



**ESTRATIGRAFIA, PETROLOGIA E PADRÕES DE POROSIDADE DOS  
DEPÓSITOS DO VULCÃO DO PAREDÃO, ILHA DA TRINDADE, BRASIL**

**NATÁLIA GAUER PASQUALON**

Porto Alegre, 2017

**NATÁLIA GAUER PASQUALON**

**ESTRATIGRAFIA, PETROLOGIA E PADRÕES DE POROSIDADE DOS  
DEPÓSITOS DO VULCÃO DO PAREDÃO, ILHA DA TRINDADE, BRASIL**

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.

**Orientadores:** Prof. Dr. Evandro Fernandes de Lima  
Prof. Dr. Claiton Marlon dos Santos Scherer

Porto Alegre, 2017

# UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

**Reitor:** Rui Vicente Oppermann

**Vice-Reitor:** Jane Fraga Tutikian

## INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Diretor:** André Sampaio Mexias

**Vice-Diretor:** Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Pasqualon, Natália Gauer

Estratigrafia, petrologia e padrões de porosidade dos depósitos do Vulcão do Paredão, Ilha da Trindade, Brasil. / Natália Gauer Pasqualon. - Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2017.  
[145 f.] il.

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.

Orientador(es): Evandro Fernandes de Lima

Claiton Marlon dos Santos Scherer.

1. Litofácies Vulcânicas. 2. Reservatórios não Convencionais.  
3. Vulcanismo Recente. I. Título.

CDU 55(81)

---

Catálogo na Publicação

Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS

Renata Cristina Grun

CRB 10/1113

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

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso "**ESTRATIGRAFIA, PETROLOGIA E PADRÕES DE POROSIDADE DOS DEPÓSITOS DO VULCÃO DO PAREDÃO, ILHA DA TRINDADE, BRASIL**" elaborado por "NATÁLIA GAUER PASQUALON", como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

**Comissão Examinadora:**

---

**Dra Juliana Charão Marques**

---

**Dr. José Carlos Frantz**

---

**Dr. Bruno L. D. Horn**



À nonna Cema, por me conduzir a  
esse caminho.

## AGRADECIMENTOS

Amo o que faço e as pessoas que me cercam, obrigada universo por esse caminho cheio de luz!

Agradeço aos meus pais Renê e Verena, minha irmã Pietra, e a toda minha família, por todo amor e suporte sempre. A base é TUDO.

Minhas *soul sisters* Alana e Manu, obrigada por compartilharem casa e vida, pela cumplicidade e amizade pura e sincera. Se as paredes do 801 falassem...

Às gringas Carol, Bru, Cele e Bia, obrigada! Aos amigos que me acompanham desde o primeiro desses 6 anos de curso, meus *geobrothers* Mila, Erik, Jo, Rafa, Luan, Ferdi e Rada e às parcerias que tive a sorte de conhecer na faculdade. Aos amigos *brighthonianos*, em especial à Kath, por me acompanhar por esse mundão fazendo geologia. Pessoal da *Topway*, do surf e das cantorias – obrigada por me ajudarem a descontrair e a me construir.

Por todos os ensinamentos de geo e de vida, aos mestres e amigos China, Claitinho e Lucas. Aos guris da 102b que tornam a rotina mais leve o trabalho mais divertido: Bagé, Marcos, Jonas, Vini e Porquinho.

Chinês, obrigada por colocar em nossas mãos um projeto tão maravilhoso e pela confiança em mim depositada. A oportunidade de trabalhar na Ilha da Trindade, com o último vulcão brasileiro, não é pouca coisa não! Essa experiência mudou minha visão sobre o país, me proporcionou crescimento geológico, vivências inimagináveis e conexões com pessoas incríveis! Sou eternamente grata por nossa parceria e pela tua orientação.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Agência Nacional do Petróleo (ANP) pelo financiamento do projeto e à Marinha do Brasil por toda logística e apoio aos projetos de pesquisa desenvolvidos na Estação Científica da Ilha da Trindade.

Por fim, obrigada a todos que contribuíram de alguma forma pra que eu chegasse até aqui. Esse é só o começo...

“Nossas costas contam histórias que a lombada de nenhum livro pode carregar”

Rupi Kaur

## RESUMO

Um arcabouço estratigráfico pode ser construído a partir da descrição e interpretação de litofácies. A aplicação deste método em sistemas vulcânicos facilita a investigação dos padrões de permoporosidade destes litotipos, importantes na indústria para a prospecção de água, óleo e gás. Este trabalho apresenta e discute os dados de estratigrafia, padrões de porosidade e petrologia do Vulcão do Paredão, localizado na porção sudeste da Ilha da Trindade. Esta unidade representa o último episódio vulcânico (Pleistoceno) registrado no Brasil e a organização estratigráfica indica uma base composta por derrames nefeliníticos intercalados com lapilitos e lapili-tufos, sucedidos por um cone piroclástico com até 200 m de altura. Através da descrição e associação de litofácies foram construídas 4 seções colunares (TRV-01, TRV-02, TRV-03, TRV-04) em escala 1:50. Adicionalmente, obteve-se uma estimativa visual da porosidade absoluta em macroescala das diferentes litofácies. A caracterização petrográfica de 9 lâminas delgadas impregnadas foi feita através da contagem modal de 300 pontos com o software *Hardledge*, para o reconhecimento dos principais aspectos texturais, composicionais e da microporosidade. O uso de MEV (microscopia eletrônica de varredura) com EDS (espectroscopia por dispersão de energia de raios X) possibilitou o detalhamento da porosidade em micro e nanoscala e análises semiquantitativas de química mineral. As análises químicas de rocha total foram feitas por fluorescência de raios X e tratadas com o software *Petrograph*. Como resultado da análise estratigráfica foram identificadas 2 litofácies coerentes de nefelinito porfirítico vesiculado (Npv) e nefelinito porfirítico maciço (Npm) e 5 vulcanoclásticas de brecha nefelinítica (Nb), lapilito maciço (Lm), lapili-tufo com estratificação plano-paralela (LTp), lapili-brecha maciça (LBm) e lapilito com gradação inversa (Lgi). As associações de litofácies caracterizam derrames do tipo 'A'a, *rubbly pahoehoe*, *pahoehoe*, depósitos de queda e o cone de escórias. Petrograficamente, as fácies piroclásticas são compostas por *shards* e fragmentos de escória subangulosos de tamanhos que variam de cinza à lapili. As fácies coerentes foram descritas como olivina nefelinitos porfiríticos, holocristalinos e vesiculados, compostos por fenocristais de olivina em uma matriz de clinopiroxênio, nefelina, zeolita e titanomagnetita, podendo conter flogopita. Todas as amostras são ultrabásicas (<45% de SiO<sub>2</sub>) e subsaturadas em SiO<sub>2</sub>, classificadas como foiditos (>60% de feldspatóide APF) da série alcalina sódica, com nefelina (Ne<sub>n</sub>) e olivina (Ol<sub>n</sub>) normativas. A análise do arcabouço estratigráfico aliada à petrografia sugere uma porosidade de 30-40% nas fácies com contribuição piroclástica (Lm, LTp, LBm e Lgi) e autoclástica (Nb), dos tipos de fratura, inter e intrapartícula. A porosidade nas fácies coerentes (Npv e Npm) é heterogênea e varia de 10-30%, dos tipos vesicular, intercrystalina, intracrystalina, móldica e de fratura. A interpretação da sucessão vertical de fácies permite concluir que o vulcanismo foi heterogêneo, com uma fase inicial Havaiana (domínio de lavas) e uma fase final Estromboliana (domínio de piroclásticas com fragmentos primários). Os padrões de porosidade são predominantemente primários e controlados pela variação faciológica, na qual as fácies vulcanoclásticas são mais porosas que as coerentes.

**Palavras-chave:** litofácies vulcânicas, reservatórios não convencionais, vulcanismo recente

## ABSTRACT

A stratigraphic framework can be constructed through lithofacies description and interpretation. The application of this method in volcanic systems enables the investigation of porosity patterns in volcanic rocks, important in industry for the prospection of water, oil and gas. This work presents and discusses the stratigraphy, porosity patterns and petrology of Vulcão do Paredão (Paredão Volcano), located in the southeast of Trindade Island. This unit represents the last volcanic episode (Pleistocene) recorded in Brazil and its stratigraphic organization indicates nephelinitic flows alternate with lapillistones and lapilli-tuffs at the base, succeeded by a pyroclastic cone with nearly 200 m high. Through lithofacies description and association 4 stratigraphic columns (TRV-01, TRV-02, TRV-03, TRV-04) were constructed in scale 1:50. In addition, the total porosity was visually estimated in macroscale for the different lithofacies. The petrographic characterization of 9 impregnated thin sections was done for the recognition of the main textural and compositional aspects and of microporosity through the counting of 300 points using the software *Hardledge*. The use of SEM (Scanning Electron Microprobe) with EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) promoted the detailing of micro and nanoporosity and mineral chemistry semi-quantitative analysis. Whole rock chemistry analysis were obtained by X-ray fluorescence (XRF) and processed using the software *Petrograph*. The stratigraphic analysis resulted in the identification of 2 coherent lithofacies of vesicular (Npv) and massive porphyritic nephelinite (Npm) and 5 volcanoclastic lithofacies of nephelinitic breccia (Nb), massive lapillistone (Lm), planar stratified lapilli-tuff (LTp), massive lapilli-breccia (LBm) and inverse grading lapillistone (Lgi). The lithofacies associations characterize 'A'a, *rubbly pahoehoe* and *pahoehoe* flow types, fallout deposits and the scoria cone. Petrographically, the pyroclastic facies are composed of sub-angular fragments of shards and scoria varying in size from ash to lapilli. The coherent facies were described as porphyritic olivine nephelinites, holocrystalline and vesicular, composed by olivine phenocrysts in a matrix of clinopyroxene, nepheline, zeolite, titanomagnetite, sometimes with phlogopite. All the analyzed samples are ultrabasic (<45% of SiO<sub>2</sub>) and SiO<sub>2</sub> undersaturated, chemically classified as foidites (>60% of feldpathoids APF) of the sodic alkaline series, with normative nepheline (Ne<sub>n</sub>) and olivine (Ol<sub>n</sub>). The stratigraphic framework and petrographic analyses suggest around 30-40% of porosity of interparticle, intraparticle and fracture types in the lithofacies with pyroclastic (Lm, LTp, LBm and Lgi) and autoclastic (Nb) contribution. The porosity is heterogeneous in the coherent facies (Npv and Npm), varying from 10 to 30%, of vesicular, intercrystalline, intracrystalline, moldic and fracture types. The interpretation of the vertical facies succession leads to the conclusion that the volcanism was heterogeneous, with an initial Hawaiian stage (lava flows domain) and a final Strombolian stage (pyroclastics with primary fragments domain). The porosity patterns are dominantly primary, controlled by faciological variation, in which the volcanoclastic facies are more porous than the coherent.

