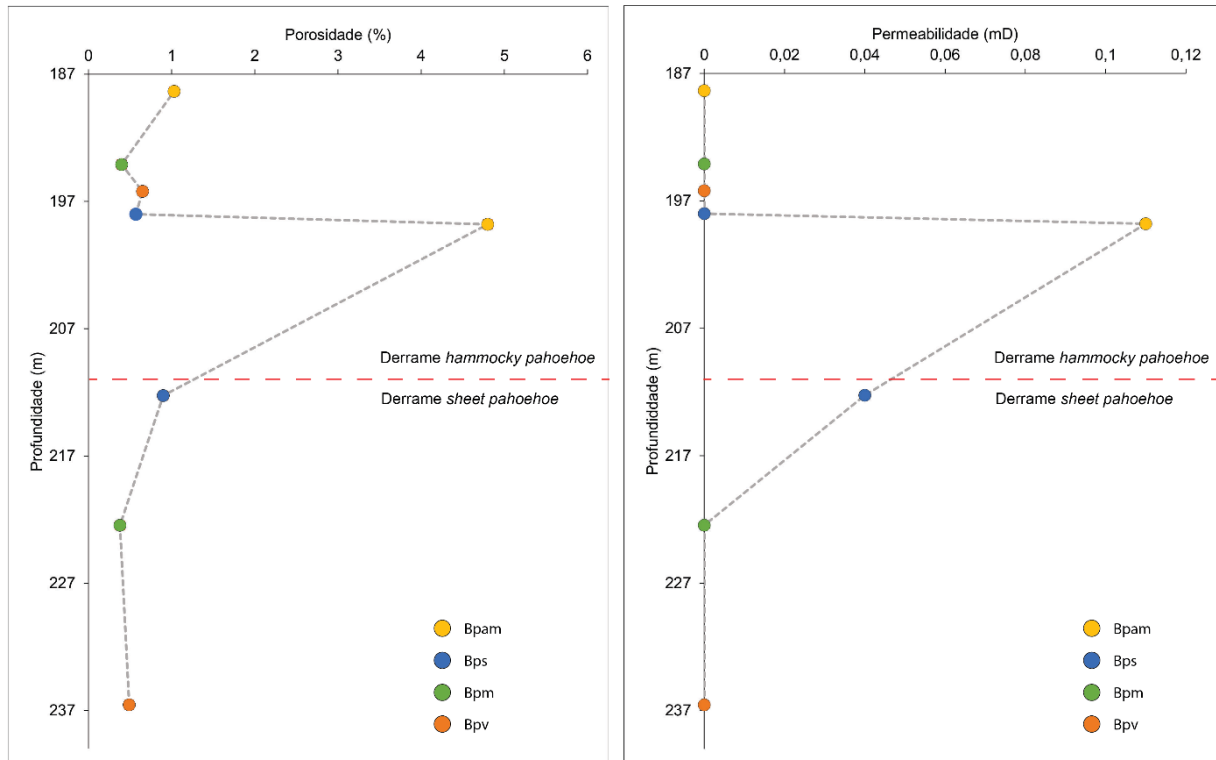


Figura 68 - Variação da porosidade em profundidade no testemunho (Fonte: autor).

Comparou-se os ensaios petrofísicos deste estudo com dados de reservatórios na China e no Atlântico Norte. Na bacia Songliao, situada na China, a exploração de gás ocorre em derrames básicos a ácidos (Wang & Chen, 2015). Na *LIP* do Atlântico Norte, na porção próxima as Ilhas Faroe, perspectivas de exploração de hidrocarbonetos em rochas piroclásticas estão em desenvolvimento (Ólavsdóttir *et al.*, 2015). As litofácies da Fm. Torres não se adequam a possíveis reservatórios, pois os valores de porosidade e permeabilidade são muito baixos (Figura 69).

Como um modelo análogo de sistema petrolífero, as litofácies estudadas podem atuar como horizontes selantes, promovendo o trapeamento de hidrocarbonetos (Figura 71). As estruturas colunares e fraturas poderiam atuar como caminhos preferenciais para a migração de óleo e gás. Entretanto, devido aos baixos valores de porosidade e permeabilidade, a migração ocorreria de maneira muito lenta e seria dificultada pela grande espessura da camada selante.

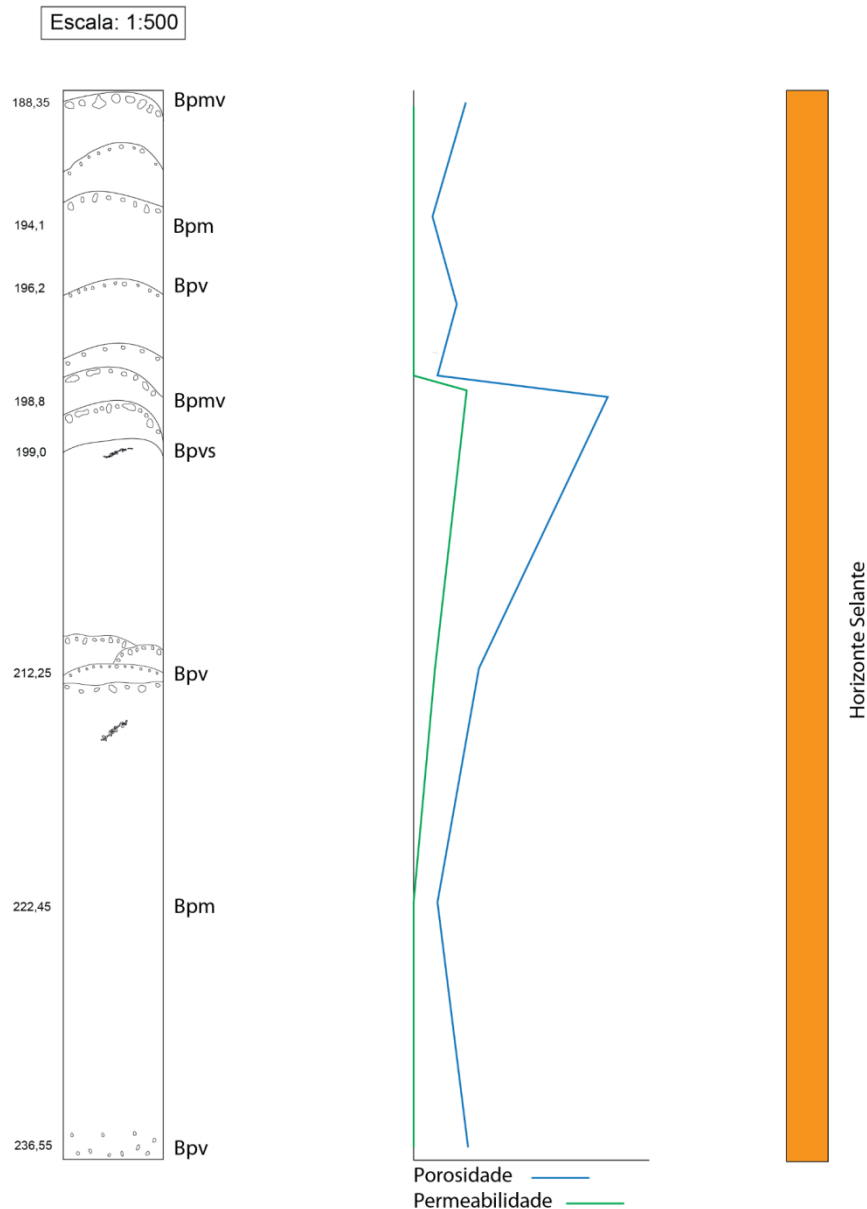


Figura 71 - Modelo esquemático relacionando as litofácies descritas no testemunho, as variações das propriedades petrofísicas no perfil e a caracterização da sequência vulcânica no sistema petrolífero, atuando como um horizonte selante (Fonte: autor).

4.6 Integração dos Dados

Os parâmetros petrofísicos das associações vulcânicas analisadas são baixos. No derrame *sheet pahoehoe* a porosidade variou entre 0,49 a 0,9%. No derrame do tipo *hummocky pahoehoe* os valores de porosidade variaram de 0,9 a 4,8%. O derrame *pahoehoe* em campo apresentou porosidade entre 0,61 a 0,75%. No derrame do tipo *ponded* de interduna a porosidade variou entre 0,67 a 0,73%. Nas litofácies, a porosidade secundária é dominante, representada pelo tipo intra-cristal (dissolução parcial de minerais primários), enquanto que a porosidade de fratura e *drusy* são subordinadas. Em virtude da precipitação de minerais secundários, os poros originais foram obstruídos (Quadro 10).

Segundo Hyne (2012), os valores de porosidade se encaixam na qualidade insignificante para reservatório de óleo e a permeabilidade da rocha é pobre. Entretanto, caso não houvesse a precipitação de minerais secundárias nas vesículas, a porosidade das litofácies poderia ser entre 7 a 15%, sendo enquadrado como reservatório de qualidade razoável. Devido aos baixos parâmetros petrofísicos, os derrames poderiam atuar como rochas selantes, permitindo a acumulação de hidrocarbonetos.

Quadro 10 - Síntese dos padrões petrofísicos identificados nas litofácies e associações.

Assoc. de litofácies	Litofácies	Tipo de microporosidade	Microporosidade	Porosidade (%)	Permeabilidade (mD)
<i>Sheet Pahoehoe</i>	Bpv	2ª: dissolução parcial intra-cristal de minerais primários e <i>drusy</i>	0,2	0,49	0
	Bpm	2ª: dissolução parcial intra-cristal de minerais primários	0,2	0,38	0
	Bps	2ª: dissolução parcial intra-cristal de minerais primários	0,5	0,9	0,04
<i>Hummock pahoehoe</i>	Bpvs	2ª: dissolução parcial intra-cristal de minerais primários e de fratura	0,2	0,9	0,04

	Bpam	2ª: dissolução parcial intra-cristal de minerais primários	0	4,8	0,11
	Bpm	2ª: dissolução parcial intra-cristal de minerais primários	0,2	0,4	0
	Bpv	2ª: dissolução parcial intra-cristal de minerais primários e de fratura e drusy	0,1	0,65	0
<i>Pahoehoe</i> (campo)	Bm	-	-	0,61	0
	Bam	-	-	0,75	0
<i>Ponded</i> de interduna	Bc	-	-	0,67 a 0,73	0

5 CONCLUSÃO

- Identificou-se quatro litofácies e duas associações de fácies na sucessão vertical das rochas vulcânicas do testemunho de sondagem. Basalto porfirítico vesiculado (Bpv), basalto porfirítico maciço (Bpm), basalto porfirítico com estruturas de segregação (Bps) e basalto porfirítico amigdaloidal (Bpam). As litofácies Bpv, Bpm e Bps consistem em um derrame *sheet pahoehoe*. As litofácies Bpv, Bpm, Bps e Bpam são interpretadas como derrames do tipo *hummocky pahoehoe*.
- Petrograficamente, são basaltos porfiríticos e glomeroporfiríticos, com matriz afanítica a fanerítica fina. Predominantemente são hipocristalinos, mas ocorrem termos holocristalinos e hipohialinos. Os fenocristais são de pl>opx>cpx, euédricos a subédricos. A matriz é composta por plagioclásico, opx e cpx. Apresentam localmente textura subofítica, coronítica, peneira (pl), intragranular (cpx) e esquelética (opx). Observa-se alterações do tipo argilização nos plagioclásios, uralitização nos opx e iddingsita na borda dos opx. Amígdalas esféricas a alongadas, variando de 0,1 mm a 1,5 cm, preenchidas por zeolita, quartzo, calcedônia e carbonato.
- No aspecto geoquímico, são rochas intermediárias (52 a 63%), classificadas no TAS como andesito basáltico (2), andesito (4) e traquiandesito basáltico (1). As rochas são toleíticas, supersaturadas em sílica, com quartzo normativo.
- As litofácies descritas no testemunho estão correlacionadas com a Fm. Torres devido a morfologia dos derrames, petrografia e geoquímica.
- O estudo da estruturação interna da Fm. Torres na Calha de Torres permitiu definir 12 litofácies, oito de vulcânicas básicas, duas vulcanoclásticas e duas siliciclásticas. Basalto amigdaloidal (Bam), Basalto vesiculado (Bv), Basalto vesiculado em *layering* (Blv), Basalto com colunata (Bc), Basalto maciço (Bm), Basalto com entablamento (Be), Basalto com *pipe vesicles* (Bpi), Basalto com disjunções colunares (Bdj) são as litofácies vulcânicas básicas. O topo dos derrames é formado por Bam, Bv e Blv, o núcleo compreende em Bc, Bm e Be, e a base é composta por Bpi. A Bdj indica uma intrusão. Brecha basáltica matriz sedimentar superior (BBma[s]) e brecha basáltica matriz sedimentar inferior (BBma[i]) consistem na litofácies vulcanoclásticas, correspondendo a peperitos. Arenito com estratificação cruzada tangencial (Act) e arenito com

estratificação plano-paralelo (App) são as litofácies siliciclásticas. A Act corresponde a duna eólica e a App indica lençol de areia.

- A análise da microporosidade e os ensaios petrofísicos das rochas permitiram relacionar o tipo de poro e padrões petrofísicos com as litofácies identificadas no testemunho e em campo.
- As litofácies do testemunho apresentam valores de microporosidade muito baixa, variando de 0,1 a 0,4%.
- A microporosidade dominante das litofácies do testemunho é do tipo secundária, representada principalmente pelo tipo intra-cristal, pelo processo de dissolução parcial de minerais primários (plágiosio e ortopiroxênio). De modo subordinado, ocorre a porosidade secundária do tipo fratura, pelo rápido *undercooling* da lava e do tipo *drusy* (residual).
- A microporosidade original foi intensamente afetada pela precipitação de minerais secundários (zeolita, quartzo, calcedônia e carbonato) nas vesículas, formando amígdalas. Nas litofácies Bpam e Bps, a porosidade poderia apresentar altos valores, de aproximadamente 15% e 7%, respectivamente. Com o grau de vesiculação menor, a porosidade original das litofácies Bpv e Bpm poderia ser de 5% e 1%, respectivamente.
- Os ensaios petrofísicos demonstraram uma baixa porosidade, entre 0,38% a 4,8%, sendo a litofácies Bpam com os maiores valores de porosidade. O restante das litofácies apresenta valores <1%. A permeabilidade é basicamente nula em todos os casos. No aspecto da densidade, as litologias maciça são mais densas e as amígdalas/vesículas tendem a ser relativamente menos densas.
- Com base em Hyne (2012), os valores de porosidade apresentados por essas litofácies, de até 5%, se encaixam em uma qualidade insignificante para reservatório. A análise comparativa com reservatórios vulcânicos na China e no Atlântico Norte constata que as litofácies não se adequam a possíveis reservatórios.
- Comparando com os dados laboratoriais de uma rocha selante evaporítica e devido aos resultados de baixa porosidade e permeabilidade, as litofácies da apresentam aspectos petrofísicos condizentes aos de rochas selantes.