**Keywords:** volcanic facies, unconventional reservoirs, recent volcanism

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1: a) Localização das ilhas da Trindade e Martim Vaz indicada pela caixa branca. O tracejado rosa mostra a extensão da Cadeia Vitória-Trindade. b) Imagem da Ilha da Trindade com a localização da área de estudo indicada na porção Sudeste da Ilha. .... 21
- Figura 2: Mapa batimétrico e perfil esquemático da Cadeia Vitória-Trindade.22
- Figura 3: Figura esquemática de dois segmentos consecutivos da Dorsal Meso-Atlântica seccionados por uma falha transformante e as zona de fraturas associadas.....23
- Figura 4: Mapa que evidencia as Províncias Alcalinas continentais de Poxoréu e do Alto Parnaíba e a plataforma de Abrolhos, interpretados como o traço da pluma da Trindade a oeste da Cadeia Vitória-Trindade..... 24
- Figura 5: Porção norte da ilha da Trindade, na qual é possível observar o relevo acidentado, com indicação do Pico do Desejado com ~ 600 m e o Morro do Monumento com ~570 m..... 25
- Figura 6: Mapa geológico da ilha com a representação das cinco unidades descritas por Almeida (1961), com a localização dos pontos de levantamento de seção colunar e amostragem. .... 26
- Figura 7: A) Parte do cone de escórias do Vulcão do Paredão; B) Exposição das lavas e rochas piroclásticas na Praia das Tartarugas. .... 27
- Figura 8: A) Derrame do tipo *pahoehoe* com superfície em corda do vulcão Kilauea, Havaí. B) Vesículas do tipo *pipe* preenchidas por calcita na base de derrame *pahoehoe* do Grupo Serra Geral em Santa Cruz do Sul, Brasil. .... 29
- Figura 9: A) Derrame 'A'a da Fm. Valado na Ilha da Trindade, Brasil. O tracejado limita o núcleo maciço das zonas de brecha no topo e na base; B) Fragmentação do topo do derrame 'A'a durante o avanço da lava sobre derrame *pahoehoe* no vulcão Kilauea, no Havaí. .... 30
- Figura 10: Transição *pahoehoe* - 'A'a com os tipos intermediários *slabby* e *rubbly pahoehoe*. .... 31
- Figura 11: *Pillow* lavas e derrames tabulares do ofiolito de Troodos, no Chipre; A) *Pillow* lavas destacadas pelo tracejado, sobre zona de brecha hialoclastítica; (B) Derrame tabular com o desenvolvimento de disjunções colunares na porção central.....32
- Figura 12: A) Autobrecha composta por fragmentos de lava bem vesiculados de tamanhos variados e com textura *jigsaw-fit*. Topo de derrame *rubbly pahoehoe* do Grupo Serra Geral, em Santa Cruz do Sul –RS; B) Brecha hialoclastítica das *pillow* lavas do ofiolito de Troodos, no Chipre. .... 33
- Figura 13: Mecanismos de formação de autobrecha: 1) Rompimento da crosta superficial do derrame e transporte para a base; 2) Fragmentação por cisalhamento simples; 3) Fragmentação freatomagmática. .... 34

Figura 14: Classificação de rochas autoclásticas e piroclásticas (depósitos unimodais bem-selecionados) com base na granulometria.....	35
Figura 15: Classificação granulométrica para depósitos piroclásticos primários polimodais.....	36
Figura 16: Tipos de depósitos piroclásticos e mecanismo de transporte ilustrado no desenho. As setas pretas indicam o movimento das partículas e as brancas a expansão do gás. A) Depósitos de queda de púmices com estratificação plano-paralela da erupção Minoica, em Santorini; B) Depósitos de surge da base do cone de cinzas de Vatnsfell com antidunas, na Islândia; C) Depósitos de fluxo do vulcão Redoubt no Alaska.....	38
Figura 17: Esquema que correlaciona os conceitos básicos da estratigrafia de seqüências.....	42
Figura 18: Arquitetura de fácies vulcânicas descritas por Waichel et al. (2012) na calha de Torres.....	45
Figura 19: Tipos de porosidade em arenitos.....	47
Figura 20: Principais tipos de porosidade em carbonatos.....	48
Figura 21: Tipos de porosidade em derrames elencado primeiramente por Sruoga e Rubinstein (2007). Os retângulos pretos representam os processos geradores dos tipos de porosidade.....	49
Figura 22: Classificação de diferentes tipos de sedimentos e rochas em permeável, semipermeável e impermeável de acordo com os valores de permeabilidade obtidos em milidarcy e cm <sup>2</sup> .....	51
Figura 23: a) Diagrama Van Krevelen modificado, indicando os produtos da maturação do querogênio, que é marcada pelas setas verdes. B) Diagrama da transformação termal do querogênio com aumento da profundidade e pressão. Nota-se a janela do óleo na e gás úmido na catagênese e a de gás seco na metagênese.....	55
Figura 24: Exemplos de armadilhas. a) <i>Trap</i> estratigráfico de discordância angular; b) <i>Trap</i> estrutural por falhamento; c) <i>Trap</i> estrutural de anticlinal.....	57
Figura 25: Representação gráfica feita em campo dos derrames do Vulcão do Paredão através do levantamento de seção colunar no ponto TRV-01, acompanhada da descrição litológica na coluna da direita. Outras informações importantes foram inseridas na seção, como conteúdo de fenocristais e padrões de vesiculação. As letras à esquerda indicam fotos e amostragens.....	60
Figura 26: Fotomicrografia da lâmina TR-07 impregnada com resina azul à luz natural.....	62
Figura 27: A) Quarteamento de amostra no tamanho areia grossa. B) Recipientes de ágata dentro dos quais as amostras são colocadas após o quarteamento para serem inseridas no equipamento de moagem.....	62
Figura 28: Interface do software <i>Hardledge</i> na seção da descrição da composição e contagem modal de 300 pontos.....	63

- Figura 29: Gráfico do provável erro na contagem de pontos. Observa-se que a contagem de mais de 300 pontos não promove redução considerável na margem de erro.....64
- Figura 30: Interface do software *Petrograph*. A figura mostra o diagrama de classificação TAS (LE BAS et al., 1986), um dos diagramas gerados pelo programa.....66
- Figura 31: Representação esquemática da região de ionização gerada na interação do feixe de elétrons com a superfície da gema. .... 67
- Figura 32: Fotomosaico com a posição das seções TRV-01, TRV-02 e TRV-03 no afloramento da Praia das Tratarugas e correlação das seções. As diferentes cores usadas na correlação indicam as associações de litofácies identificadas..... 70
- Figura 33: Litofácies identificadas nos depósitos da Praia das Tartarugas: A) Nefelinito porfirítico maciço (Npm); B) Nefelinito porfirítico vesiculado (Npv); C) Contato entre as fácies de brecha nefelinítica (Nb) e nefelinito porfirítico maciço (Npm); D) Brecha nefelinítica (Nb); E) Lapilito maciço (Lm); F) Lápili-tufo com estratificação plano-paralela (LTP) sobre o lapilito maciço (Lm). .... 73
- Figura 34: Litofácies identificadas no cone de escórias: A) Lápili-brecha maciça (LBm); B) Fração lapilítica da fácies LBm, com fragmentos de escória marrons e cristaloclastos de olivina pretos; C) Nível com concentração de bombas da fácies LBm; D) Sucessão de camadas de lápili-tufo com estratificação plano-paralela (LTP) na porção superior do cone; E) Camadas planares de lapilito com gradação inversa (Lgi); F) Detalhe da gradação inversa na fácies Lgi indicada pela seta branca.74
- Figura 35: Associações de litofácies do tipo 'A'a e depósitos de queda. A) Depósitos de queda; B) Derrame 'A'a com núcleo vesiculado (Npv); C) Derrame 'A'a com núcleo predominantemente maciço (Npm); D) Contato da brecha basal pouco desenvolvida de derrame 'A'a sobre depósitos de queda da base da seção TRV-03.....77
- Figura 36: Associações de litofácies do tipo *pahoehoe* e *rubbly pahoehoe*. A) Derrame *pahoehoe* caracterizado por núcleo de Npm e topo de Npv, sobreposto pela camada de lapilito maciço (tracejado); B) Derrame de *rubbly pahoehoe* definido pela associação das fácies Npv (tracejado) e Nb; C) Contato da camada de Lm sobre o topo vesiculado da *pahoehoe* e sob a base reta da *rubbly pahoehoe*.78
- Figura 37: A) Associação de litofácies da base do cone de escórias; B) Camadas de Lgi na base e de LBm no topo; C) Camadas planares de LBm, com níveis de maior concentração de bombas. .... 79
- Figura 38: Cone de escórias marcando a transição no estilo eruptivo do Vulcão do Paredão de havaiano para estromboliano..... 81
- Figura 39: Olivina nefelinitos porfiríticos, holocristalinos e vesiculados. A) Olivina romboédrica e esquelética; B) Olivina fraturada e parcialmente oxidada; C) Olivina totalmente oxidada, substituída por iddingsita; D) Aglomerados de olivina; E) Nefelina anédrica/subpedrica intergranular; F) Flogopita anédrica e intergranular. LN – Luz natural; LP – Luz polarizada; Ol – Olivina; Phl – flogopita; Ne – nefelina; V-vesículas. .... 83



Figura 40: A) Fotomicrografia à luz polarizada da lâmina TRV-01C, com aglomerado e fenocristais de olivina. B) Imagem de MEV na qual os números indicam os espectros analisados por EDS. C) Gráfico com as variações dos teores de MgO (% em peso) obtidos nos fenocristais e aglomerados de olivina pelas análises de EDS.....84

Figura 41: Imagem de MEV da lâmina TRV-01C e respectivos espectros analisados. Espectro 50 - olivina; Espectro 35 - titanomagnetita; Espectro 39 – nefelina; Espectro 43 – flogopita. Os picos de Au representam a mealização da lâmina. .... 86

Figura 42: Mapas composicionais da lâmina TRV-01C. As caixas de contorno preto representam os elementos utilizados na composição do mapa e de contorno branco os minerais observados na microscopia óptica que refletem as composições apresentadas pelo mapa. A) Mapa de Mg, Na e K, que expressa os cristais de olivina, nefelina e analcima e flogopita, respectivamente; B) Mapa de Ca e Ti, evidenciado principalmente pela cristalização de clinopiroxênio e titanomagnetita.....87

Figura 43: Lápili-tufo com laminação incipiente. A porosidade é representada pela resina azul. A) *Shards* do tipo Y e P. B) Fragmento de escória com amígdalas de zeolita. LN – Luz natural..... 88

Figura 44: Diagrama de classificação geoquímica TAS (Álcalis vs. Sílica) para rochas vulcânicas (LE BAS et al. 1986). .... 91

Figura 45: Diagrama MgO (% em peso) vs. elementos maiores (% em peso) do Vulcão do Paredão. Os losangos laranjas representam derrames e o círculo vermelho a amostra piroclástica. .... 92

Figura 46: Diagrama MgO (% em peso) vs. elementos traços (ppm) do Vulcão do Paredão. Os losangos laranjas representam derrames e o círculo vermelho a amostra piroclástica. .... 93

Figura 47: Proporção de minerais normativos para as amostras do Vulcão do Paredão segundo cálculo da norma CIPW..... 94

Figura 48: A) Porção central de núcleo de derrame com vesículas arredondadas; B) Porção inferior de núcleo de derrame com vesículas irregulares e estiradas; C) Microvesiculação dos fragmentos de lava em autobrecha; D) Lapilito com porosidade entre os fragmentos de escória microvesiculados. E) Alteração esferoidal gerando padrão de fraturas circulares; F) Plano de fraturas preferencial dos derrames do Vulcão do Paredão em núcleo de derrame 'A'a'. .... 96

Figura 49: Polos dos planos de fratura (n=17), projetados em estereograma de mesma área, hemisfério inferior. Os círculos pretos (n=13) representam os polos dos planos de fratura NNW-SSE e os brancos (n=4), o conjugado com direção NE-SW. Os quadrados são os polos dos planos médios, representados na figura pelos grandes círculos. .... 97

Figura 50: Porosidade vesicular. A) Vesículas arredondadas e irregulares, por vezes conectadas por microfaturas (setas brancas); B) Vesículas alongadas, estiradas segundo o fluxo de lava; C) Vesícula alongada circundada por cristais de clinopiroxênio, nefelina e titanomagnetita; D) Inclusão de cristais subédricos de nefelina e flogopita em vesícula. .... 99

Figura 51: A) Porosidade móldica da dissolução de cristais de olivina, com precipitação de cristais de zeolita secundária. B) Porosidade de fratura em olivina; C) Porosidade intracristalina em cristal de olivina; D) Porosidade intercristalina da dissolução da matriz. E) Porosidade intercristalina indicada pelas setas brancas e de fratura em cristal de olivina pela seta amarela em MEV; F) Detalhe de vesículas com geometria circular/oval (esquerda) e irregular (direita) em imagem de MEV; a seta branca indica a borda côncava da vesícula. LN – Luz natural; OI – Olivina; Ne – nefelina; V- vesícula. .... 100

Figura 52: Tipos de porosidade nas fácies piroclásticas. A) Porosidade de fratura; B) Porosidade interpartícula e intrapartícula parcialmente preenchida por zeolita. C) Fragmento de escória (tracejado) com poros intrapartícula arredondados preservados (cinza médio) e zeolitizados (cinza escuro). D) Porosidade interpartícula em imagem de MEV (cinza médio). O cinza claro representa os *shards*. P – porosidade; Zeo – zeolita. .... 101

Figura 53: Estágios 1 e 2 na evolução do Vulcão do Paredão. Representação da morfologia da ilha antes do vulcanismo. O tracejado indica a posição atual dos depósitos. .... 104

Figura 54: Estágios 3 e 4 da evolução do Vulcão do Paredão, de início da atividade Havaiana. O tracejado indica a posição atual dos depósitos. .... 105

Figura 55: Estágio 5 da evolução do Vulcão do Paredão. No modelo geológico são representados os derrames de olivina nefelinito gerados pela atividade havaiana. As setas pretas indicam a porosidade dos derrames em macro, micro e nanoescala. No canto superior direito, observa-se a proporção de minerais normativos. .... 106

Figura 56: Estágios 6 e 7 de vulcanismo estromboliano na evolução do Vulcão do Paredão, com a construção do cone de escórias. .... 107

Figura 57: Estágio final da evolução do Vulcão do Paredão. No modelo geológico está representada metade do cone de escórias preservado. As setas pretas indicam a porosidade dos depósitos piroclásticos em macro, micro e nanoescala. No canto superior direito, observa-se a proporção de minerais normativos. .... 108

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Descrição dos tipos de depósitos vulcânicos. Modificado de Cas & Wright (1987), McPhie (1993) e Sommer et al. (2003). .....	28
Tabela 2: Descrição dos estilos eruptivos magmáticos e seus produtos. Modificado de Sommer et al. (2003) e Gill (2010). Ilustrações extraídas de Encyclopædia Britannica (2006). .....	40
Tabela 3: Revisão das premissas da estratigrafia de sequências quando aplicadas às rochas vulcânicas. ....	43
Tabela 4: Exemplo do código de fácies proposto por Miall (1977). ....	44
Tabela 5: Tipos de querogênio e material fonte. ....	54
Tabela 6: Valores de porosidade em percentual (%) e de permeabilidade em milidarcy (md) que qualificam um reservatório de óleo de acordo com Hyne (2012). .....	56
Tabela 7: Tabela de pontos amostrados. ....	61
Tabela 8: Tabela de litofácies do Vulcão do Paredão. ....	71
Tabela 9: Descrição e interpretação das associações de litofácies. ....	76
Tabela 10: Resultado de elementos maiores (% em peso) e elementos traço (ppm), não recalculados para 100%, com Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> representando o ferro total. ....	90
Tabela 11: Percentual dos diferentes tipos de porosidade, porosidade total e de fenocristais dos derrames do Vulcão do Paredão. ....	98

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
1.1	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	17
1.2	PREMISSAS E HIPÓTESE	18
1.3	JUSTIFICATIVA	19
1.4	OBJETIVOS	19
1.5	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	20
<b>2</b>	<b>CONTEXTO GEOLÓGICO</b>	<b>22</b>
<b>3</b>	<b>CONCEITOS BÁSICOS DE VULCANOLOGIA</b>	<b>28</b>
3.1	CLASSIFICAÇÃO DE DEPÓSITOS VULCÂNICOS	28
3.2	CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE DERRAMES BÁSICOS	29
3.3	DEPÓSITOS VULCANOCLÁSTICOS PRIMÁRIOS	32
3.3.1	Depósitos autoclásticos	32
3.3.2	Depósitos piroclásticos	34
3.4	ESTILOS ERUPTIVOS	39
<b>4</b>	<b>PRINCÍPIOS DA ESTRATIGRAFIA</b>	<b>41</b>
4.1	CONCEITOS BÁSICOS	41
4.2	ESTRATIGRAFIA DE SEQUÊNCIAS APLICADA A SUCESSÕES VULCÂNICAS	42
<b>5</b>	<b>POROSIDADE E PERMEABILIDADE</b>	<b>46</b>
5.1	POROSIDADE	46
5.2	PERMEABILIDADE	50
5.3	ESTUDOS DE CASOS	51
<b>6</b>	<b>SISTEMAS PETROLÍFEROS</b>	<b>53</b>
6.1	ROCHAS GERADORAS	53
6.2	ROCHAS RESERVATÓRIOS	55
6.3	ROCHAS SELOS E ARMADILHAS ( <i>TRAPS</i> )	56
<b>7</b>	<b>METODOLOGIA E ESTRATÉGIAS DE AÇÃO</b>	<b>58</b>
7.1	ETAPA PRÉ-CAMPO	58
7.1.1	Revisão bibliográfica	58
7.1.2	Sensoriamento remoto	58
7.2	ETAPA DE CAMPO	58

7.2.1 Seções colunares.....	58
7.2.2 Estimativa visual e registro fotográfico da macroporosidade.....	59
7.2.3 Amostragem.....	59
7.3 ETAPA PÓS-CAMPO.....	61
7.3.1 Preparação de amostras.....	61
7.3.2 Tratamento dos dados de campo.....	63
7.3.3 Petrografia.....	63
7.3.4 Aquisição e tratamento de dados geoquímicos.....	64
7.3.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	66
7.3.6 Integração dos dados.....	68
<b>8 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>69</b>
8.1 ESTRATIGRAFIA.....	69
8.1.2 Litofácies.....	69
8.1.3 Associação de litofácies.....	75
8.2 PETROGRAFIA.....	81
8.2.1 Fácies coerentes.....	81
8.2.2 Fácies vulcanoclásticas.....	88
8.3 CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA.....	89
8.4 PADRÕES DE POROSIDADE.....	95
8.4.1 Macroporosidade.....	95
8.4.2 Microporosidade.....	97
8.5 INTEGRAÇÃO DOS DADOS.....	103
<b>9 CONCLUSÃO.....</b>	<b>109</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>111</b>
<b>APÊNDICES.....</b>	<b>119</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>143</b>

## 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

O estudo de sistemas vulcânicos tem sido altamente relevante por conta da importância dos processos vulcânicos como fonte de maturação de matéria orgânica em bacias vulcanossedimentares e também pelo fato de seus produtos apresentarem padrões de porosidade e permeabilidade de rochas reservatórios ou selantes de óleo, gás e água (SCHUTTER, 2003; FAROOQUI et al., 2009; LIU et al., 2013; WANG; CHEN, 2015). Segundo Schutter (2003), são mais de 300 bacias em 20 países com reservatórios não convencionais vulcânicos, como por exemplo, no campo de Daqing, na China, onde as maiores reservas de gás estão em tufos, nas *Deccan Trapps* na Índia, onde a vesiculação e o faturamento dos basaltos condicionaram o armazenamento de óleo (FAROOQUI et al., 2009) e no Brasil, que ocorre um grande volume de rochas vulcânicas no pré-sal, desenvolvidas em porções continentais e colocadas em profundidade durante a separação do supercontinente Gondwana (~126 Ma), recentemente descobertas como reservatórios de hidrocarbonetos (EIRAS; WANDERLEY FILHO, 2003; MOREIRA et al., 2006; CHANG et al., 2008; RICCOMINI et al., 2012).

A porosidade e permeabilidade são características essenciais para a avaliação destes tipos de reservatórios (FAROOQUI et al., 2009; SEUBERT, 2015; MAO et al., 2015; WANG; CHEN, 2015) e podem ser geradas por processos primários, controlados pela composição primária e variação nas litofácies (LIU et al., 2013; WATTON et al., 2014) e secundários, controladas pela tectônica, intemperismo, saturação e/ou movimento de fluidos e diagênese (LIU et al., 2013).

A elevada heterogeneidade dos padrões de porosidade e permeabilidade nas sucessões vulcânicas constitui um desafio para sua caracterização, especialmente quando comparados às sequências siliciclásticas. O estudo destes padrões necessita de uma metodologia e de um modelo que incluam a estruturação

estratigráfica, a associação de litofácies e a composição do vulcanismo, esta última importante no comportamento da viscosidade durante a fase de desgaseificação primária.

Desta forma, o problema principal deste trabalho é compreender os padrões de porosidade do Vulcão do Paredão e seus principais controladores, através de um estudo estratigráfico e petrológico, para a geração de um modelo análogo que contribua para o entendimento da distribuição de fácies e dos padrões de porosidade em reservatórios não convencionais vulcânicos.