- No sistema petrolífero, as litofácies estudadas poderiam atuar como horizontes selantes, promovendo o trapeamento de hidrocarbonetos.
- Os resultados obtidos com a construção do arcabouço estratigráfico, petrografia, análise dos padrões de microporosidade e ensaios petrofísicos servem de base para a geração de modelos análogos para reservatórios não-convencionais vulcânicos.
- A metodologia empregada contribui no estudo de bacias vulcanossedimentares *offshore*, onde a aquisição de dados é complexa.

REFERÊNCIAS

- Anjos-Zerfass, G.S., Chemale Jr., F., Souza, P.A., 2009. Biocronoestratigrafia da Bacia de Pelotas: estado atual e aplicação na geologia do petróleo. *Braz. J. Genet.* 38, 47–62.
- Anjos-Zerfass, G.S., Ruban, D.A., Chemale Jr., F., Zerfass, H., 2013. Cenozoic synthem stratigraphic architecture of the SE Brazilian shelf and its global eustatic context: evidence from the Pelotas Basin (offshore Brazil). *Geologos* 19, 273–290.
- Aubele, J.C., Crumpler, I.S. & Elston, W.E. 1988. Vesicle zonation and vertical structure of basalt flows. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 35: 349-374.
- Barreto, C.J.S. 2016. *Associação de fácies, padrões de vesiculação e petrologia dos derrames básicos da Formação Serra Geral na ombreira sul da Calha de Torres (RS)*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geociências. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS – BR.
- Barreto, C.J.S., de Lima, E.F., Scherer, C.M., Rossetti, L. de M.M., 2014. Lithofacies analysis of basic lava flows of the Paraná igneous province in the south hinge of Torres Syncline, Southern Brazil. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 285, 81–99. doi:10.1016/j.jvolgeores.2014.08.008
- Barreto, C.J.S., Lima, E.F., Goldberg, K., 2017. Primary vesicles, vesicle-rich segregation structures and recognition of primary and secondary porosities in lava flows from Paraná igneous province, southern Brazil. *Bulletin of Volcanology*, Vol. 79, Pages 31. <https://doi.org/10.1007/s00445-017-1116-x>.
- Bas, M. J. LE. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, v. 27, n. 3, p. 745-750.
- Becker, M., Lima, E.F., Waichel, B.L., Mantovani, I.F. 2019. Pore system quantification and characterization in volcanic rocks: a case study from the lower cretaceous Serra Geral group, Paraná Basin, southern Brazil. *Journal of Petroleum Geology*, Vol. 42(3), Pages 301-318. <https://doi.org/10.1111/jpg.12735>
- Bellieni, G., Brotzu, P., Comin-Chiaramonti, P., Ernesto, M., Melfi, A., Pacca, I.G., Piccirillo, E.M. 1984. Flood basalt to rhyolite suites in the Southern Parana Plateau (Brazil): palaeomagnetism, petrogenesis and geodynamic implications. *J. Petrol.* 25 (3), 579–618
- Bondre, N.R. & Hart, W.K. 2008. Morphological and textural diversity of the Steens Basalt lava flows, Southeastern Oregon, USA: implications for emplacement style and nature of eruptive episodes. *Bulletin of Volcanology*, 70: 999-1019.
- Bondre, N.R., Duraiswami, R. a., Dole, G., 2004. Morphology and emplacement of flows from the Deccan Volcanic Province, India. *Bull. Volcanol.* 66, 29–45. doi:10.1007/s00445-003-0294-x

Brown, R.J., Blake, S., Bondre, N.R., Phadnis, V.M., Self, S. 2011. 'A'ā lava flows in the Deccan Volcanic Province, India, and their significance for the nature of continental flood basalt eruptions. *Bulletin of Volcanology*, 73: 737-752.

Bryan S.E. & Ernst, R.E. 2008. *Revised definition of large igneous provinces (LIPs)*. *Earth Sci. Rev.* 86.

Bueno, G.V., Zacharias, A.A., Oeiro, S.G., Cupertino, J.A., Falkenhein, F.U.H., Martins Neto, M.A., 2007. Bacia de Pelotas. *Bol. Geociências Petrobras* 15, 551–559.

Cas, R.A.F. & Wright J.V. 1987. *Volcanic Successions: Modern and Ancient*. 522 pp. Allen & Unwin, London.

Coffin, M.F. & Eldholm, O., 1992. Volcanism and continental break-up: a global compilation of large igneous provinces. In: *Geological Society of London Special Publication*, vol. 68, pp. 17e30.

Coffin, M.F. & Eldholm, O., 1994 Large Igneous Provinces: crustal structure, dimensions and external consequences. *Rev. Geophys.* 32:1–36. <https://doi.org/10.1029/93RG02508>

Colombier, M., Wadsworth, F.B., Gurioli, L., Scheu, B., Kueppers, U., Di Muro, A., Dingwell, D.B., 2017. The evolution of pore connectivity in volcanic rocks. *Earth Planet. Sci. Lett.* 462, 99–109. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.01.011>

Couves, C., Roberts, S., Racey, A., Troth, I., Best, A. 2016. Use of X-Ray computed tomography to quantify the petrophysical properties of volcanic rocks: a case study from Tenerife, Canary Islands. *Journal of Petroleum Geology*, Vol. 39(1), Pages 79-94.

Cruz, V.G.P. 2019. *Rochas siliciclásticas e vulcanoclásticas associadas do Grupo Serra Geral na Calha de Torres (RS)*. Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia). – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2019.

Demaison, G.; Huizinga, B. J. 1994. Genetic Classification of Petroleum Systems Using Three Factors: Charge, Migration, and Entrapment: Chapter 4: Part I. Introduction.

Duraiswami, R. A.; Dole, G.; Bondre, N. 2003. Slabby pahoehoe from the western Deccan Volcanic Province: evidence for incipient pahoehoe–aa transitions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 121, n. 3, p. 195-217.

Duraiswami, R.A., Bondre, N.R., Managave, S. 2008. Morphology of rubbly pahoehoe (simple) flows from the Deccan Volcanic Province: implications for style of emplacement. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 177, 822–836.

Duraiswami, R.A., Gadpallu, P., Shaikh, T.N. & Cardin, N. 2014. *Pahoehoe–a'a transitions in the lava flow fields of the western Deccan Traps, India-implications for*

emplacement dynamics, flood basalt architecture and volcanic stratigraphy. *Journal Asian Earth Science*, 84, 146–166.

Eiras, J. F. Influência tectônica de Arco do Caruari na sedimentação fanerozóica da Bacia do Solimões, Norte do Brasil. In: CONG. BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 39., 1996, Salvador. Anais... Salvador: SBG. 1996.p.50-53.

Eiras, J. F.; Wanderley Filho, J. R. 2003. Sistemas petrolíferos ígneo-sedimentares. In: ABPG, CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO & GÁS.

Ernst, R.E. 2014. *Large Igneous Provinces*. Cambridge University Press, United Kingdom, 667 p.

Ernst, R.E., Buchan, K.L., 2003. Recognizing mantle plumes in the geological record. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 31, 469–523. doi:10.1146/annurev.earth.31.100901.145500

Ernst, R.E., Buchan, K.L., Campbell, I.H., 2005. Frontiers in large igneous province research. *Lithos* 79, 271–297. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.09.004>.

Fisher, R.V., Schmincke, H.U. 1984. *Pyroclastic Rocks*. Springer, Heidelberg.

Frank, H.T., Gomes, M.E.B. and Formoso, M.L.L. 2009. Review of the areal extent and the volume of the Serra Geral Formation, Paraná Basin, South America. *Pesquisas em Geociências*, 36 (1), 49–57.

Goés, Adison M.O & FEIJÓ, Flavio J. 1994. Bacia do Parnaíba. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, 8(1): 57-67.

Gomes, A.S., Vasconcelos, P.M., 2021. Geochronology of the Paraná-Etendeka large igneous province. *Earth Sci. Rev.* 220, 103716 <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103716>.

Guardado, L.R., Gamboa, L.A.P., Lucchesi, C.F., 1989. Petroleum geology of the Campos Basin, Brazil, a model for a producing Atlantic type basin. In: Edwards, J.D., Santogrossi, A. (Eds.), *Divergent/Passive Margin Basin: AAPG Memoir*, vol. 48, pp. 3e79.

Hon, K., Gansecki, C., Kauahikaua, J. 2003. The transition from ‘a’ā to pāhoehoe crust on flows emplaced during the Pu’u’Ō’ō-Kū paianaha eruption. *United States Geological Survey professional paper*, 1676: 89-103.

Hyne, N. J. 2012. *Nontechnical guide to petroleum geology, exploration, drilling, and production*. PennWell Books.

James, A.V.G. 1920. Factors producing columnar structures in lavas and its occurrence near Melbourne, Australia. *Journal of Geology*, 28, 458–469

White, J.D.L., Houghton, B.F.; Primary volcanoclastic rocks. *Geology* 2006; 34 (8): 677–680. doi: <https://doi.org/10.1130/G22346.1>

- Jerram, D. A. Volcanology and fades architecture of flood basalts. *Volcanic Rifted Margins*, v. 362, p. 119, 2002.
- Jerram, D. a., Widdowson, M. 2005. The anatomy of Continental Flood Basalt Provinces: geological constraints on the processes and products of flood volcanism. *Lithos* 79, 385–405. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.09.009>.
- Jerram, D.A., Mountney, N.P., Howell, J.A., Long, D., Stollhofen, H. 2000. Death of a sand sea: an active aeolian erg systematically buried by the Etendeka flood basalts of NW Namibia. *Journal of the Geological Society of London*, 157: 513-516.
- Jerram, D.A., Stollhofen, H., 2002. Lava-sediment interaction in desert settings; are all peperite-like textures the result of magma-water interaction? *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 114, 231–249. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(01\)00279-7](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(01)00279-7).
- Kale, V. S., Dole, G., Pillai, S. P., Chatterjee, P., & Bodas, M. (2022). Morphological types in the Deccan Volcanic Province, India: Implications for emplacement dynamics of continental flood basalts. In R. K. Srivastava, R. E. Ernst, K. L. Buchan, & M. de Kock (Eds.), *Large igneous provinces and their plumbing systems* (Vol. 518, pp. 341–396). *The Geological Society of London - Special Publications*. <https://doi.org/10.1144/SP518-2020-246>
- Keszthelyi, L.; Thordarson, T. Rubbly pahoehoe: a previously undescribed but widespread lava type transitional between aa and pahoehoe. In: *Geol. Soc. Am. Abstr. Progr.* 2000.
- Kilburn, C. 1990. Surfaces of ‘a’ā flows-fields on Mount Etna, Sicily: Morphology, rheology, crystallization and scaling phenomena. In: Fink, J.H. (Ed.). *Lava Flows and Domes*. Berlin, Springer-Verlag. p. 129-156.
- Klobes, P.; Meyer, K.; Munro, R. G. 2006. Porosity and specific surface area measurements for solid materials.
- Li, Z., Dong, M., Li, S., Huang, S., 2006. CO₂ sequestration in depleted oil and gas reservoirs—caprock characterization and storage capacity. *Energy Convers. Manag.* 47 (11–12), 1372–1382.
- Lima, E.F. De, Waichel, B.L., Rossetti, L.D.M.M., Viana, A.R., Scherer, C.M., Bueno, G.V., Dutra, G. 2012. Morphological and petrographic patterns of the pahoehoe and “a”ā flows of the Serra Geral Formation in the Torres Syncline (Rio Grande do Sul state, Brazil). *Brazilian Journal.* 42, 744–753. doi:10.5327/Z0375-75362012000400007
- Lockwood, J.P. & LIPman, P.W. 1980. Recovery of datable charcoal from beneath young lava flows-lessons from Hawaii. *Bulletin Volcanologique*, 43(3): 609-615.
- Lyle, P. 2000. The eruption environment of multi-tiered columnar basalt lava flows. *Journal of the Geological Society*, London 147, 714–22.

Ma, Z.Z., Xie, Y.F., Geng, C.B., 2011. Petroleum geology and analysis on favorable exploration targets of Campos Basin, Brazil. *J. Jilin Univ. (Earth Sci. Ed.)* 41 (5), 1389e1396 (in Chinese).

Macdonald, G.A. 1953. *Pahoehoe*, aa, and block lava. *American Journal of Science*, 251:169-191.

Machado, F., Rocha-Júnior, E.R.V., Marques, L.S., Nardy, A.J.R., 2015. Volcanological aspects of the northwest region of Paraná continental flood basalts (Brazil). *Solid Earth* 6, 227–241. <https://doi.org/10.5194/se-6-227-2015>.

Managave, S. 2000. *The geology around Kurundwad*. Unpubl. M.Sc. Dissertation, University of Pune, 104 p.

Mantovani, M.S.M, Atalla, L., Civetta, L., De Sousa, M.A., Innocenti, F., Marques, L.S. 1985. Trace element and strontium isotope constraints on the origin and evolution of Paraná continental flood basalts of Santa Catarina State, southern Brazil. *Journal of Petrology*, 26: 187-209.

Martí, J., GropPELLI, G., Silveira, A.B. 2018. Volcanic stratigraphy: A review. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 357, 2018, Pages 68-91, ISSN 0377-0273, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.04.006>.

McCarthy, K. Niemann, M. Palmowski, D. Peters, K. Stankiewicz, A. 2011. Basic petroleum geochemistry for source rock evaluation. *Oilfield Review*, v. 23, n. 2, p. 32-43.

McPhie, J., Doyle, M. & Allen, R. 1993. *Volcanic textures: a guide to the interpretation of textures in volcanic rocks*. Centre for Ore Deposit and Exploration Studies. University of Tasmania.

Meucci, M.C. 2022. *Estratigrafia e padrões de porosidade das rochas vulcânicas da região da Cachoeira da Mulada, Caxias do Sul, RS*. Porto Alegre, 110p. Monografia de Conclusão de Curso, Curso de Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Miall, A. D. 1977 *Lithofacies types and vertical profile models in braided river deposits: a summary*.