## 1.2 PREMISSAS E HIPÓTESE

Tem-se como hipótese que a porosidade dos depósitos do Vulcão do Paredão é elevada e predominantemente primária, controlada principalmente pela variação faciológica, na qual as fácies vulcanoclásticas apresentam maior porosidade do que as fácies coerentes. Esta hipótese foi formulada a partir das seguintes premissas:

- O processo de desgaseificação de rochas vulcânicas pode gerar altos valores de permoporosidade;
- Depósitos geologicamente recentes em geral mantêm estruturas primárias bem preservadas;
- A porosidade primária depende da variação nas litofácies e na composição primária, enquanto a secundária pode ser gerada por processos diagenéticos, intempéricos e tectônicos;
- Fácies piroclásticas bem selecionadas tem porosidade elevada, de comportamento semelhante às rochas sedimentares siliciclásticas;
- Os derrames geralmente apresentam menores valores de porosidade, sendo representada pela porosidade de fraturas.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

A geologia da Ilha da Trindade foi descrita por Almeida (1961) essencialmente sob o ponto de vista geoquímico e geocronológico. A análise da associação de fácies aliada à petrologia e aos padrões de porosidade dos depósitos do Vulcão do Paredão, localizado no sudeste da ilha, permite a criação de um análogo para o melhor entendimento da distribuição lateral de fácies e geometria dos corpos rochosos em reservatórios não convencionais vulcânicos e de outros parâmetros físicos e químicos que possam ser comparados às amostras de testemunhos de sondagem ou perfilagem de poços.

Além disso, a Ilha da Trindade é o ponto mais a leste do território brasileiro em latitude próxima às principais bacias petrolíferas e o Vulcão do Paredão representa o último episódio de vulcanismo no Brasil, com parte do conduto central ainda preservado. Além do fácil acesso à unidade na ilha, o alto grau de exposição e preservação dos depósitos permite o detalhamento das litofácies vulcânicas e da porosidade primária. O estudo petrológico complementar fornece a caracterização geoquímica da unidade e a identificação de variações composicionais nas diferentes litofácies.

### 1.4 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral investigar a estratigrafia, a petrologia e os padrões de porosidade dos depósitos do Vulcão do Paredão. Como objetivos específicos, pretendeu-se:

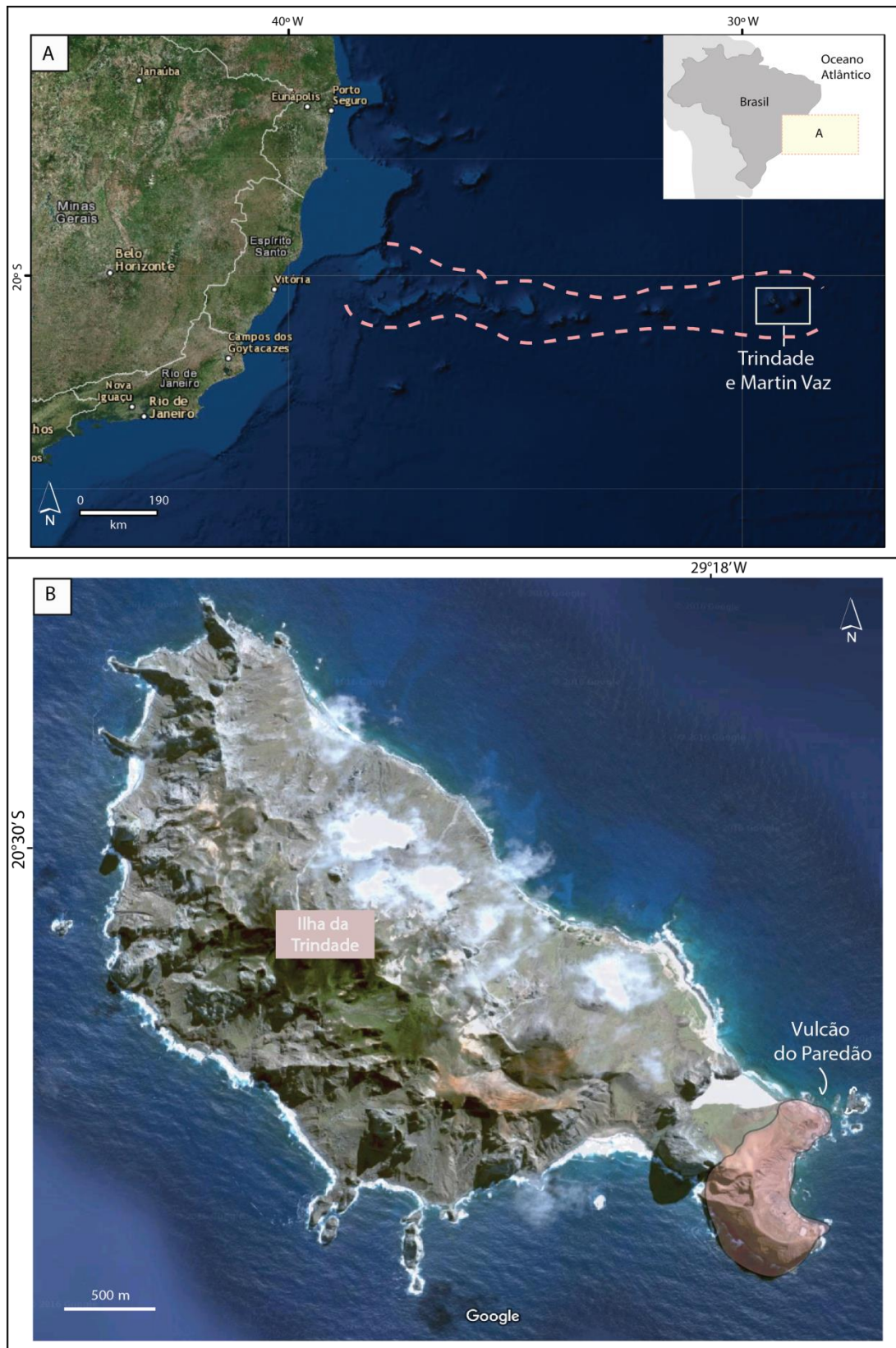
- 1) Descrever e interpretar as litofácies e associações destas para a construção de um arcabouço estratigráfico;
- 2) Caracterizar a petrografia e a geoquímica dos depósitos;
- 3) Quantificar e qualificar a porosidade em macro e microescala;
- 4) Integrar os dados para a compreensão dos principais processos atuantes na geração da porosidade dos depósitos.



## 1.5 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Ilha da Trindade é uma ilha oceânica brasileira localizada no Oceano Atlântico Sul, há aproximadamente 1.200 km da costa do Espírito Santo, entre os paralelos 20° 29' e 20° 32' S e os meridianos de 29° 17' e 29° 21' W (ALMEIDA, 1961, 2002, 2006) (Fig.1A). Faz parte da cadeia vulcânica Vitória-Trindade e é reconhecida como a porção mais a leste do território brasileiro, juntamente ao arquipélago de Martim Vaz, situado 48 km a leste da Trindade. O Vulcão do Paredão localiza-se na porção sudeste da ilha (Fig.1B) e seus depósitos são expostos na Praia das Tartarugas.

**Figura 1:** a) Localização das ilhas da Trindade e Martin Vaz indicada pela caixa branca. O tracejado rosa mostra a extensão da Cadeia Vitória-Trindade. b) Imagem da Ilha da Trindade com a localização da área de estudo indicada na porção Sudeste da Ilha.

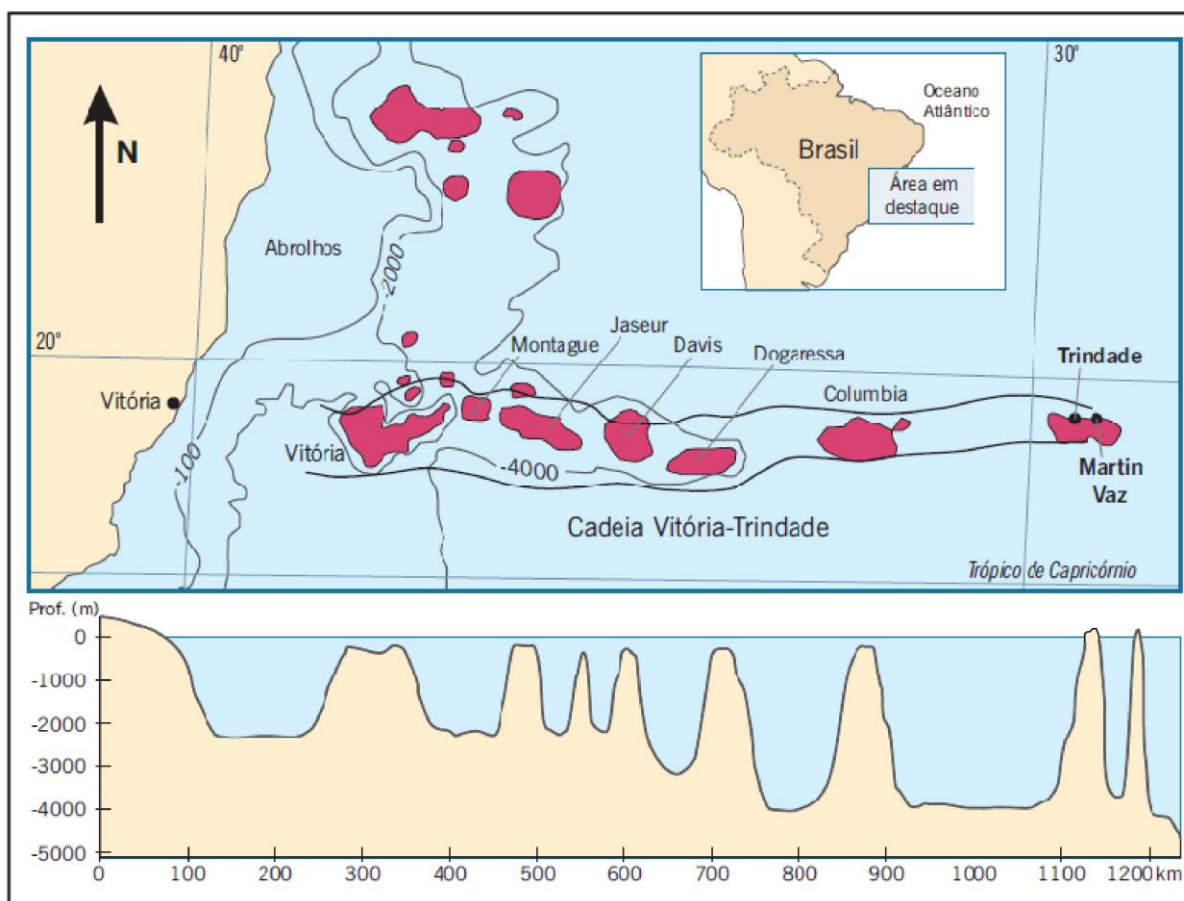


Fonte: Google Earth.

## 2 CONTEXTO GEOLÓGICO

A Ilha da Trindade eleva-se a ~ 5.000 metros do assoalho oceânico, formando um edifício vulcânico com base de cerca de 50 km de diâmetro e uma área em superfície com menos de 13,5 km<sup>2</sup> (ALMEIDA, 2002). A ilha faz parte da cadeia vulcânica submarina Vitória-Trindade, que é alinhada leste-oeste e se estende por cerca de 1000 km, formada por uma série linear de montes submarinos e *guyots* (Fig.2). Esta cadeia está encaixada na Zona de Fraturas Vitória-Trindade.

**Figura 2:** Mapa batimétrico e perfil esquemático da Cadeia Vitória-Trindade.

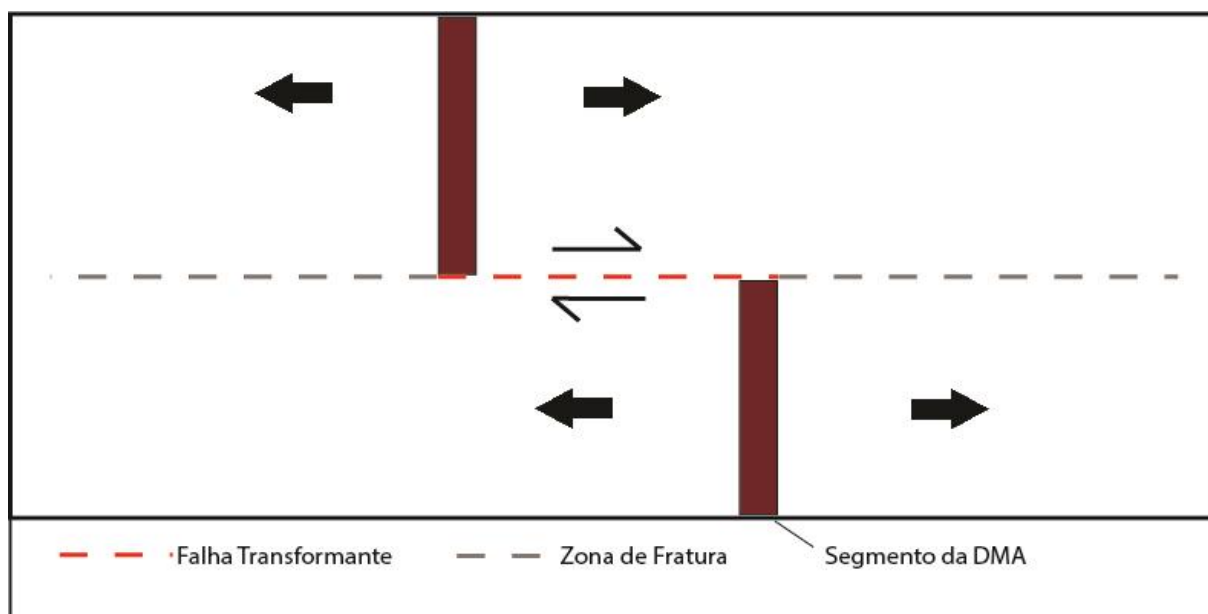


Fonte: Extraído de Almeida (2006) e modificado de Alves et al. (2006).

A Zona de Fraturas Vitória-Trindade foi gerada a partir da formação da Dorsal Meso-Atlântica (ALVES et al., 2006). O rifte da Dorsal Meso-Atlântica é seccionado por falhas transformantes que são ativas entre dois segmentos da dorsal e fora destes se prolongam como zonas de fraturas (WILSON, 1965) (Fig. 3). À medida que ocorreu a deriva para oeste da placa Sul- Americana por conta do espalhamento

do assoalho oceânico, a zona de fraturas Vitória- Trindade passou sobre um *hot spot* ou pluma mantélica (MINSTER et al., 1974; SIEBEL et al., 2000; FODOR; HANAN, 2000), que são pontos de anomalias termais relacionadas ao movimento de convecção do manto (WILSON, 1963), originando uma série de ilhas vulcânicas e montes submarinos. Com a continuidade da cinemática da placa, as ilhas vulcânicas se afastaram do ponto quente, tornando-se inativas, e submergiram formando bancos submarinos de topo truncado pela erosão subaérea e marinha (Fig. 2). Outros exemplos de ilhas vulcânicas formadas por sistemas de hot spot/pluma são as ilhas do Hawaí, Açores e Islândia.

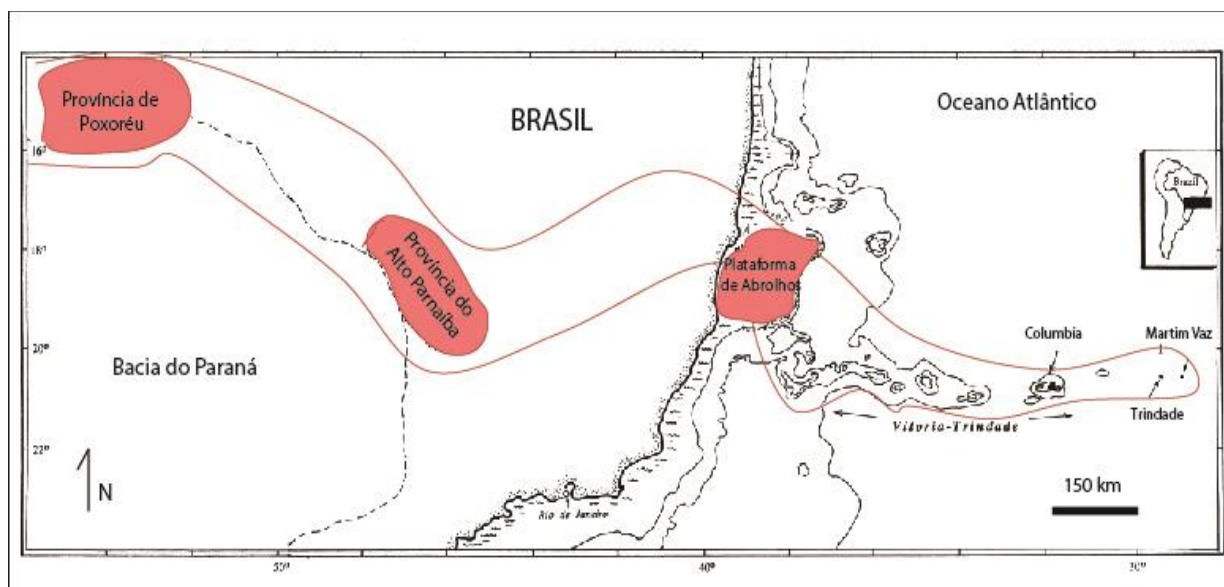
**Figura 3:** Figura esquemática de dois segmentos consecutivos da Dorsal Meso-Atlântica seccionados por uma falha transformante e as zona de fraturas associadas.



Fonte: Modificado de Wilson (1965).

Guazelli e Carvalho (1978) consideraram o prolongamento da cadeia para a porção continental especulativo e de difícil comprovação. No entanto, outros autores (GIBSON et al., 1995, 1997; FODAR, 1989; FODOR; HANAN, 2000) correlacionaram as províncias alcalinas do Alto Parnaíba (MG) e do Poxoréu (GO) de ~85 Ma (GIBSON et al., 1995, 1997) e a plataforma de Abrolhos com idades entre 40-50 Ma (CORDANI; BLAZEKOVIĆ, 1970) ao restante da cadeia por conta da afinidade geoquímica, como a composição isotópica Sr-Nd e Pb e o alto teor de Ti (Fig.4).

**Figura 4:** Mapa que evidencia as Províncias Alcalinas continentais de Poxoréu e do Alto Parnaíba e a plataforma de Abrolhos, interpretados como o traço da pluma da Trindade a oeste da Cadeia Vitória-Trindade.



Fonte: Modificado de Fodor e Hanan (2000).

A atividade vulcânica da ilha teve início no Plioceno Médio com duração até o Pleistoceno (CORDANI, 1970; HANSEN et al., 1998; PIRES et al., 2016) e deu origem ao relevo acidentado com picos de até cerca de 600 metros (Fig. 5). A ilha é constituída por derrames e intrusões e rochas piroclásticas fortemente sódico-alcalinas e subsaturadas em sílica. Almeida (1961) descreveu pela primeira vez a geologia da ilha e identificou cinco unidades distintas: Complexo de Trindade, Sequência Desejado, Formação Morro Vermelho, Formação Valado e Vulcão do Paredão (Fig. 6). A unidade mais antiga da ilha é o Complexo de Trindade, com idades obtidas por datação radiométrica K/Ar de 3,6 a 2,3 Ma (CORDANI, 1970; CORDANI; BLAZEKOVIĆ, 1970; VALENCIO; MENDÍA, 1974), constituída por *necks* e *plugs* fonolíticos e um conjunto heterogêneo de piroclastos. O vulcanismo da Sequência Desejado é constituído por derrames de fonólito e nefelinito intercalados com piroclastos de mesma composição e tem idades entre 2,63 e 1,5 Ma (K/Ar - CORDANI, 1970).



**Figura 5:** Porção norte da ilha da Trindade, na qual é possível observar o relevo acidentado, com indicação do Pico do Desejado com ~ 600 m e o Morro do Monumento com ~570 m.