Michel-Levy, A.1890. Compte rendu de l'excursion du 16 septembre a Gergovie et Veyre-Monton. *Bull Soc Geol France* 18 : 891±897

Milani, E.J., Henrique, J., Melo, G. De, Souza, P.A. De, Fernandes, L.A., França, A.B., 2007. Bacia do Paraná. *Bol. Geociências da Petrobras* 15, 265–287.

Millett, J.M., Hole, M.J., Jolley, D.W., 2014. A fresh approach to ditch cutting analysis as an aid to exploration in areas affected by large igneous province (LIP) volcanism. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.* 397, 193–207. doi:10.1144/SP397.2

Miranda, F.S. Vettorazzi, A.L. Cunha, P.R.C. Aragão, F.B. Michelon, D. Caldeira, J.L. Porsche, E. Martins, C. Ribeiro, R.B. Vilela, A.F. Corrêa, J.R. Silveira, L.S. Andreola, K. 2018. Atypical igneous-sedimentary petroleum systems of the Parnaíba Basin, Brazil: seismic, well logs and cores. *Geological Society, London, Special Publications*, v. 472, n. 1, p. 341-360.

Mizusaki, A.M.P., Filho, A.T., Valença, J., 1988. Volcano sedimentary sequence of Neocomian age in Campos basin (Brazil). *Rev. Brasileira Geociências* 18 (3), 247-251.

Nelson, C.E., Jerram, D.A., Hobbs, R.W., 2009. Flood basalt facies from borehole data: implications for prospectivity and volcanology in volcanic rifted margins. *Pet. Geosci.* 15, 313–324. <https://doi.org/10.1144/1354-079309-842>

Ólavsdóttir, J., Andersen, M.S., Boldreel, L.O. 2015. Reservoir quality of intrabasalt volcanoclastic units onshore Faroe Islands, North Atlantic Igneous Province, northeast Atlantic. *AAPG Bulletin*; 99 (3): 467–497. doi: <https://doi.org/10.1306/08061412084>

Pasqualon, N.G. 2017. *Estratigrafia, petrologia e padrões de porosidade dos depósitos do Vulcão do Paredão, Ilha da Trindade, Brasil*. Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia). – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2017.

Peate, D. 1997. The Paraná-Etendeka Province. Large Igneous Prov. Cont. Ocean. Planet. *Flood Volcanism*, 100, pp. 217-245

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. *Bull. Volcanol.* 55, 119–139. <https://doi.org/10.1007/BF00301125>

Petrelli, M., Poli, G., Perugini, D., Peccerillo, A., 2005. PetroGraph: A new software to visualize, model, and present geochemical data in igneous petrology, *Geochemistry Geophysics Geosystems* 6.

Petry, K., Almeida, D.P.M., Zeffass, H., 2005. O vulcanismo Serra Geral em Torres, Rio Grande do Sul, Brasil: empilhamento estratigráfico local e feições de interação vulcano-sedimentar. *Gaea* 1 (1), 36–47.

Petry, K., Jerram, D.A., de Almeida, D. del P.M., Zeffass, H., 2007. Volcanic-sedimentary features in the Serra Geral Fm., Paraná Basin, southern Brazil: Examples of dynamic lava-sediment interactions in an arid setting. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 159, 313–325. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2006.06.017>

Piccirillo, E.M., Melfi, A.J. 1988. The Mesozoic Flood Volcanism from the Paraná Basin (Brazil): Petrogenetic and Geophysical Aspects. Universidade de São Paulo, São Paulo.

Pierre, T.D.S. 2004. *Desenvolvimento de métodos analíticos para determinação de metais traço em álcool combustível e gasolina por espectrometrias de absorção*

atômica e de massa com plasma indutivamente acoplado. Florianópolis, 124p. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina.

Pinkerton, H., Sparks, R.S.J., 1976. The 1975 sub-terminal lavas, Mount Etna: a case history of the formation of a compound lava field. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 1 (2), 167–182.

Planke, S., Bellwald, B., Millett, J., Planke, E.E., Zastrozhnov, D., Carlevaris, P., Jamtveit, B., Rosenqvist, M., Jerram, D., Schmid, D.W., Berndt, C., Kjøllhamar, B., Myklebust, R., 2021. Permanent carbon sequestration potential in offshore basalt sequences on the NW European continental margins. In: *European Association of Geoscientists and Engineers, Conference Proceedings*, 82nd EAGE Annual Conference and Exhibition, Amsterdam, Netherlands.

Ren, K., Zhao, J., Liu, Q., Zhao, J., 2020. Hydrocarbons in igneous rock of Brazil: a review. *Petrol. Res.* 5 (3), 265–275. <https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2020.06.001>.

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, parana-etendeka igneous province in southern Brazil: towards a formal stratigraphical framework. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 355, 2018, Pages 98-114, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.05.008>.

Rossetti, L., Lima, E.F., Waichel, B.L., Scherer, C.M., Barreto, C.J. 2014. Stratigraphical framework of basaltic lavas in Torres syncline main valley, southern Parana-Etendeka Volcanic Province. *J. S. Am. Earth Sci.*, 56, pp. 409-421, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2014.09.025>

Rossetti, L.M.M. 2018. *Litoestratigrafia e geoquímica da Província Ígnea do Paraná-Etendeka e caracterização dos aspectos petrofísicos de sequências vulcano-sedimentares*. Porto Alegre, 239p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Rossetti, M.L., Healy, D., Hole, M.J., Millett, J.M., Lima, E.F., Jerram, D.A., Rossetti, M.M. 2019. Evaluating petrophysical properties of volcano-sedimentary sequences: A case study in the Paraná-Etendeka Large Igneous Province. *Marine and Petroleum Geology*, Volume 102, 2019, Pages 638-656, <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.01.028>.

Ryan, M.P. & Sammis, C.G. 1978. Cyclic fracture mechanisms in cooling basalts. *Geological Society of America Bulletin*, 89, 1295-1308.

Schutter, S.R. 2003. Hydrocarbon occurrence and exploration in and around igneous rocks. *Geological Society, London, Special Publications*, 2003, Vol. 214, Pages 7-33, doi: 10.1144/GSL.SP2003.214.01.02

Scrope, G. P.1858. *The geology and extinct volcanoes of Central France*. Murray, London

- Self S., Thordarson T., Keszthelyi L. 1997. Emplacement of continental flood basalt lava flows. In: Mahoney J.J., Coffin M. (eds) *Large igneous provinces, Geophysical Monograph series N° 100*, AGU, Washington DC, pp 381–410
- Self, S., Thordarson, T., Keszthelyi, L., Walker, G.P.L., Hon, K., Murphy, M.T., Long, P., Finnemore, S., 1996. A new model for the emplacement of Columbia River basalts as large, inflated Pahoehoe Lava Flow Fields. *Geophys. Res. Lett.* 23, 2689–2692. doi:10.1029/96GL02450
- Selly, R.C. Sonnenberg, S.A. 2022. *Elements of Petroleum Geology*. Academic Press; 4th ed, 608 pg.
- Skilling, I.P., White, J.D.L., McPhie, J., 2002. Peperite: A review of magma-sediment mingling. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 114, 1–17. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(01\)00278-5](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(01)00278-5)
- Sneddon, J., and Vincent, M. D. 2008. ICP-OES and ICP-MS for the determination of metals: Application to oysters. *Anal. Lett.* 41(8): 1291–1303.
- Sruoga, P., Rubinstein, N. 2007. Processes controlling porosity and permeability in volcanic reservoirs from the Austral and Neuquén basins, Argentina. *AAPG Bull.*, 91 (1), 115-129.
- Statistical Review of World Energy*; BP p.l.c.; 1 St James's Square; London SW1Y 4PD, UK.
- Thordarson, T. 2006. Emplacement of mafic lava flows: role of insulated transport and inflation. *Geophysical Research Abstracts of European Geosciences Union*, 8: 10124.
- Thordarson, T., Self, S., 1998. The Roza Member, Columbia River Basalt Group: A gigantic pahoehoe lava flow field formed by endogenous processes? *J. Geophys. Res. Solid Earth* 103, 27411– 27445. doi:10.1029/98JB01355
- Turnadge C., Mallants D., Peeters L. 2018. Overview of aquitard and geological fault simulation approaches in regional scale assessments of coal seam gas extraction impacts, prepared by the Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), Canberra.
- Vieira de Luca, P.H., Carballo, J., Filgueiras, A., Pimentel, G., Esteban, M., Tritlla, J., Villacorta, R., 2015. What is the role of volcanic rocks in the Brazilian pre-salt?. In: *77th EAGE Conference & Exhibition (Madrid)*.
- Waichel, B., Scherer, C., Frank, H., 2008. Basaltic lava flows covering active aeolian dunes in the Paraná Basin in southern Brazil: Features and emplacement aspects. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 171, 59–72. doi:10.1016/j.jvolgeores.2007.11.004
- Waichel, B.L., de Lima, E.F., Lubachesky, R., Sommer, C.A., 2006. Pahoehoe flows from the central Paraná Continental Flood Basalts. *Bull. Volcanol.* 68, 599–610. doi:10.1007/s00445-005-0034-5

- Waichel, B.L., de Lima, E.F., Sommer, C.A., Lubachesky, R., 2007. Peperite formed by lava flows over sediments: an example from the Central Parana Continental Flood Basalts, Brazil. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 159, 343–354. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2006.07.009>
- Waichel, B.L., de Lima, E.F., Viana, A.R., Scherer, C.M., Bueno, G.V., Dutra, G. 2012. Stratigraphy and volcanic facies architecture of the Torres Syncline, Southern Brazil, and its role in understanding the Parana–Etendeka Continental Flood Basalt Province. *J. Volcanol. Geoth. Res.* 215–216, 74–82. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2011.12.004>.
- Walker, G.P.L., 1971. Compound and simple lava flows and flood basalts. *Bull. Volcanol.* 35, 579–590. [doi:10.1007/BF02596829](https://doi.org/10.1007/BF02596829)
- Wang, P., Chen; Cretaceous volcanic reservoirs and their exploration in the Songliao Basin, northeast China. *AAPG Bulletin* 2015; 99 (3): 499–523. [doi: https://doi.org/10.1306/09041413095](https://doi.org/10.1306/09041413095)
- White, I.C. 1908. Relatório Final da Comissão de Estudos das Minas de Carvão de Pedra no Brail. Rio de Janeiro: DNPM, 1988. Parte I; Parte II, p. 301-617. (ed. Fac-similar).
- White, J.D.L., McPhie, J., Skilling, I.P. 2000. Peperite: a useful genetic term. *Bulletin of Volcanology*, 62: 65-66.
- Zerfass, H., Anjos-Zerfass, G.D.S.D., Ruban, D.A., Yashalova, N.N., 2020. Basalt hills of Torres, southern Brazil: World-class geology, its heritage value, and tourism perspectives. *J. S. Am. Earth Sci.* 97, 102424.

APÊNDICES

Apêndice A

Tabela com informações dos pontos, coordenadas, cota de altitude, amostra, lâmina delgada e análise petrofísica.

Ponto	Coordenada (mE)	Coordenada (mN)	Cota (m)	Amostra	Lâmina	Geoquímica	Petrofísica
CBM-02-ST-RS	574602.28	6697525.53	8	X	X	X	X
23-IM-01	578910.00	6705531.00	108	A até B	-	-	
23-IM-02	543432.89	6699163.43	96	A até F	-	-	X
23-IM-03	541838.54	6713170.00	166	-	-	-	
23-IM-04	555646.97	6727393.14	135	A	-	-	X
23-IM-05	555613.00	6726540.00	155	A	-	-	-
23-IM-06	551234.66	6728107.91	270	A	-	-	-
23-IM-07	550380.65	6729470.87	280	-	-	-	-
23-IM-08	583286.78	6722931.14	220	A	-	-	X
23-IM-09	623238.19	6752361.37	10	-	-	-	-
23-IM-10	623249.92	6752047.69	2	-	-	-	-
23-IM-11	623203.65	6751891.03	3	-	-	-	-
23-IM-12	623176.51	6751839.32	3	-	-	-	-
23-IM-13	623135.46	6751752.24	5	-	-	-	-
23-IM-14	623001.88	6751648.69	4	-	-	-	-
23-IM-15	622993.13	6751701.54	4	-	-	-	-
23-IM-16	622795.05	6751673.71	6	-	-	-	-
23-IM-17	622859.73	6751708.07	5	-	-	-	-
23-IM-18	623551.21	6753130.40	6	-	-	-	-
23-IM-19	623526.91	6753076.71	7	-	-	-	-
23-IM-20	623480.52	6753004.28	6	-	-	-	-

Apêndice B

Descrição dos pontos descritos em campo e seções colunares.

Ponto 23-IM-01

Pedreira Morro Alto

578910.00 mE

6705531.00 mN

Cota: 108 m

Unidade: Fm. Torres

Litofácies: Bm, Ba, Bvl, Bpi

Descrição de Campo: Jazida de extração de brita em duas cavas. Na cava inferior, observa-se um derrame formado pelas litofácies Ba e Bm. Na cava superior

Classificação: Basalto maciço, Basalto amigdaloidal, Basalto vesiculado em *layering* e Basalto com *pipe vesicles*

Amostra: A – dique; B – núcleo de derrame *pahoehoe*

Ponto 23-IM-02

Pedreira São Joaquim

543432.89 mE

6699163.43 mN

Cota: 96 m

Unidade: Fm. Torres

Litofácies: Bdj, Bm e Bam

Descrição de Campo: Intrusão básica, basalto/diabásio com disjunção colunar, com 10-12 m de altura e 30 m de comprimento. Xenólito arenítico silicificado. Dique básico cortando a soleira. Derrame com núcleo maciço e topo amigdaloidal

Classificação: Basalto com disjunção colunar, Basalto maciço, Basalto amigdaloidal

Amostra: A – intrusão; B – xenólito; C – contato intrusão-xenólito; D – dique; E – núcleo de derrame; F – topo de derrame

Ponto 23-IM-03

Corte de estrada

541838.54 mE

6713170.00 mN

Cota: 166 m

Unidade: Fm. Torres

Litofácies: Bpm

Descrição de Campo: Núcleo de derrame. Rocha com elevado grau de alteração.