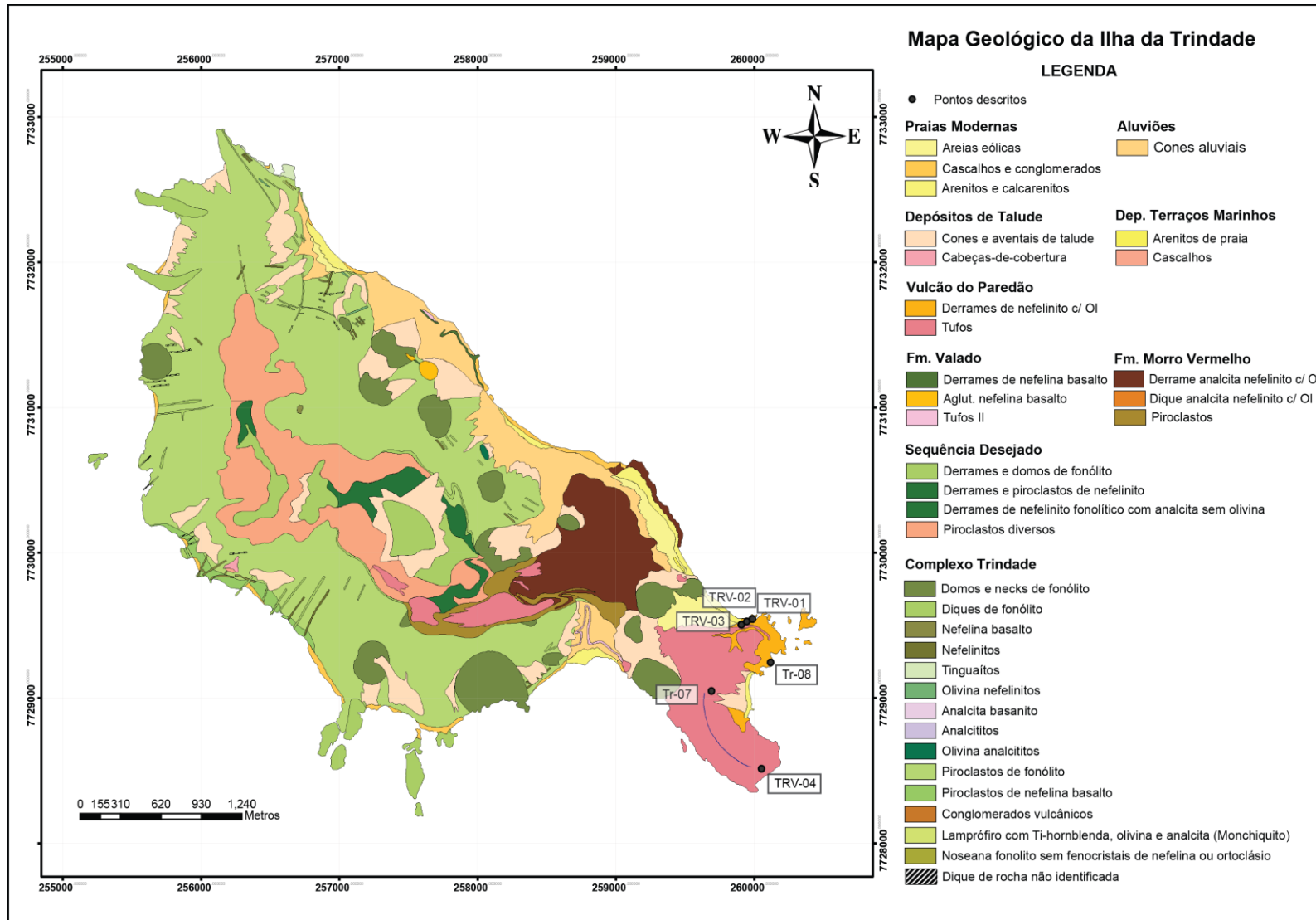


Fonte: Foto do autor, 2016.

Posteriormente, ocorreu uma erupção explosiva com derrames de ankaratrito e olivina nefelinito com biotita, caracterizando a Formação Morro Vermelho. A Fm. Morro Vermelho foi datada por Cordani (1970) por K/Ar em 0.27-0.17 Ma, porém Pires et al. (2016) obtiveram idades de 1.18 e 1.11 Ma (Ar/Ar) em diques nefeliníticos/basaníticos que estariam relacionados ao vulcanismo da Fm. Morro Vermelho ou Valado. A Fm. Valado não pôde ser datada com precisão, porém, através da geomorfologia e disposição dos depósitos, infere-se que esta unidade é contemporânea/posterior ao vulcanismo da Fm. Morro Vermelho. Esta formação é composta por piroclastos e derrames de lava melanefeliníticos (tanbuschiitos - ALMEIDA, 1961), situados entre a praia das Cabritas e dos Portugueses.

O Vulcão do Paredão constitui o último episódio de vulcanismo no Brasil e seus depósitos ocorrem na porção sudeste da Ilha da Trindade, onde é possível observar parte do cone de escórias preservado, como a borda da sua cratera original (Fig. 7A). Recentemente, Pires et al. (2016), dataram uma amostra de olivina nefelinito do Vulcão do Paredão através de sistemática Ar/Ar em  $0.25 \pm 0.19$  Ma.

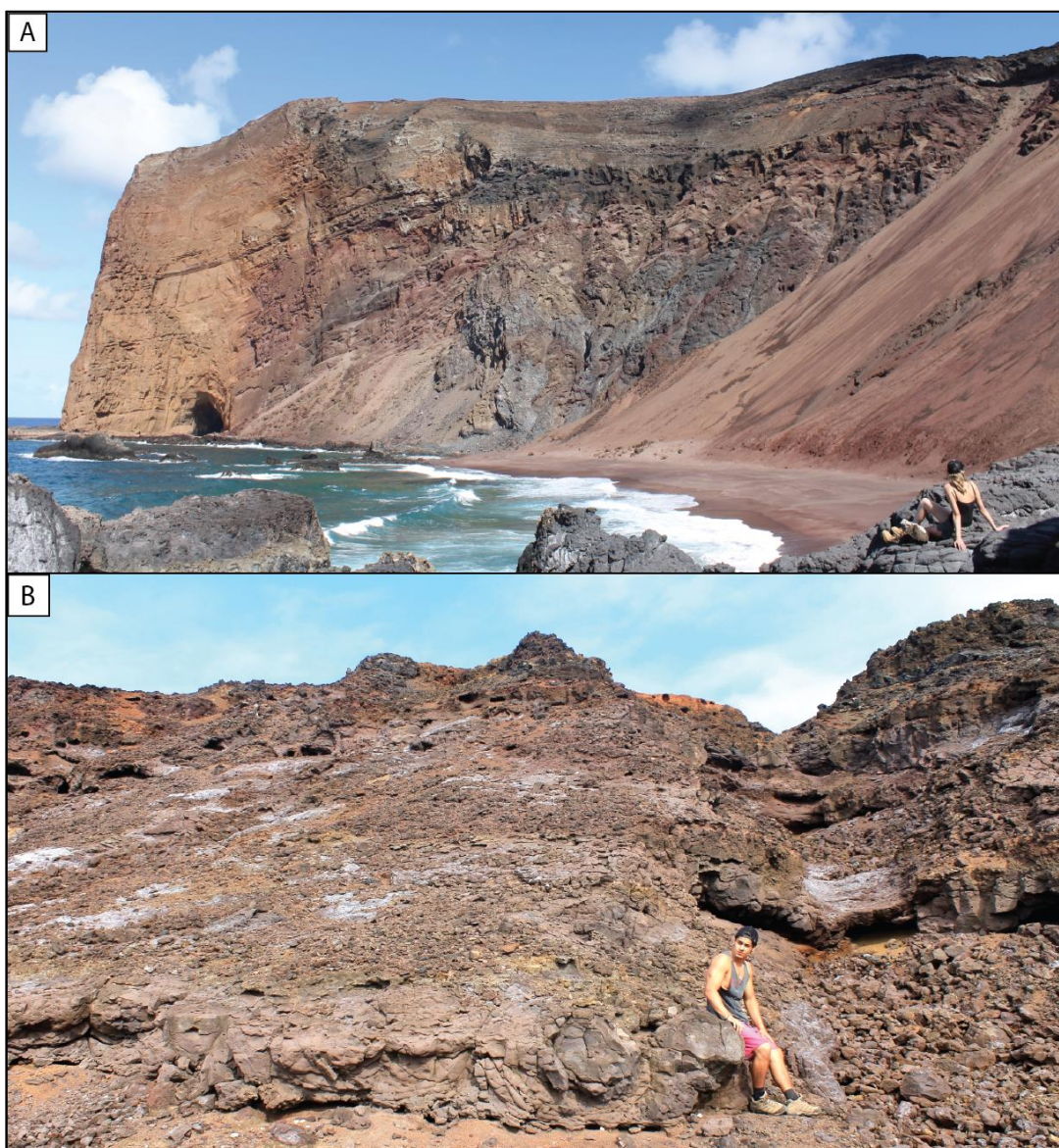
**Figura 6:** Mapa geológico da ilha com a representação das cinco unidades descritas por Almeida (1961), com a localização dos pontos de levantamento de seção colunar e amostragem.



Fonte: Modificado de Almeida (1961) e Luz (2016).

O cone piroclástico formou-se pelo processo de *fire fountaing*, atingindo cerca de 200 metros de altura (ALMEIDA 1961; 2002; 2006), constituído por tufos lapilíticos contendo bombas, blocos, aglomerados e aglutinados de lava nefelinítica, basanítica e tefrítica (MARQUES et al., 1999). Os derrames que ocorrem na Praia das Tartarugas (Fig. 7B) foram descritos por Almeida (1961) como ankaratritos, definidos por Lacroix (1916) em Ankaratra (Madagascar) como rochas caracterizadas pela predominância de minerais ferromagnesianos, tendo olivina como fenocristais, uma matriz microlítica de titanoaugita e com biotita e ilmenita como acessórios, com menos de 10-15% de nefelina.

**Figura 7:** A) Parte do cone de escórias do Vulcão do Paredão; B) Exposição das lavas e rochas piroclásticas na Praia das Tartarugas.



Fonte: Fotos do autor, 2016.



### 3 CONCEITOS BÁSICOS DE VULCANOLOGIA

Esta seção contém uma revisão dos conceitos básicos de vulcanologia que foram aplicados no estudo do Vulcão do Paredão, como a classificação de depósitos vulcânicos, principais características dos tipos morfológicos de derrames básicos, das rochas autoclásticas e piroclásticas e uma breve abordagem sobre os estilos eruptivos.

#### 3.1 CLASSIFICAÇÃO DE DEPÓSITOS VULCÂNICOS

Os depósitos vulcânicos podem ser decorrentes de erupções efusivas ou explosivas. Erupções efusivas geram como produto depósitos texturalmente coerentes, como fluxos de lavas, domos ou intrusões sin-vulcânicas, porém é comum a ocorrência de depósitos vulcanoclásticos do tipo autoclástico associados aos derrames. As erupções explosivas geram depósitos vulcanoclásticos do tipo piroclásticos, através de três mecanismos: fluxo de massa, tração e suspensão. Os depósitos vulcanoclásticos primários podem sofrer ressedimentação sin-eruptiva ou processos de erosão, retrabalhamento e ressedimentação pós-erupção, gerando depósitos sedimentares vulcanogênicos (Tabela 1).

**Tabela 1:** Descrição dos tipos de depósitos vulcânicos. Modificado de Cas e Wright (1987), McPhie (1993) e Sommer et al. (2003).