Classificação: Basalto porfirítico maciço

Amostra: -

Ponto 23-IM-04

Cascata Chuvisqueiro

555646.97 mE

6727393.14 mN

Cota: 135 m

Unidade: Fm. Torres

Litofácies: Act, Bc, Be, Bm

Descrição de Campo: Base composta por Act. Derrame *pahoehoe* formado na base por Be e no núcleo por Bc e Bm

Classificação: Arenito com cruzada acanalada, Basalto com colunatas, Basalto com entablamento, Basalto maciço

Amostra: A – núcleo de derrame

Ponto 23-IM-05

Cascata Três Quedas

555613.00 mE

6726540.00 mN

Cota: 155 m

Unidade: Fm. Torres

Litofácies: Bc

Descrição de Campo: Núcleo espesso de derrame pahoehoe, colunatas bem desenvolvidas

Classificação: Basalto com colunatas

Amostra: A

Ponto 23-IM-06

Corte de estrada

551234.66 mE

6728107.91 mN

Cota: 270 m

Unidade: Fm. Torres

Litofácies: Bam

Descrição de Campo: Topo de derrame *pahoehoe*. Amígdalas subarredondadas com 0,3 a 0,5 mm.

Classificação: Basalto

Amostra: A

Ponto 23-IM-07

Corte de estrada

550380.65 mE

6729470.87 mN

Cota: 280 m

Unidade: Fm. Torres

Litofácies: Bam

Descrição de Campo: Topo de derrame *pahoehoe*. Amígdalas subarredondadas a alongadas com 0,3 a 1,5 cm.

Classificação: Basalto amigdaloidal

Amostra: -

Ponto 23-IM-08

Cascata do Ressaco

583286.78 mE

6722931.14 mN

Cota: 220 m

Unidade: Fm. Torres

Litofácies: Bm

Descrição de Campo: Núcleo de derrame *pahoehoe*

Classificação: Basalto maciço

Amostra: A

Ponto 23-IM-09

Morro Furnas: Entrada Parque da Guarita

623238.19 mE

6752361.37 mN

Cota: 10 m

Unidade: Fm. Torres

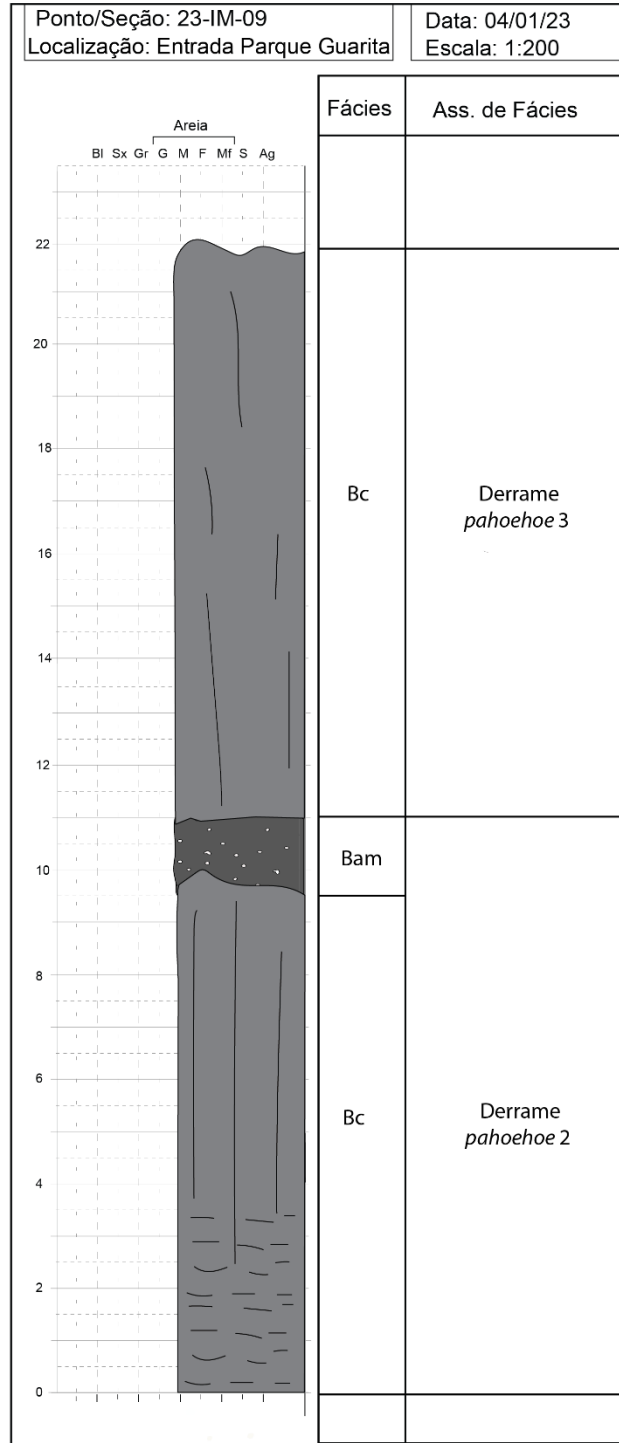
Litofácies: Bc, Bam

Descrição de Campo: dois derrames *pahoehoe*

Classificação: Basalto com colonatas, Basalto amigdaloidal

Amostra: -

Seção:



Ponto 23-IM-10

Morro Furnas: Escada Saltinho

623249.92 mE

6752047.69 mN

Cota: 2 m

Unidade: Fm. Torres

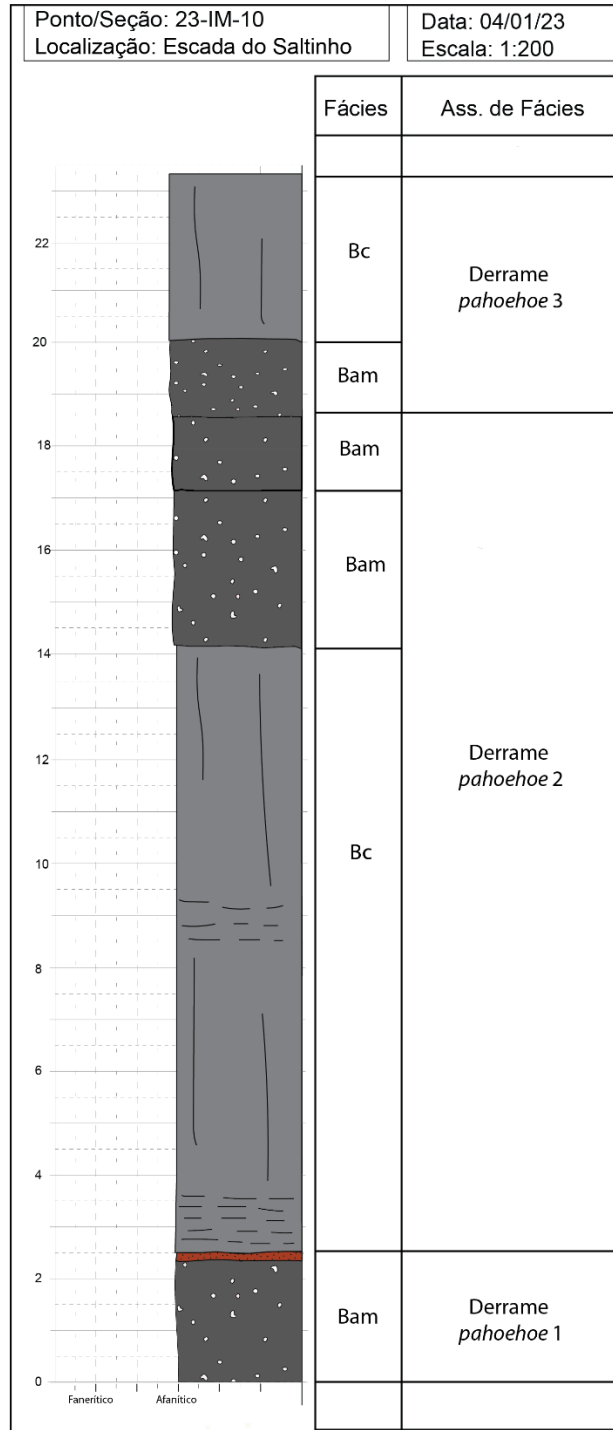
Litofácies: Bam, Bc,

Descrição de Campo: três derrames *pahoehoe*

Classificação: Basalto com colunatas, Basalto amigdaloidal

Amostra: -

Seção:



Ponto 23-IM-11

Morro Furnas: Escada do Balcão e Pesqueiro Feio

623203.65 mE

6751891.03 mN

Cota: 3 m

Unidade: Fm. Torres

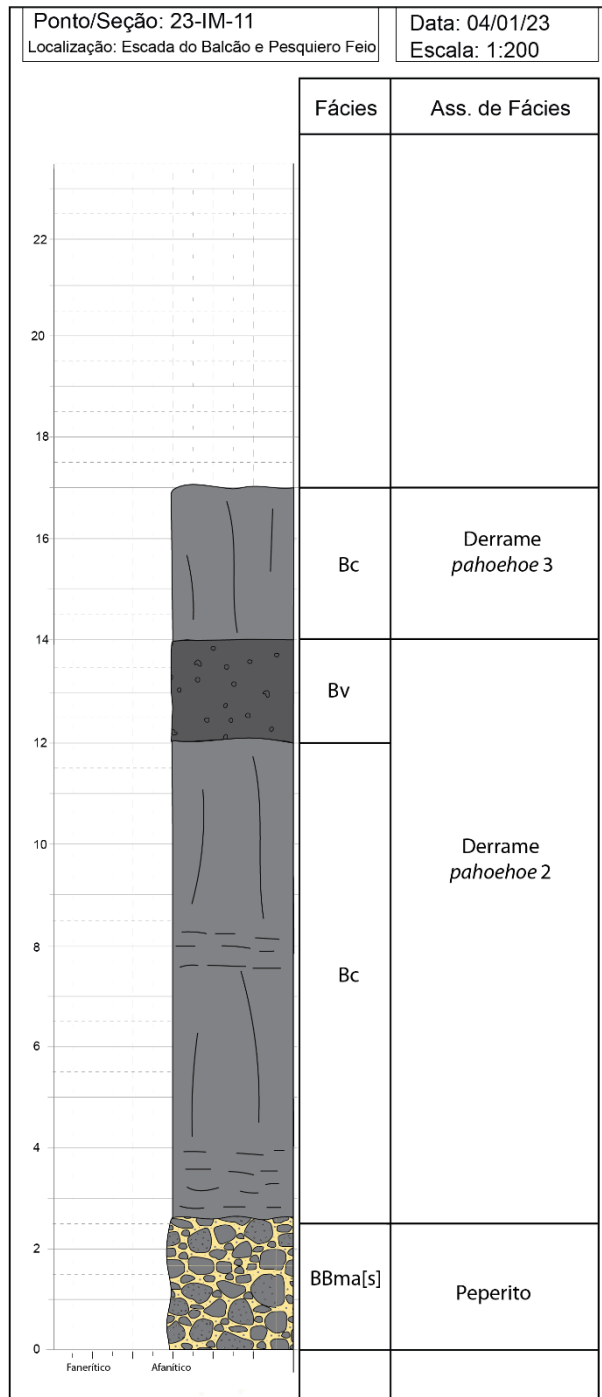
Litofácies: BBma[s], Bc, Bv

Descrição de Campo: uma camada peperítica, dois derrames *pahoehoe*

Classificação: Brecha basáltica com matriz sedimentar superior, Basalto com colunatas, Basalto vesiculado

Amostra: -

Seção:



Ponto 23-IM-12

Morro Furnas: Escada Furninha

623176.51 mE

6751839.32 mN

Cota: 3 m

Unidade: Fm. Torres

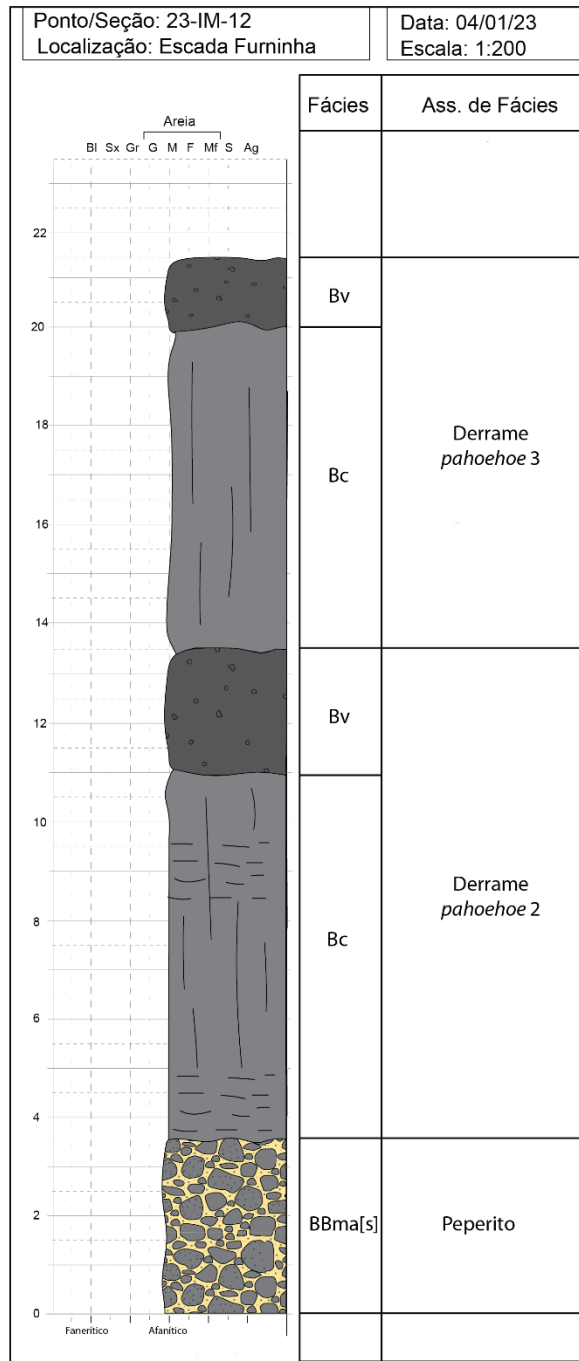
Litofácies: BBma[s], Bc, Bv

Descrição de Campo: uma camada peperítica, dois derrames *pahoehoe*

Classificação: Brecha basáltica com matriz sedimentar superior, Basalto com colunatas, Basalto vesiculado

Amostra: -

Seção:



Ponto 23-IM-13

Morro Furnas: Escada Furna do Diamante

623135.46 mE

6751752.24 mN

Cota: 5 m

Unidade: Fm. Torres

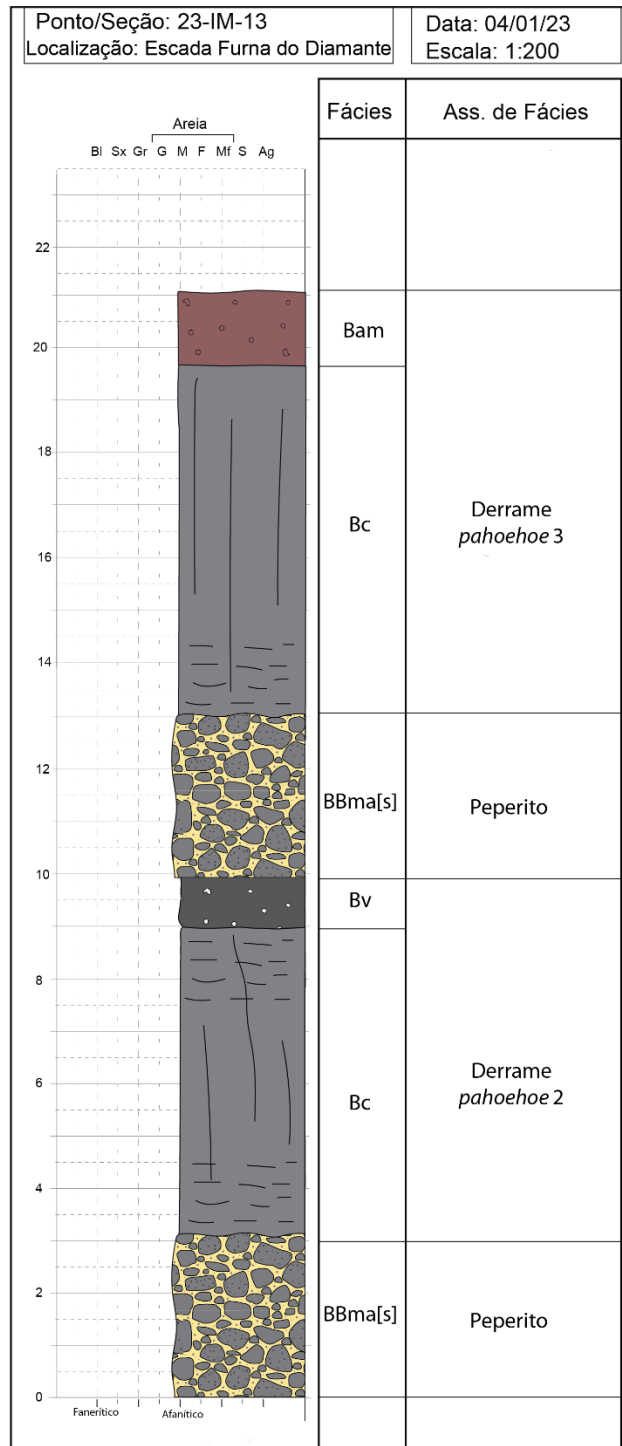
Litofácies: BBma[s], Bc, Bv, Bam

Descrição de Campo: duas camadas peperíticas, dois derrames *pahoehoe*

Classificação: Brecha basáltica com matriz sedimentar superior, Basalto com colunatas, Basalto vesiculado, Basalto amigdaloidal

Amostra: -

Seção:



Ponto 23-IM-14

Morro Furnas: Escada Praia da Guarita

623001.88 mE

6751648.69 mN

Cota: 4 m

Unidade: Fm. Torres

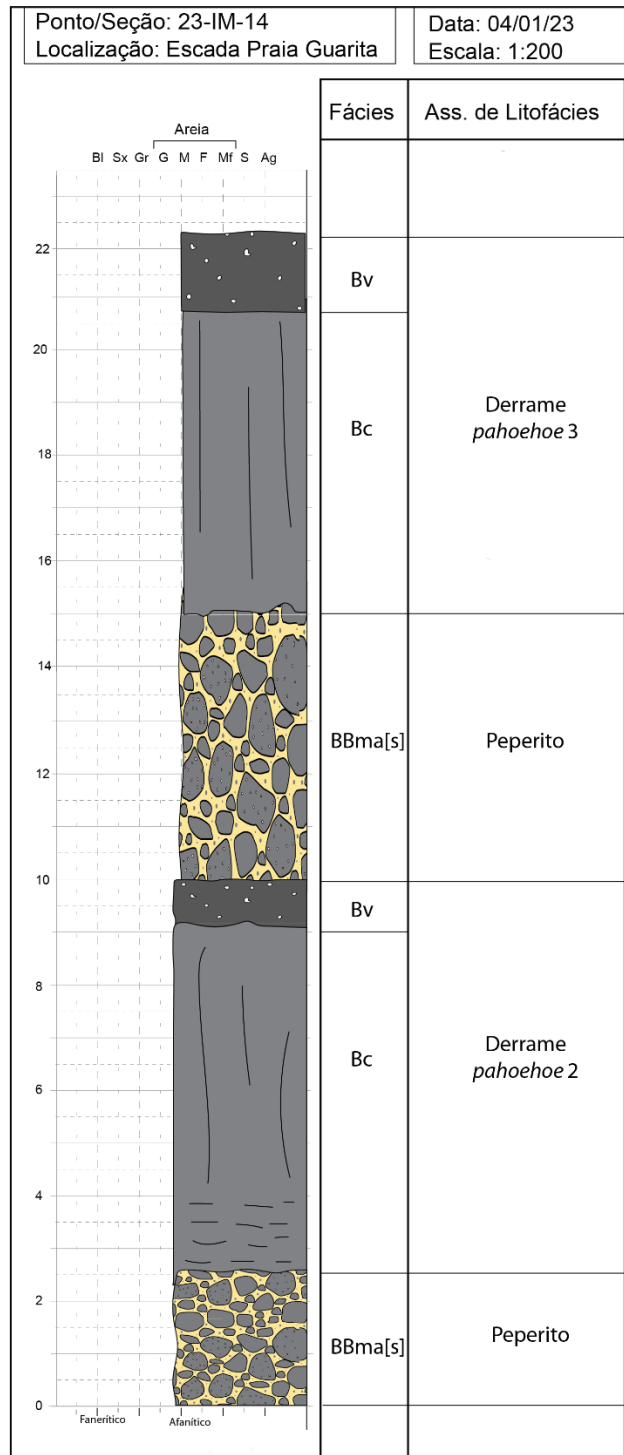
Litofácies: BBma[s], Bc, Bv, Bam

Descrição de Campo: duas camadas peperíticas, dois derrames *pahoehoe*

Classificação: Brecha basáltica com matriz sedimentar superior, Basalto com colunatas, Basalto vesiculado, Basalto amigdaloidal

Amostra: -

Seção:



Ponto 23-IM-15

Morro Furnas: Praia Guarita

622993.13 mE

6751701.54 mN

Cota: 4 m

Unidade: Fm. Torres

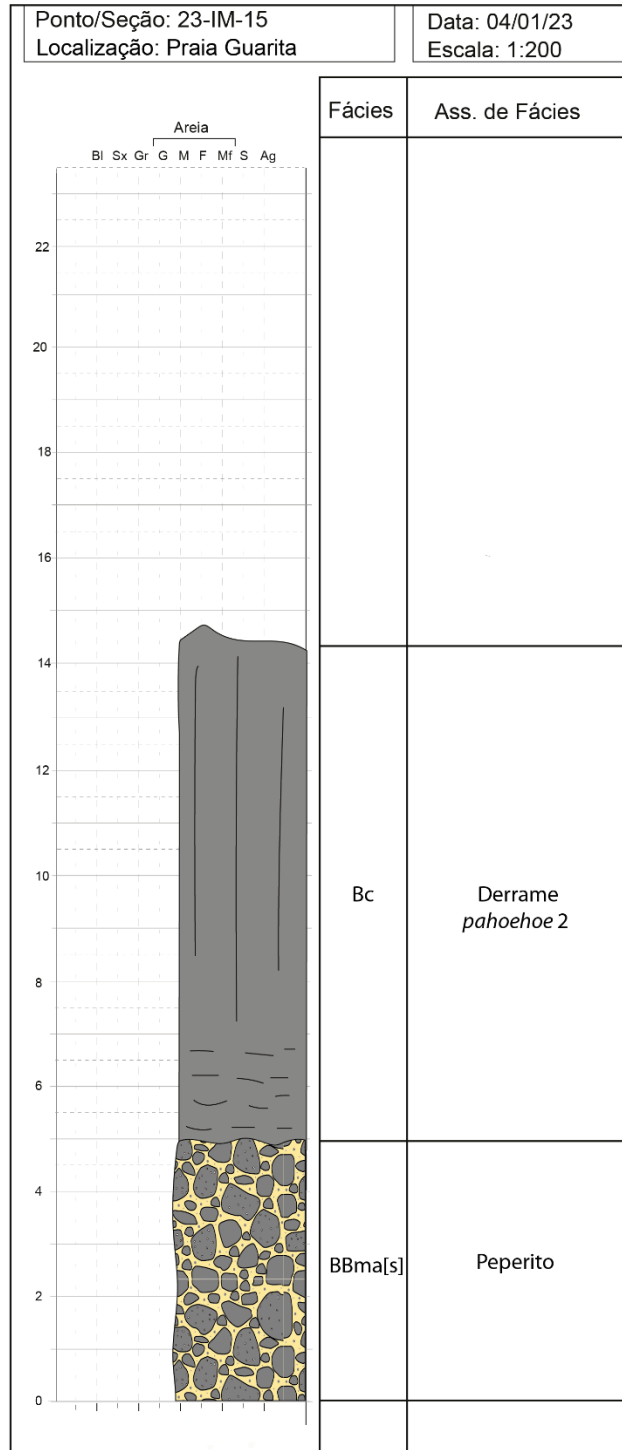
Litofácies: BBma[s], Bc

Descrição de Campo: uma camada peperítica, um derrame *pahoehoe*

Classificação: Brecha basáltica com matriz sedimentar superior, Basalto com colunatas

Amostra: -

Seção:



Ponto 23-IM-16

Torre Sul

622795.05 mE

6751673.71 mN

Cota: 6 m

Unidade: Fm. Torres

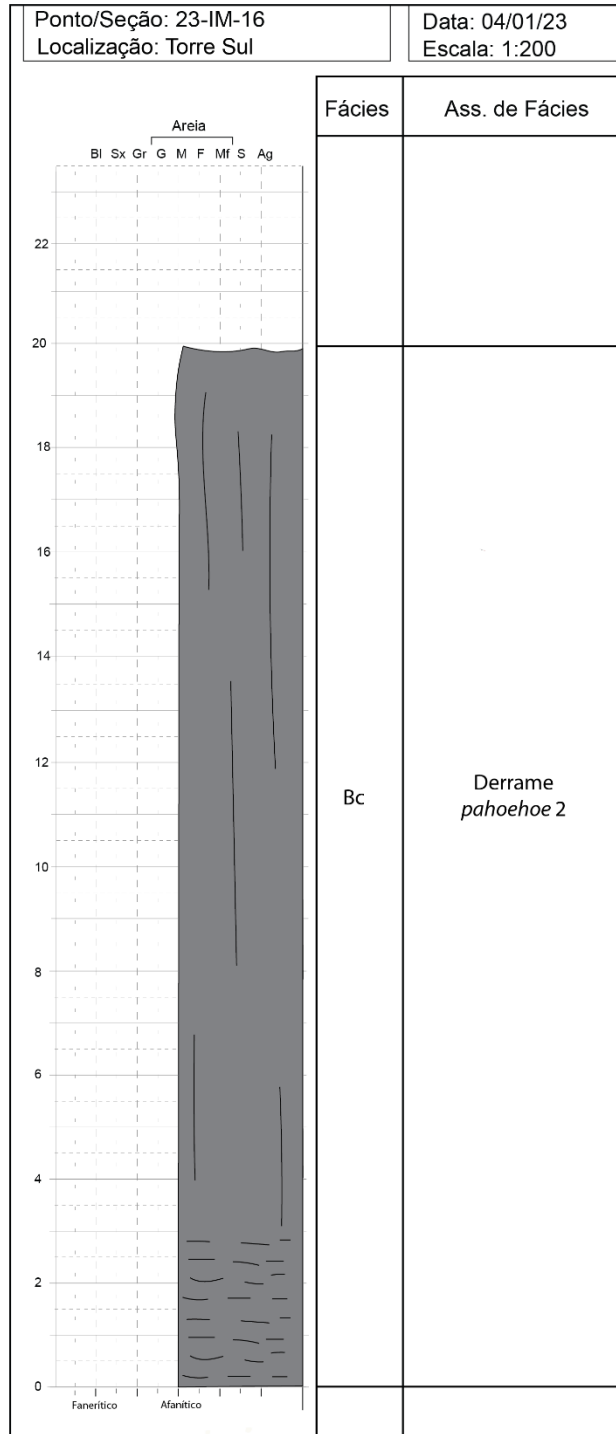
Litofácies: Bc

Descrição de Campo: um derrame *pahoehoe*

Classificação: Basalto com colonatas

Amostra: -

Seção:



Ponto 23-IM-17

Torre Guarita

622859.73 mE

6751708.07 mN

Cota: 5 m

Unidade: Fm. Torres

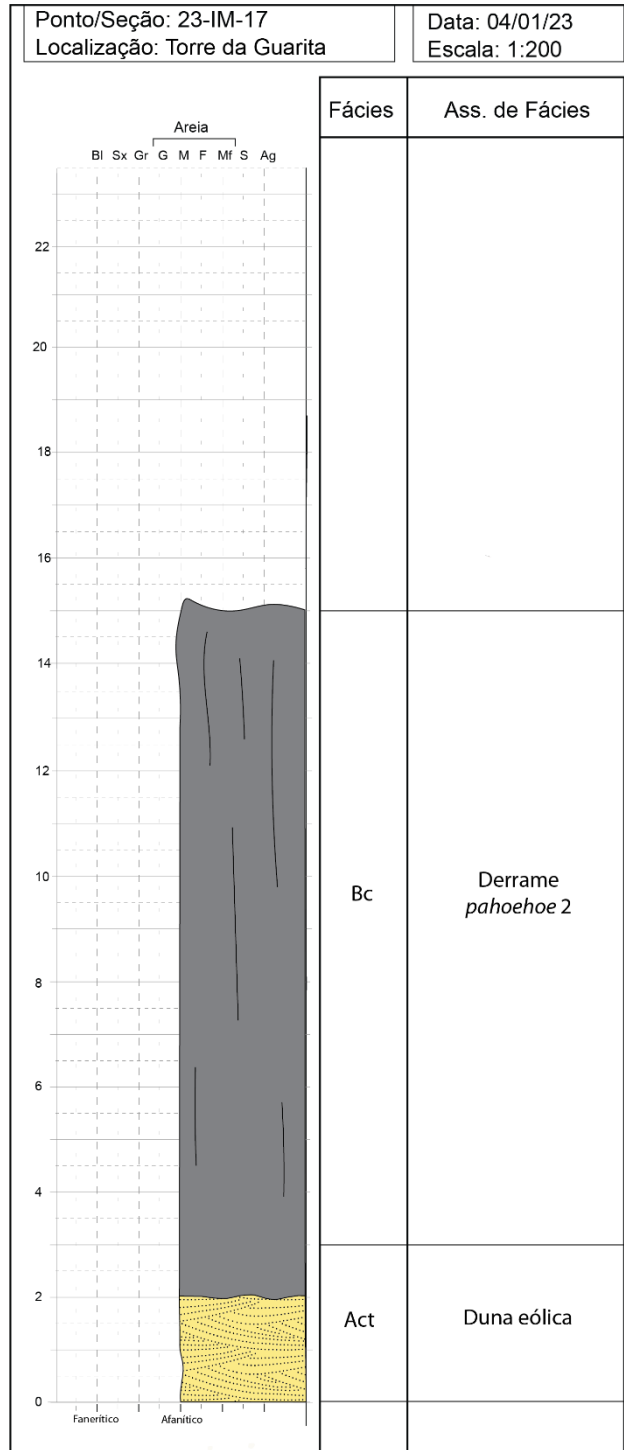
Litofácies: Act, Bc

Descrição de Campo: duna eólica, um derrame *pahoehoe*

Classificação: Arenito com cruzada acanalada, Basalto com colunatas

Amostra: -

Seção:



Ponto 23-IM-18

Morro do Farol
 623551.21 mE
 6753130.40 mN
 Cota: 6 m

Unidade: Fm. Torres

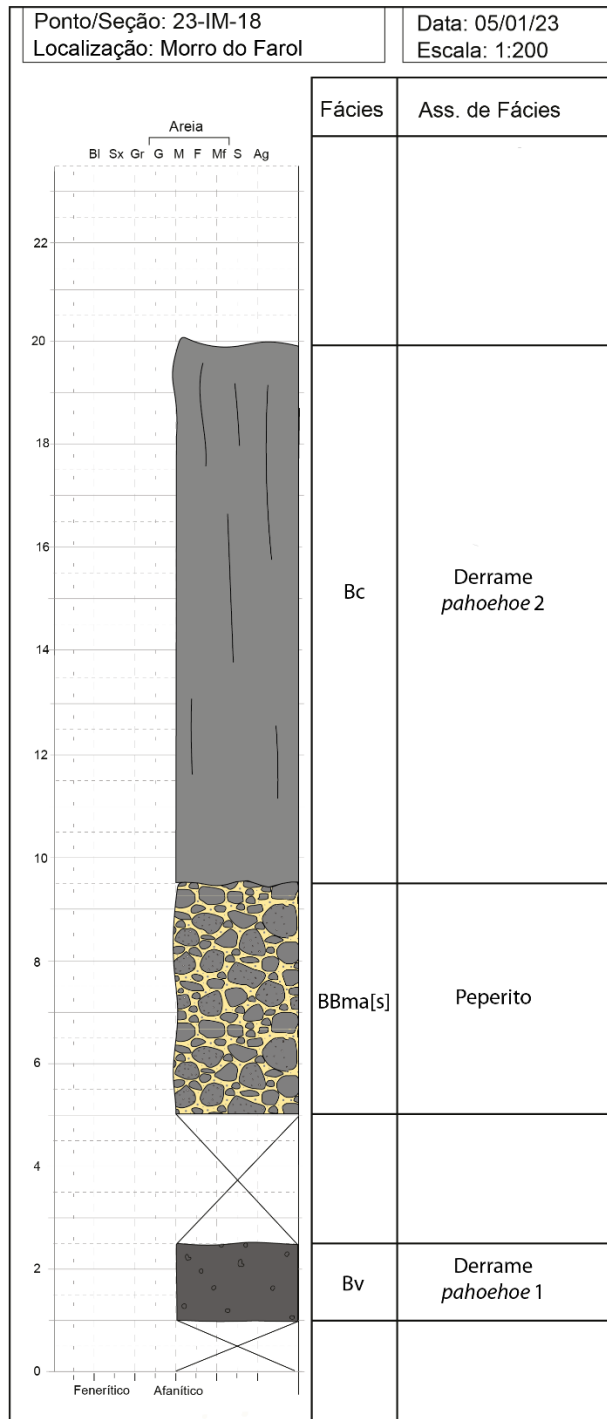
Litofácies: BBma[s], Bc, Bv

Descrição de Campo: uma camada peperítica, dois derrames *pahoehoe*

Classificação: Brecha basáltica com matriz sedimentar superior, Basalto com colunatas, Basalto vesiculado

Amostra: -

Seção:



Ponto 23-IM-19

Morro do Farol
 623526.91 mE
 6753076.71 mN
 Cota: 7 m

Unidade: Fm. Torres

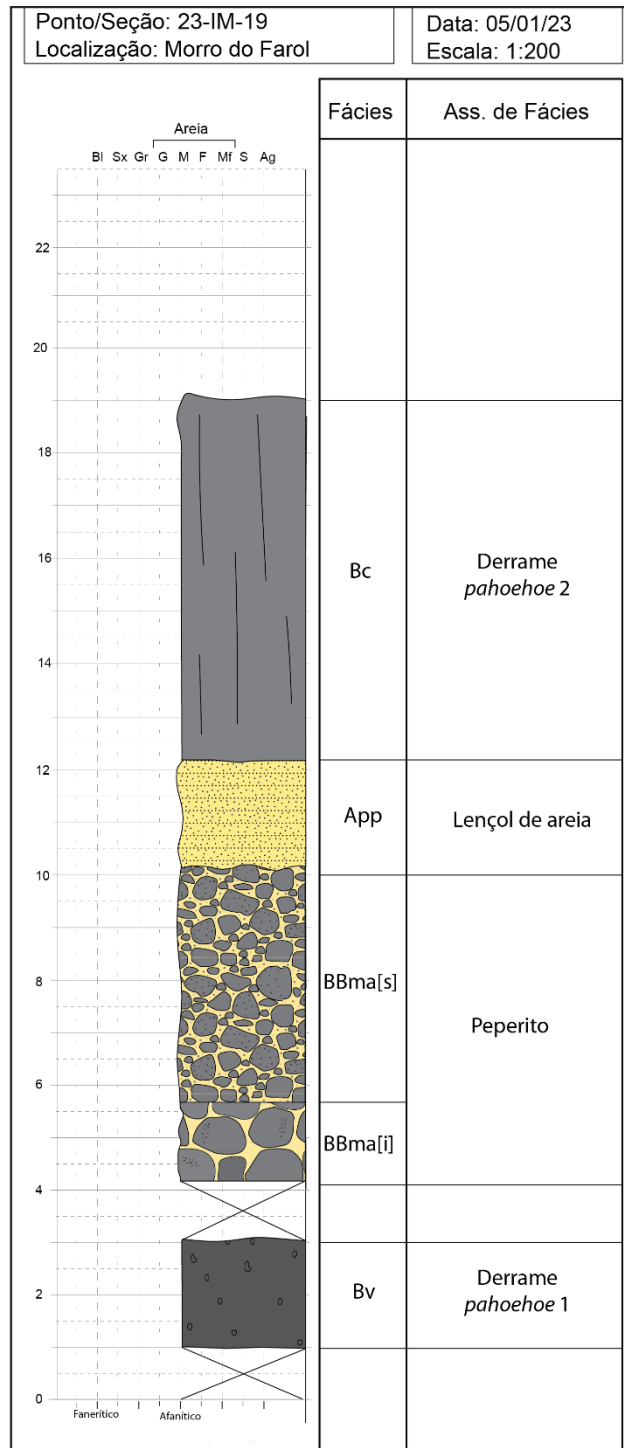
Litofácies: BBma[i], BBma[s], Bc, Bv

Descrição de Campo: uma camada peperítica, dois derrames *pahoehoe*

Classificação: Brecha basáltica com matriz sedimentar inferior e superior, Basalto com colunatas, Basalto vesiculado

Amostra: -

Seção:



Ponto 23-IM-20

Morro do Farol
 623480.52 mE
 6753004.28 mN
 Cota: 6 m

Unidade: Fm. Torres

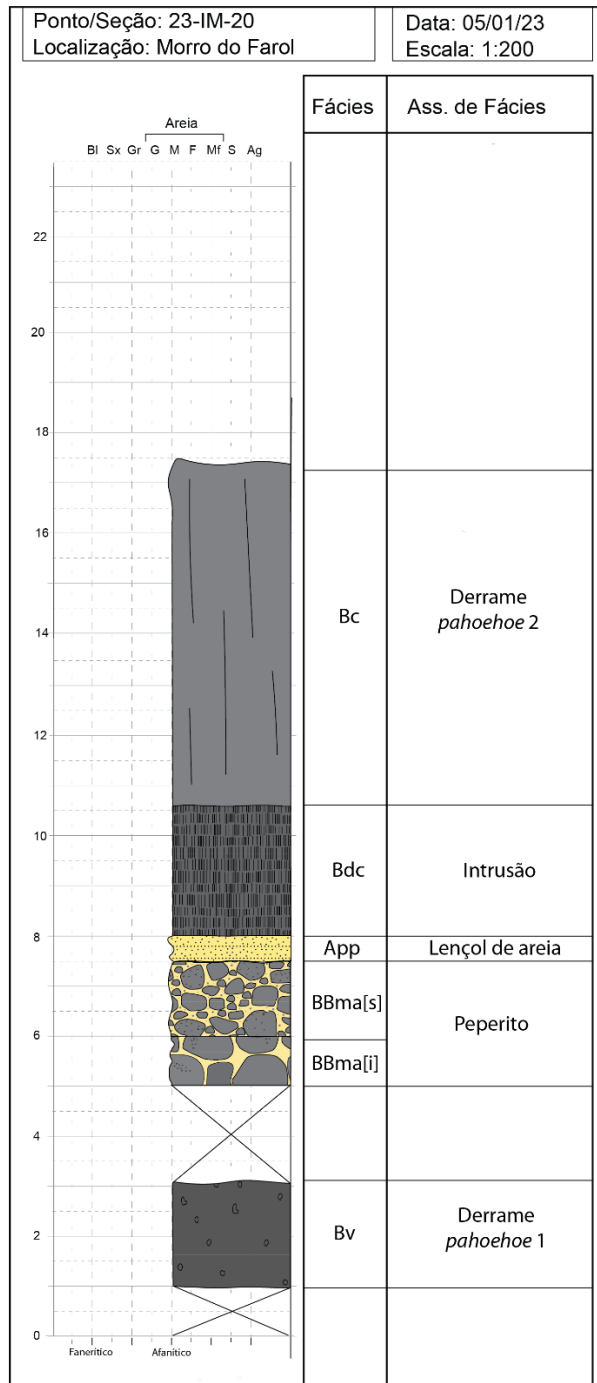
Litofácies: BBma[i], BBma[s], Bc, Bv, Bdj

Descrição de Campo: uma camada peperítica, dois derrames *pahoehoe*

Classificação: Brecha basáltica com matriz sedimentar inferior e superior, Basalto com colunatas, Basalto vesiculado, Basalto com disjunção colunar

Amostra: -

Seção:



Apêndice C

Descrição das lâminas petrográficas.

Identificação

Identificação da lâmina: OS 236,55 (Bpv)
 Nome do poço/afloramento: Testemunho
 Unidade: Grupo Serra Geral
 Bloco/Província: Bacia do Paraná
 País: Brasil
 Estado: RS

Sumário

Porção basal de derrame *pahoehoe*. Basalto fanerítico muito fino a fino, amigdaloidal, composto por plagioclásio e ortopiroxênio. Apresenta textura glomeroporfírica e porfírica de plagioclásio, subordinadamente de ortopiroxênio. Vesículas subarredondadas e fraturas (0,2 mm de espessura) preenchidas por zeolitas, quartzo e carbonato.

Características Microscópicas Texturais

Estrutura(s): Amigdaloidal
Cristalinidade: Hipocristalina
Granularidade: Fanerítica
Tamanho relativo dos cristais: Inequigranularidade
Intervalo de tamanho de cristal: Muito fina a Médio

Forma dos cristais/fragmentos

Perfeição do formato cristalino: Hipidiomórfica
 Forma tridimensional dos cristais: Prismática, Tabular

Texturas(s)

Porfírica e Glomeroporfírica (pl, opx, cpx), Intersertal, Amigdaloidal, Peneira (localizada)

Composição

Plagioclásio cálcico, prismático, como constituinte primário, argilização, 42%
 Ortopiroxênio, prismático e esquelético, como constituinte primário, 23%
 Clinopiroxênio, como constituinte primário, 12%
 Zeolita indiferenciada, anédrica, preenchendo vesícula subarredondada e fraturas, 7%
 Quartzo, anédrico, preenchendo vesícula subarredondada 2%
 Carbonato, anédrico, preenchendo vesícula subarredondada 1%
 Óxido indiferenciado, anédrico a subédrico, 3%
 Vidro máfico (taquilito), maciço, 10%

Fenocristais 15%

Matriz 75%

Amígdalas/Fraturas 10%

Porosidade 0,2% (Secundária: Intra-cristal e *Drusy*)

Classificação - Streckeisen – Vulcânica Original: Basalto

Q: 0,0

A: 0,0

P: 100,0

F: 0,0

Identificação

Identificação da lâmina: OS 234,6 (Bpm)
 Nome do poço/afloramento: Testemunho
 Unidade: Grupo Serra Geral
 Bloco/Província: Bacia do Paraná
 País: Brasil
 Estado: RS

Sumário

Núcleo de derrame *pahoehoe*. Basalto fanerítico fino a médio, maciço, composto por plagioclásio, orto e clinopiroxênios. Apresenta textura porfírica e glomeroporfírica de plagioclásio e, subordinadamente de piroxênios. Textura subofítica localizada. Amígdalas subarredondadas preenchidas por zeolita são escassas.