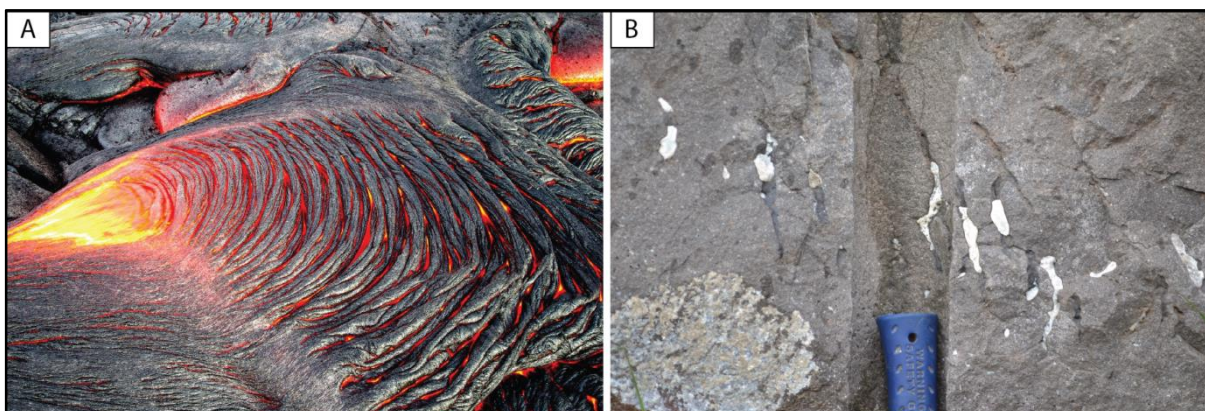
DEPÓSITO VULCÂNICO		DESCRIÇÃO
PRIMÁRIO	Coerente	Derrames, domos ou intrusões sin-vulcânicas formados durante atividade efusiva;
	Autoclástico	Partículas (autoclastos) geradas por fragmentação não explosiva in situ de lavas;
	Piroclástico	Partículas (piroclastos) gerados por erupções explosivas e depositadas por processos vulcânicos primários (queda, fluxo, surge);
SECUNDÁRIO	Ressedimentado sin-eruptivo	Piroclastos ou autoclastos, não modificados texturalmente, que sofreram rápida ressedimentação sin-eruptiva;
	Sedimentar Vulcanogênico	Agregado de partículas derivadas de erosão de depósitos vulcânicos pré-existentes, que não sofreram retrabalhamento significativo durante deposição.

### 3.2 CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE DERRAMES BÁSICOS

Os fluxos de lava podem apresentar uma grande variação na dimensão, geometria e nas características internas e externas. Os principais fatores que afetam a morfologia das lavas são: taxas de efusão, propriedades físicas, como a viscosidade e taxa de deformação de fluxo, e declividade do terreno (CAS; WRIGHT, 1987; ROWLAND; WALKER, 1987; KESZTHELYI; SELF, 1998; CASHMAN; PINKERTON; STEPHENSON, 1998). Em condições subaéreas, os derrames podem desenvolver um amplo espectro de morfologias, sendo os membros finais dos tipos *pahoehoe* e 'A'a.

Os derrames do tipo *pahoehoe* são caracterizados por uma superfície lisa, ondulada ou em corda (Fig.8A), estruturados internamente em um núcleo com vesículas esferoidais que pode desenvolver disjunções colunares e com uma porção basal na qual é comum a ocorrência de vesículas do tipo *pipe* (Fig. 8B) (MACDONALD, 1953; WALKER, 1987; SELF et al., 1998). As lavas *pahoehoe* se comportam como fluidos Newtonianos e podem percorrer longas distâncias. Fluxos menores avançam como o movimento de uma esteira rolante, com a porção superficial sendo transportada para a base do fluxo, enquanto que fluxos maiores se movem pelo avanço de lobos de lava (*lava toes*), com momentos de estagnação e inflação dos lobos (CAS; WRIGHT, 1987; CASHMAN; MANGAN, 2014).

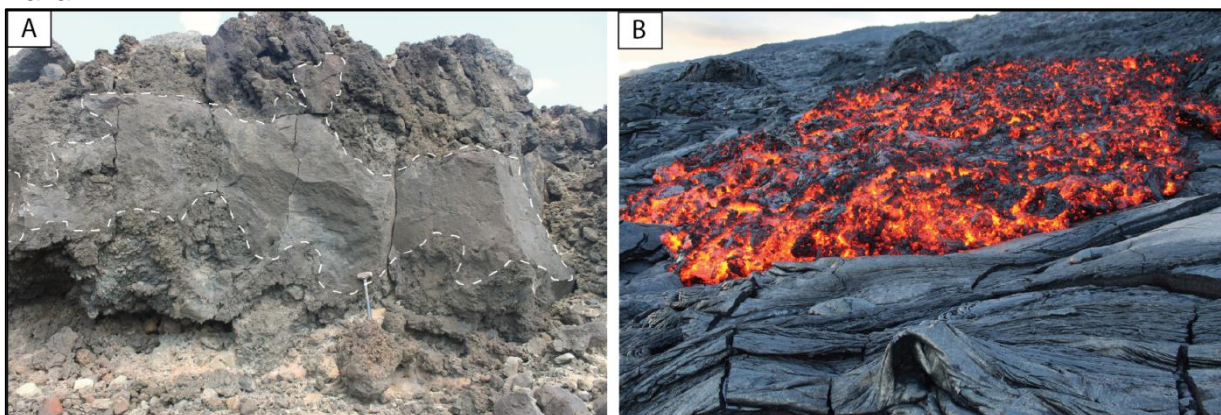
**Figura 8:** A) Derrame do tipo *pahoehoe* com superfície em corda do vulcão Kilauea, Havaí. B) Vesículas do tipo *pipe* preenchidas por calcita na base de derrame *pahoehoe* do Grupo Serra Geral em Santa Cruz do Sul, Brasil.



Fonte: A) Foto de Leigh Hilbert, 2012. B) Foto de Daniele Giordano, 2014.

Os derrames do tipo 'A'a (Fig.9A) são geralmente mais espessos do que os *pahoehoe* e avançam mais lentamente (CAS; WRIGHT, 1987). São caracterizados por um núcleo maciço com vesículas irregulares esparsas, comumente estiradas na direção do fluxo, e por topo e base brechados (MACDONALD, 1953; DURAIWAMI et al., 2014). As zonas de brecha são compostas por fragmentos de escória de diversos tamanhos, decorrentes da fragmentação do topo do derrame durante o resfriamento e avanço da lava (Fig.9B), gerando transporte do material fragmentado para a porção basal através do efeito *caterpillar* (movimento de esteira rolante). Estes derrames são sistemas abertos, que se formam sob altas taxas de efusão ou/e gradiente topográfico acentuado (MACDONALD, 1953; PINKERTON; SPARKS, 1976; ROWLAND; WALKER, 1987).

**Figura 9:** A) Derrame 'A'a da Fm. Valado na Ilha da Trindade, Brasil. O tracejado limita o núcleo maciço das zonas de brecha no topo e na base; B) Fragmentação do topo do derrame 'A'a durante o avanço da lava sobre derrame *pahoehoe* no vulcão Kilauea, no Haváí.



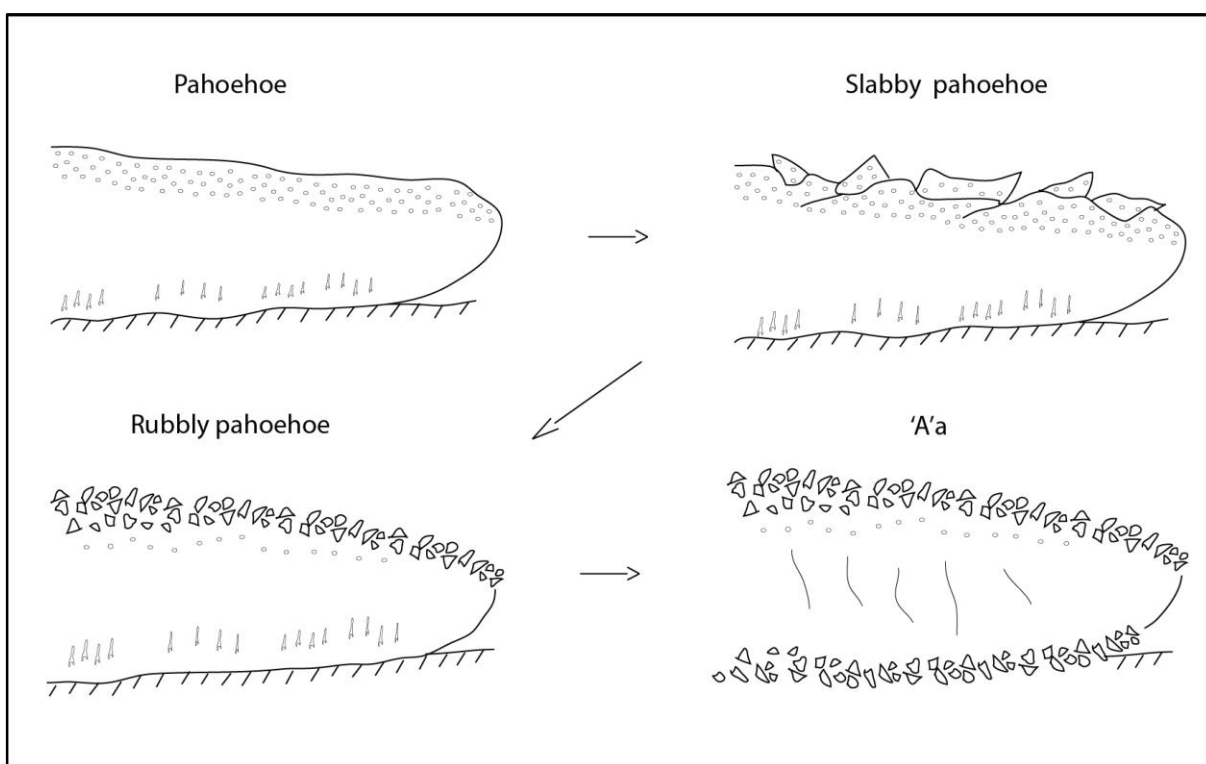
Fonte: A) Foto do autor, 2016; B) Foto de Alan Cressler, 2005.

Peterson e Tilling (1980) descreveram a transição *pahoehoe* - 'A'a (Fig.10) como uma relação inversamente proporcional entre viscosidade e taxa de deformação do fluxo, que depende de fatores como taxa de resfriamento, cristalinidade e perda de voláteis. Desta forma, se a viscosidade da lava é baixa, uma alta taxa de deformação é necessária para o início da transição. Alguns tipos transicionais como *slabby pahoehoe* e *rubby pahoehoe* foram bem documentados em alguns estudos, como na Província Vulcânica de Deccan, na Índia (DURAIWAMI; DOLE; BONDRE, 2003; DURAIWAMI; BONDRE; MANAGAVE, 2008; DURAIWAMI et al., 2014) e na Islândia (GUILBAUD et al., 2005). Estes dois

tipos morfológicos são estruturados em um núcleo típico de uma lava *pahoehoe* e diferem na sua porção de topo.

O topo de uma *slabby pahoehoe* consiste em uma série de placas finas de alguns metros de comprimento, pouco espaçadas, decorrentes da quebra da crosta superior do derrame durante a passagem do fluxo de lava quente sob a crosta já solidificada (GUILBAUD et al., 2005; DURAI SWAMI; DOLE; BONDRE, 2003; DURAI SWAMI et al., 2014), enquanto que uma *rubbly pahoehoe* tem a porção superior brechada, constituída por fragmentos extremamente vesiculados de tamanhos variados, decorrente da fragmentação do topo do derrame por conta do aumento nas taxas de efusão e/ou declividade do terreno (KESZTHELYI; THORDARSON, 2000; GUILBALD et al., 2005; DURAI SWAMI; BONDRE; MANAGAVE, 2008; DURAI SWAMI et al., 2014).