Características Microscópicas Texturais

Estrutura(s): Maciço
Cristalinidade: Holocristalina
Granularidade: Fanerítica
Tamanho relativo dos cristais: Inequigranularidade
Intervalo de tamanho de cristal: Fina a média

Forma dos cristais/fragmentos

Perfeição do formato cristalino: Hipidiomórfica
 Forma tridimensional dos cristais: Prismática, Tabular

Texturas(s)

Porfírica e Glomeroporfírica (pl, opx, cpx), Amigdaloidal, Subofítica (pl-cpx), Intragranular (cpx), Coronítica (opx, cpx)

Composição

Plagioclásio cálcico, prismático, como constituinte primário, 58%
 Ortopiroxênio, prismático, como constituinte primário, 19%
 Clinopiroxênio, prismático, como constituinte primário, 13%
 Zeolita indiferenciada, anédrica, preenchendo vesículas subarredondadas, 5%
 Óxido indiferenciado, anédrico a subédrico, 4%
 Iddingsita, anédrica, 1%

Fenocristais 10%
 Matriz 85%
 Amígdalas/Fraturas 5%
 Porosidade 0,2 % (Secundária: Intra-cristal)

Classificação - Streckeisen – Vulcânica Original: Basalto

Q: 0,0
 A: 0,0
 P: 100,0
 F: 0,0

Identificação

Identificação da lâmina: OS 216,65 (Bpm)
 Nome do poço/afloramento: Testemunho
 Unidade: Grupo Serra Geral
 Bloco/Província: Bacia do Paraná
 País: Brasil
 Estado: RS

Sumário

Núcleo de derrame *pahoehoe*. Basalto fanerítico fino a médio, maciço, composto por plagioclásico, orto e clinopiroxênios. Apresenta textura porfírica e glomeroporfírica de plagioclásio e, subordinadamente de piroxênios. Textura subofítica localizada. Amígdalas subarredondas preenchidas por zeolita são escassas.

Características Microscópicas Texturais

Estrutura(s): Maciço
Cristalinidade: Hipocristalina
Granularidade: Fanerítica
Tamanho relativo dos cristais: Inequigranularidade
Intervalo de tamanho de cristal: Muito fina a fina

Forma dos cristais/fragmentos

Perfeição do formato cristalino: Hipidiomórfica
 Forma tridimensional dos cristais: Prismática, Tabular

Texturas(s)

Porfírica e Glomeroporfírica (pl, opx, cpx), Amigdaloidal, Subofítica (pl, cpx), Coronítica (opx, cpx), Intersertal

Composição

Plagioclásio cálcico, prismático, como constituinte primário, 48%
 Ortopiroxênio, prismático, como constituinte primário, 17%
 Clinopiroxênio, prismático, como constituinte primário, 11%
 Zeolita indiferenciada, anédrica, preenchendo vesícula subarredonda 3%
 Calcedônia, fibrosa, preenchendo vesícula subarredonda 1%
 Vidro máfico (taquilito), maciço, 18%
 Óxido indiferenciado, anédrico a subédrico, 2%

Fenocristais 8%

Matriz 88%

Amígdalas/Fraturas 4%

Porosidade 0,1% (Secundária: Intra-cristal)

Classificação - Streckeisen – Vulcânica Original: Basalto

Q: 0,0

A: 0,0

P: 100,0

F: 0,0

Identificação

Identificação da lâmina: OS-212,25 (Bps)
 Nome do poço/afloramento: Testemunho
 Unidade: Grupo Serra Geral
 Bloco/Província: Bacia do Paraná
 País: Brasil
 Estado: RS

Sumário

Topo de derrame *pahoehoe*. Basalto afanítico, amigdaloidal, composto por plagioclásio e vidro máfico. Apresenta textura glomeroporfírica e porfírica marcada pelos fenocristais de plagioclásio. Vesículas subarredondadas e alongadas variando de 0,1 a 0,5 mm de diâmetro, preenchidas por zeolitas. Fraturas descontínuas (espessura de 0,1 mm) sem preenchimento secundário.

Características Microscópicas Texturais

Estrutura(s): Amigdaloidal
Cristalinidade: Hipoihialino
Granularidade: Afanítico
Tamanho relativo dos cristais: Inequigranularidade
Intervalo de tamanho de cristal: Muito fino a Médio

Forma dos cristais/fragmentos

Perfeição do formato cristalino: Hipidiomórfico a Idiomórfico
 Forma tridimensional dos cristais: Prismático, tabular

Texturas(s)

Porfírica e glomeroporfírica (pl, opx), Amigdaloidal, Vítreas, Esqueletal (opx)

Composição

Vidro máfico (sideromelano), maciço, 52%
 Plagioclásio cálcico, prismático, como constituinte primário, argilização, 24%
 Ortopiroxênio, prismático, como constituinte primário, 15%
 Zeolita, anédrica, preenchendo vesículas subarredondadas e alongadas, 8%
 Calcedônia, em fibras, preenchendo vesículas subarredondadas e alongadas, 1%

Fenocristais 14%

Matriz 75%

Amígdalas/Fraturas 11%

Porosidade 0,5% (Secundária: 0,1 - Intra-cristal; 0,4 - Fratura)

Classificação - Streckeisen – Vulcânica Original: Basalto

Q: 0,0

A: 0,0

P: 100,0

F: 0,0

Identificação

Identificação da lâmina: OS-212,25 (Bpv)
 Nome do poço/afloramento: Testemunho
 Unidade: Grupo Serra Geral
 Bloco/Província: Bacia do Paraná
 País: Brasil
 Estado: RS

Sumário

Base de derrame *pahoehoe*. Basalto fanerítico muito fino a fino, amigdaloidal, composto por plagioclásio e ortopiroxênio. Apresenta textura glomeroporfirítica e porfirítica de plagioclásio, subordinadamente de ortopiroxênio. Vesículas subarredondadas e fraturas (0,2 mm de espessura) preenchidas por zeolita.

Características Microscópicas Texturais

Estrutura(s): Amigdaloidal
Cristalinidade: Hipocristalino
Granularidade: Afanítico
Tamanho relativo dos cristais: Inequigranularidade
Intervalo de tamanho de cristal: Muito fino a fino

Forma dos cristais/fragmentos

Perfeição do formato cristalino: Hipidiomórfico a Idiomórfico
 Forma tridimensional dos cristais: Prismático, tabular

Texturas(s)

Porfirítica e glomeroporfirítica (pl, opx), Amigdaloidal, Esqueletal (opx), Peneira

Composição

Vidro máfico (taquilito), maciço, 28%
 Plagioclásio cálcico, prismático, como constituinte primário, argilização, 26%
 Zeolita, anédrica, preenchendo vesículas subarredondadas e alongadas, 7%
 Ortopiroxênio, prismático, como constituinte primário, 20%
 Actinolita, hábito fibroso, urutilizacao, 1%
 Óxido indiferenciado, anédrico a subédrico, 5 %

Fenocristais 11%

Matriz 79%

Amígdalas/Fraturas 10%

Porosidade 0,2% (Secundária: 0,1 - Intra-cristal; 0,1 - Fratura)

Classificação - Streckeisen – Vulcânica Original: Basalto

Q: 0,0

A: 0,0

P: 100,0

F: 0,0

Identificação

Identificação da lâmina: OS-211,0 (Bpam)
 Nome do poço/afloramento: Testemunho
 Unidade: Grupo Serra Geral
 Bloco/Província: Bacia do Paraná
 País: Brasil
 Estado: RS

Sumário

Basalto fanerítico muito fino a médio, amigdaloidal, composto por plagioclásio e augita. Apresenta textura glomeroporfirítica e porfirítica de plagioclásio e augita. Vesículas subarredondadas variando de 0,1 a 0,5 mm de diâmetro e fraturas descontínuas (espessura de 0,1 mm) preenchidas por zeolitas.

Características Microscópicas Texturais

Estrutura(s): Amigdaloidal
Cristalinidade: Hipocristalina
Granularidade: Fanerítica
Tamanho relativo dos cristais: Inequigranularidade
Intervalo de tamanho de cristal: Muito fino a Médio

Forma dos cristais/fragmentos

Perfeição do formato cristalino: Hipidiomórfica
 Forma tridimensional dos cristais: Prismática, Tabular

Texturas(s)

Porfirítica e Glomeroporfirítica (pl, opx), Amigdaloidal, Intersertal, Peneira

Composição

Plagioclásio cálcico, prismático, como constituinte primário, argilização, 34%
 Ortopiroxênio, prismático, como constituinte primário, 15%
 Clinopiroxênio, prismático, como constituinte primário, 7%
 Zeolita, anédrica, preenchendo vesículas subarredondadas e fraturas, 9%
 Óxido indiferenciado, anédrico, 4%
 Vidro máfico (taquilito), maciço, 31%

Fenocristais 11%
 Matriz 76%
 Amígdalas/Fraturas 13%
 Porosidade 0%

Classificação - Streckeisen – Vulcânica Original: Basalto

Q: 0,0
 A: 0,0
 P: 100,0
 F: 0,0

Identificação

Identificação da lâmina: OS-208,3 (Bpm)
 Nome do poço/afloramento: Testemunho
 Unidade: Grupo Serra Geral
 Bloco/Província: Bacia do Paraná
 País: Brasil
 Estado: RS

Sumário

Núcleo de derrame *pahoehoe*. Basalto fanerítico muito fino a médio, amigdaloidal, composto por plagioclásio e augita. Apresenta textura glomeroporfírica e porfírica de plagioclásio e augita. Vesículas esparsas subarredondadas variando de 0,1 a 0,3 cm de diâmetro e fraturas contínuas (espessura de 0,1 mm) preenchidas por zeolitas.

Características Microscópicas Texturais

Estrutura(s): Maciço
Cristalinidade: Hipocristalino
Granularidade: Fanerítico
Tamanho relativo dos cristais: Inequigranular
Intervalo de tamanho de cristal: Muito fino a Médio

Forma dos cristais/fragmentos

Perfeição do formato cristalino: Hipidiomórfica
 Forma tridimensional dos cristais: Prismática, tabular

Texturas(s)

Porfírica e glomeroporfírica (pl, opx), Amigdaloidal, Intersertal, Subofítica, Coronítica (opx, cpx)

Composição

Plagioclásio cálcico, prismático, como constituinte primário, argilização, 49%
 Ortopiroxênio, prismático, como constituinte primário, 24%
 Clinopiroxênio, prismático, como constituinte primário, 13%
 Zeolita, anédrica, preenchendo vesículas subarredondadas e fraturas, 2%
 Óxido indiferenciado, anédrico, 3%
 Vidro máfico (taquilito), maciço, 9%

Fenocristais 17%
 Matriz 79%
 Amígdalas/Fraturas 4%
 Porosidade 0%

Classificação - Streckeisen – Vulcânica Original: Basalto

Q: 0,0
 A: 0,0
 P: 100,0
 F: 0,0

Identificação

Identificação da lâmina: OS-206,1 (Bpm)
 Nome do poço/afloramento: Testemunho
 Unidade: Grupo Serra Geral
 Bloco/Província: Bacia do Paraná
 País: Brasil
 Estado: RS

Sumário

Núcleo de derrame *pahoehoe*. Basalto fanerítico muito fino a médio, amigdaloidal, composto por plagioclásio e augita. Apresenta textura glomeroporfírica e porfírica de plagioclásio e augita. Vesículas esparsas subarredondadas variando de 0,1 a 0,3 cm de diâmetro e fraturas contínuas (espessura variando de 0,1 a 0,3 mm) preenchidas por zeolitas.

Características Microscópicas Texturais

Estrutura(s): Maciço
Cristalinidade: Hipocristalino
Granularidade: Fanerítico
Tamanho relativo dos cristais: Inequigranular
Intervalo de tamanho de cristal: Muito fino a Médio

Forma dos cristais/fragmentos

Perfeição do formato cristalino: Hipidiomórfica
 Forma tridimensional dos cristais: Prismática, tabular

Texturas(s)

Porfírico e Glomeroporfírico (pl, opx, cpx), Amigdalodal, Subofítica (pl-cpx)

Composição

Plagioclásio cálcico, prismático, como constituinte primário, argilização, 46%
 Ortopiroxênio, prismático e esqueletal, como constituinte primário, 22%
 Clinopiroxênio, prismático, como constituinte primário, 14%
 Zeolita, anédrica, preenchendo vesículas subarredondadas e fraturas, 8%
 Óxido indiferenciado, anédrico, 2%

Fenocristais 14%
 Matriz 77%
 Amígdalas/Fraturas 9%
 Porosidade 0,1% (Secundária: Intra-cristal)

Classificação - Streckeisen – Vulcânica Original: Basalto

Q: 0,0
 A: 0,0
 P: 100,0
 F: 0,0

Identificação

Identificação da lâmina: OS-198,8 (Bpam)
 Nome do poço/afloramento: Testemunho
 Unidade: Grupo Serra Geral
 Bloco/Província: Bacia do Paraná
 País: Brasil
 Estado: RS

Sumário

Basalto fanerítico muito fino a médio, amigdaloidal, composto por plagioclásio. Apresenta textura glomeroporfírica e porfírica de plagioclásio. Vesículas subarredondadas variando de 0,2 a 1 cm de diâmetro e fraturas descontínuas (0,1 mm de espessura) preenchidas por zeolitas, calcedônia e quartzo.

Características Microscópicas Texturais

Estrutura(s): Amigdaloidal
Cristalinidade: Hipocristalina
Granularidade: Fanerítica
Tamanho relativo dos cristais: Inequigranular
Intervalo de tamanho de cristal: Muito fina a Média

Forma dos cristais/fragmentos

Perfeição do formato cristalino: hipidiomórfica
 Forma tridimensional dos cristais: prismática, tabular

Texturas(s)

Porfírica e Glomeroporfírica (pl, opx, cpx), Intersertal, Amigdaloidal, Peneira

Composição

Plagioclásio, cálcico, prismático, como constituinte primário, argilização, 26%
 Vidro máfico (taquilito), maciço, 33%
 Ortopiroxênio, prismático e esquelético, como constituinte primário, 14%
 Clinopiroxênio, prismático, como constituinte primário, 9%
 Zeolita, anédrica, preenchendo vesículas subarredondadas, 11%
 Calcedônia, em fibras, preenchendo vesículas subarredondadas, 2%
 Quartzo, anédrico, preenchendo vesículas subarredondadas, 4%
 Óxido indiferenciado, anédrico, 1%

Fenocristais 9%
 Matriz 73%
 Amígdalas/Fraturas 18%
 Porosidade 0%

Classificação - Streckeisen – Vulcânica Original: Basalto

Q: 0,0
 A: 0,0
 P: 100,0
 F: 0,0

Identificação

Identificação da lâmina: OS-196,2 (Bpv)
 Nome do poço/afloramento: Testemunho
 Unidade: Grupo Serra Geral
 Bloco/Província: Bacia do Paraná
 País: Brasil
 Estado: RS

Sumário

Basalto afanítico, vítreo, amigdaloidal, composto por vidro máfico e plagioclásio. Apresenta textura glomeroporfírica e porfírica de plagioclásio. Vesículas subarredondadas variando de 0,2 a 0,5 mm de diâmetro e fraturas descontínuas (0,1 mm de espessura) preenchidas por zeolitas, calcedônia e quartzo.

Características Microscópicas Texturais

Estrutura(s): Amigdaloidal
Cristalinidade: Hipoihialina
Granularidade: Afanítica
Tamanho relativo dos cristais: Inequigranular
Intervalo de tamanho de cristal: Muito fino a fino

Forma dos cristais/fragmentos

Perfeição do formato cristalino: Hipidiomórfica
 Forma tridimensional dos cristais: Tabular, prismática

Texturas(s)

Porfírica e glomeroporfírica (pl, opx, cpx), Vítreo, Amigdaloidal, Peneira

Composição

Plagioclásio, cálcico, prismático, como constituinte primário, argilização, 27%
 Ortopiroxênio, prismático e esquelético, como constituinte primário, 14%
 Clinopiroxênio, prismático, como constituinte primário, 10%
 Vidro máfico (taquilito), maciço, 34%
 zeolita, anédrica, preenchendo vesículas subarredondadas, 8%
 Calcedônia, em fibras, preenchendo vesículas subarredondadas, 1%
 Quartzo, anédrica, preenchendo vesículas subarredondadas, 5%
 Actinolita, 1%

Fenocristais 7%
 Matriz 81%
 Amígdalas/Fraturas 12%
 Porosidade 0,1% (Secundária: *Drusy*)

Classificação - Streckeisen – Vulcânica Original: Basalto

Q: 0,0
 A: 0,0
 P: 100,0
 F: 0,0

Identificação

Identificação da lâmina: OS-191,0 (Bpam)
 Nome do poço/afloramento: Testemunho
 Unidade: Grupo Serra Geral
 Bloco/Província: Bacia do Paraná
 País: Brasil
 Estado: RS

Sumário

Basalto fanerítico fino a médio, amigdaloidal, composto por plagioclásio e ortopiroxênio. Apresenta textura glomeroporfírica e porfírica de plagioclásio, subordinadamente de ortopiroxênio. Vesículas subarredondadas variando de 0,2 a 0,8 mm de diâmetro e fraturas descontínuas (0,1 mm de espessura) preenchidas por zeolitas, calcedônia e quartzo.

Características Microscópicas Texturais

Estrutura(s): Amigdaloidal (0,2 a 0,8 mm de diâmetro)
Cristalinidade: Hipocristalina
Granularidade: Fanerítica
Tamanho relativo dos cristais: Inequigranular
Intervalo de tamanho de cristal: Fina a Média

Forma dos cristais/fragmentos

Perfeição do formato cristalino: Hipidiomórfica
 Forma tridimensional dos cristais: Prismática, Tabular

Texturas(s)

Porfírica e Glomeroporfírica (pl, opx, cpx), Amigdaloidal, Intersertal

Composição

Plagioclásio cálcico, prismático, como constituinte primário, argilização, 31%
 Ortopiroxênio, prismático e esquelético, como constituinte primário, 17%
 Clinopiroxênio, prismático, como constituinte primário, 7%
 Vidro máfico (taquilito), maciço, 23%
 Zeolita indiferenciada, anédrica, preenchendo vesículas subarredondadas e fraturas, 14%
 Calcedônia, anédrica, preenchendo vesículas subarredondadas, 1%
 Quartzo, anédrica, preenchendo vesículas subarredondadas, 5%
 Óxido indiferenciado, anédrico, 2%

Fenocristais 11%
 Matriz 66%
 Amígdalas/Fraturas 23%
 Porosidade 0%

Classificação - Streckeisen – Vulcânica Original: Basalto

Q: 0,0
 A: 0,0
 P: 100,0
 F: 0,0

ANEXOS

Anexo A

Análise petrofísica realizada pelo laboratório IPR-PUCRS.



IPR - Institute of Petroleum and Natural Resources
PUCRS - Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul



Testing Report – Geochemistry and Petrophysics Laboratory

Código do Relatório (Code): LGP0123

CLIENTE (CUSTOMER)

Empresa/Pessoa (company): Ingrid Muller Mohr CNPJ/CPF (company code): 027.386.080-19
Endereço (address): Av Antunes Ribas, 351, Jardim Itu, Porto Alegre, RS
Contato (e-mail and phone): (51) 99681-1488

DESCRIÇÃO DA AMOSTRA E MÉTODO (SAMPLE AND METHOD)

Data do recebimento da amostra (receipt date): 11/01/2023

Descrição da Amostra (sample description): Informação contida na tabela abaixo.

Código da amostra (sample code): Informação contida na tabela abaixo.

Condições ambientais (environmental conditions): Informação contida na tabela abaixo.

Nome da Amostra (sample name)	Cód. Lab (sample code)	Descrição da amostra (sample description)
BPMV OS-188,35m	1882	- Amostra de rocha vulcânica básica, oriunda de testemunho de sondagem.
BPMV OS-198,8m	1883	- Amostra de rocha vulcânica básica, oriunda de testemunho de sondagem.
BPV OS-196,2m	1884	- Amostra de rocha vulcânica básica, oriunda de testemunho de sondagem.
BPM OS-194,1m	1885	- Amostra de rocha vulcânica básica, oriunda de testemunho de sondagem.
BPV OS-212,25m	1886	- Amostra de rocha vulcânica básica, oriunda de testemunho de sondagem.
BPM OS-222,45m	1887	- Amostra de rocha vulcânica básica, oriunda de testemunho de sondagem.
BPV OS-236,55m	1888	- Amostra sólida de rocha vulcânica.
23 IM 08 A	1889	- Amostra sólida de rocha vulcânica.
23 IM 04 A	1890	- Amostra sólida de rocha vulcânica.
23 IM 02 E	1891	- Amostra sólida de rocha vulcânica.
23 IM 02 F	1892	- Amostra sólida de rocha vulcânica.
OS-198,0m	1942	- Amostra de rocha vulcânica básica, oriunda de testemunho de sondagem.

Método utilizado (method): Ensaio realizado utilizando o equipamento de Porosidade e Permeabilidade AP-608, através de medições do volume dos poros utilizando como método a expansão de um gás (nitrogênio).



IPR - Institute of Petroleum and Natural Resources
PUCRS - Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul



Testing Report – Geochemistry and Petrophysics Laboratory

Rastreabilidade Metrológica (metrological traceability): Porosímetro-Permeâmetro (Tag:0293LGP); Paquímetro digital (Tag: 0294LGP – RBC: 20198/22); Padrões utilizados (Tag:0300LGP – RBC:20172/22; Tag:0303LGP – RBC: 20147/22; Tag:0304LGP – RBC: 20149/22; Tag:0305LGP – RBC: 20152/22).

RESULTADOS (RESULTS)

Período de realização das Análises (testing period): De 19 a 24/01/2023

Os ensaios foram realizados no equipamento de Porosidade e Permeabilidade, onde após a medição das dimensões físicas da amostra, foram executadas três repetições no equipamento para determinação da porosidade e permeabilidade efetiva das amostras. Em seguida, após realizar a média de 3 medições, foram obtidos os seguintes resultados:

Nome da Amostra (sample name)	Cód. Lab (sample code)	Data de análise (testing period)	Média Porosidade efetiva (effective porosity average)	Média Permeabilidade efetiva (effective permeability average)	Cond. Ambiental (Temp. e Umidade) (environmental conditions)
BPMV OS-188,35m	1882	24/01/2023	1,03%	0,00mD	24,1°C / 78% UR
BPMV OS-198,8m	1883	19/01/2023	4,80%	0,11mD	23,3°C / 78% UR
BPV OS-196,2m	1884	19/01/2023	0,65%	0,00mD	23,3°C / 78% UR
BPM OS-194,1m	1885	23/01/2023	0,40%	0,00mD	20,4°C / 78% UR
BPV OS-212,25m	1886	23/01/2023	0,90%	0,04mD	20,4°C / 78% UR
BPM OS-222,45m	1887	23/01/2023	0,38%	0,00mD	20,4°C / 78% UR
BPV OS-236,55m	1888	24/01/2023	0,49%	0,00mD	24,1°C / 78% UR
23 IM 08 A	1889	20/01/2023	0,57%	0,00mD	23,3°C / 78% UR
23 IM 04 A	1890	24/01/2023	0,73%	0,00mD	24,1°C / 78% UR
23 IM 02 E	1891	24/01/2023	0,67%	0,00mD	24,1°C / 78% UR
23 IM 02 F	1892	24/01/2023	0,61%	0,00mD	24,1°C / 78% UR
OS-198,0m	1942	24/01/2023	0,75%	0,00mD	24,1°C / 78% UR

Nota: os ensaios foram realizados nas dependências do IPR.

Ave. Ipiranga, 6681 – Build. 96J – PostCode 90619-900 Porto Alegre, RS – Brazil FOR.GQ.02 revisão 1 | Page 2 de 3



IPR - Institute of Petroleum and Natural Resources
PUCRS - Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul



Testing Report – Geochemistry and Petrophysics Laboratory

RESPONSÁVEIS (SIGNATURES)

Data de emissão (Issue date): 27/01/2023

Assinatura Signatário Autorizado
Felipe Vargas de Wilbert
Auxiliar de Pesquisa
Laboratório de Geoquímica e Petrofísica - LGP
IPR - PUCRS

Felipe Vargas de Wilbert

Assinado de forma digital por Felipe Vargas de Wilbert
Dados: 2023.01.30 09:49:58 -03'00'

Nota: Este documento diz respeito apenas à(s) amostra(s) ensaiada(s) não extensivo a lotes ou similares. A reprodução deste relatório só poderá ser na sua íntegra. As amostras foram ensaiadas conforme condições de recebimento.

This document refers only to the sample(s) tested and does not extend to batches or similar. This report may only be reproduced in its entirety. The samples were tested according to the conditions of receipt.

Anexo B

Análise geoquímica de rocha total por ICP-OES/ICP-MS realizada pelo laboratório Bureau Veritas Commodities Canada Ltd.

Elem.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ (t)	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	Cr ₂ O ₃	LOI	Sum
Unid.	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
MDL	0,01	0,01	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,002	-5,1	0,01
OS-196.2	52,47	14,04	10,40	6,24	5,80	3,47	1,69	1,12	0,15	0,20	0,036	4,1	99,76
OS-206.1	51,52	14,30	9,84	5,59	7,44	2,86	0,76	1,14	0,16	0,18	0,032	5,9	99,73
OS-208.3	57,37	13,69	9,72	4,76	6,52	2,15	2,47	1,08	0,15	0,14	0,031	1,7	99,78
OS-212.25	54,77	13,99	9,83	5,59	6,02	2,72	2,91	1,10	0,15	0,20	0,031	2,4	99,76
OS-216.65	54,95	13,89	9,84	5,05	7,86	2,08	1,32	1,09	0,15	0,15	0,030	3,3	99,76
OS-234.6	56,36	13,88	10,04	5,26	6,92	2,22	2,17	1,10	0,15	0,15	0,033	1,4	99,77
OS-236.55	52,16	14,56	10,38	6,73	2,35	1,62	4,18	1,16	0,15	0,33	0,030	5,9	99,74

Elem.	Ba	Sc	Be	Cs	Ga	Hf	Nb	Rb	Sn	Sr	Ta	Th	U	V	W	Cu	Ni	Co
Unid.	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM
MDL	1	1	1	0,1	0,5	0,1	0,1	0,1	1	0,5	0,1	0,2	0,1	8	0,5	0,1	20	0,2
OS-196.2	460	32	<1	0,7	15,1	5,0	12,6	63,8	<1	215,6	0,6	8,8	0,8	237	<0,5	54,3	95	0,7
OS-206.1	275	31	6	1,3	17,5	5,5	13,8	29,5	<1	525,3	0,7	9,7	1,0	231	<0,5	47,0	93	1,3
OS-208.3	440	30	<1	0,7	17,3	5,0	13,2	81,3	<1	197,5	0,7	9,4	0,9	230	0,8	39,2	78	0,7
OS-212.25	637	30	2	0,8	16,8	4,9	12,7	82,7	<1	225,4	0,7	9,4	0,7	242	<0,5	55,2	83	0,8
OS-216.65	333	30	4	1,1	18,8	4,9	13,1	34,8	<1	309,2	0,7	8,9	0,8	243	0,6	60,2	81	1,1
OS-234.6	423	30	<1	0,6	17,9	4,7	12,4	76,5	<1	225,2	0,7	8,9	0,8	240	<0,5	29,2	82	0,6
OS-236.55	1130	32	2	1,0	22,3	5,1	13,7	123,7	<1	183,6	0,7	9,2	1,0	264	0,6	29,2	82	1,0

Elem.	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Mo	Zn	As	Zr	Y
Unid.	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM	PPM
MDL	0,1	0,1	0,02	0,3	0,05	0,02	0,05	0,01	0,05	0,02	0,03	0,01	0,05	0,01	0,1	1	0,5	0,1	0,1
OS-196.2	31,4	62,7	7,18	27,7	5,78	1,31	5,97	0,89	5,34	1,10	3,15	0,45	2,82	0,45	0,3	97	0,7	182,2	29.1
OS-206.1	33,0	71,1	8,03	32,0	6,32	1,49	6,28	0,94	5,85	1,15	3,46	0,48	3,05	0,47	0,3	55	0,8	207,0	32.4
OS-208.3	34,2	70,1	7,65	30,3	6,09	1,38	5,80	0,89	5,18	1,06	2,98	0,40	2,93	0,44	0,3	66	0,7	194,6	29.0
OS-212.2 5	33,3	65,8	7,40	29,4	5,95	1,40	5,85	0,90	5,50	1,10	3,23	0,46	2,91	0,43	0,8	95	1,0	193,7	30.1
OS-216.6 5	33,1	65,7	7,42	28,8	6,08	1,33	5,79	0,89	5,71	1,12	3,03	0,46	2,76	0,44	0,5	56	0,8	190,9	30.0
OS-234.6	33,0	65,4	7,18	28,0	5,77	1,35	5,88	0,88	5,22	1,09	3,19	0,44	2,82	0,41	0,3	83	1,2	186,3	29.5
OS-236.5 5	35,5	72,1	8,02	32,5	6,20	1,41	6,36	0,95	5,91	1,14	3,30	0,49	3,09	0,45	0,5	91	1,0	201,7	31.1