**Figura 10:** Transição *pahoehoe* - 'A'a com os tipos intermediários *slabby* e *rubbly pahoehoe*.



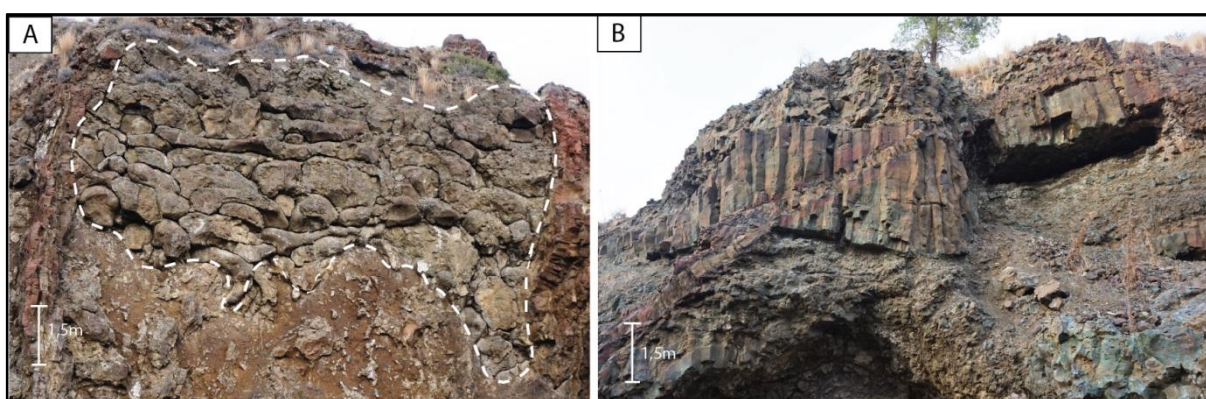
Fonte: Modificado de Duraiswami et al. (2014).

Em condições subaquosas, as lavas básicas podem formar *pillow* lavas (lavas em almofada) (Fig.11A) ou fluxos tabulares maciços mais espessos (*sheet flows*) (Fig.11B). As *pillow* lavas são pequenos tubos de lava que em seção perpendicular ao fluxo têm formato que lembra almofadas. São estruturadas em uma crosta



externa vítrea gerada quando a lava entra em contato com a água e um núcleo mais cristalino, com fraturas radiais e concêntricas e as cavidades entre as *pillow* lavas (*interpillow*) podem ser preenchidas por palagonita (JONES, 1968; HARGREAVES; AYRES, 1979). O contraste térmico da lava com a água pode gerar o rompimento da crosta externa vítrea e a fragmentação da *pillow* lava, dando origem a depósitos hialoclastíticos. Este tipo de derrame é formado sob baixas taxas de efusão e pode transicionar para fluxos tabulares maciços quando a taxa de efusão é maior (BALLARD; HOLCOMB; ANDEL, 1979).

**Figura 11:** *Pillow* lavas e derrames tabulares do ofiolito de Troodos, no Chipre; A) *Pillow* lavas destacadas pelo tracejado, sobre zona de brecha hialoclastítica; (B) Derrame tabular com o desenvolvimento de disjunções colunares na porção central.



Fonte: fotos do autor, 2014.

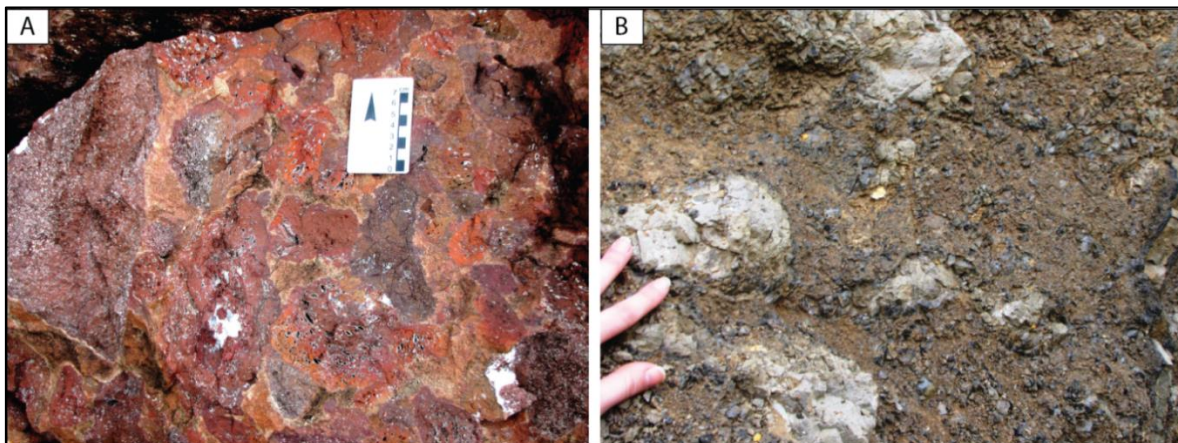
### 3.3 DEPÓSITOS VULCANOCLÁSTICOS PRIMÁRIOS

Os depósitos vulcanoclásticos primários podem ser classificados de acordo com McPhie (1993) em autoclásticos (autobrechas e hialoclastitos) e piroclásticos (queda, *surge* e fluxo).

#### 3.3.1 Depósitos autoclásticos

Os depósitos autoclásticos podem ser decorrentes da fragmentação de derrames subaéreos (autobrechas) ou subaquosos (hialoclastitos) (Fig.12) e classificados de acordo com a granulometria, conforme ilustrado na figura 14. Estes depósitos são monomíticos, de textura porfírica ou afanítica e comumente apresentam textura *jigsaw-fit*, lembrando as peças de um quebra-cabeça.

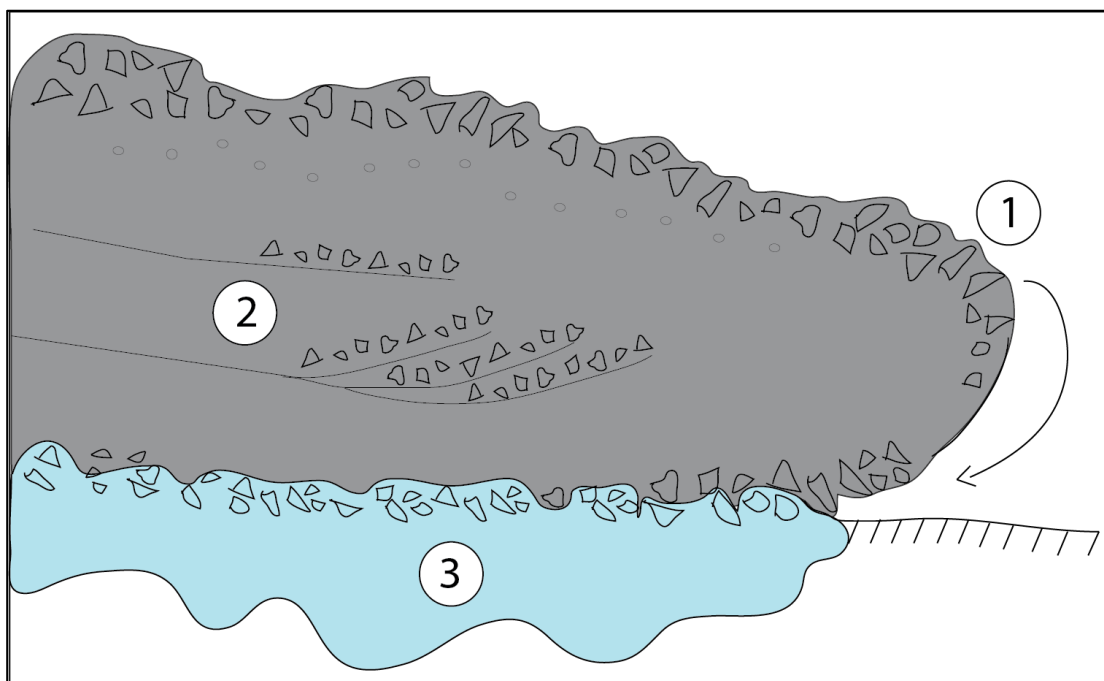
**Figura 12:** A) Autobrecha composta por fragmentos de lava bem vesiculados de tamanhos variados e com textura *jigsaw-fit*. Topo de derrame *rubbly pahoehoe* do Grupo Serra Geral, em Santa Cruz do Sul –RS; B) Brecha hialoclastítica das *pillow* lavas do ofiolito de Troodos, no Chipre.



Fonte: fotos do autor, 2014.

As autobrechas são compostas por clastos angulosos, de tamanhos variados, geralmente escoriáceos. A proporção de clastos menores que 2 mm é baixa e a presença de fragmentos de cristais isolados não é comum (MCPHIE, 1993). De acordo com Loock, De Vries e Hénot (2010), as autobrechas podem se formar de três formas distintas ilustradas na figura 13: 1) fragmentação da superfície do derrame por aumento da viscosidade e transporte para a base; 2) fragmentação rúptil das porções laterais, basais e internas do derrames por cisalhamento simples e 3) fragmentação freatomagmática da base do derrame por interação lava/água.

**Figura 13:** Mecanismos de formação de autobrecha: 1) Rompimento da crosta superficial do derrame e transporte para a base; 2) Fragmentação por cisalhamento simples; 3) Fragmentação freatomagnética.



Fonte: Modificado de Loock, De Vries e Hénot (2010).

Os hialoclastitos são compostos por clastos blocosos com superfície curvilinear e margens vítreas ou devitrificadas e o interior pode ser vítreo ou cristalino. Geralmente, ocorre abundante material entre os fragmentos com tamanho entre areia muito grossa a grânulo (1-4 mm) e é comum a ocorrência de fragmentos de cristais isolados (MCPHIE, 1993).

### 3.3.2 Depósitos piroclásticos

Os depósitos piroclásticos são produtos de erupções explosivas, compostos por fragmentos juvenis, cristais e fragmentos líticos. Os fragmentos são classificados de acordo com a granulometria em cinza (<2 mm), lúpili (2 – 64 mm) e bloco/bomba (>64 mm) (FISCHER, 1966; WALKER, 1971; SCHMID, 1981; CAS; WRIGHT, 1987). Os depósitos inconsolidados são denominados de tefra, enquanto que as rochas piroclásticas (consolidados) são classificadas através do tamanho de grão e dependem do grau de seleção. Os depósitos unimodais bem-selecionados podem ser classificados como tufo, lapilito ou brecha piroclástica (Fig.14) e os depósitos

polimodais mal-selecionados podem ser classificados utilizando uma combinação dos termos propostos para os unimodais (FISHER, 1966) (Fig.15).

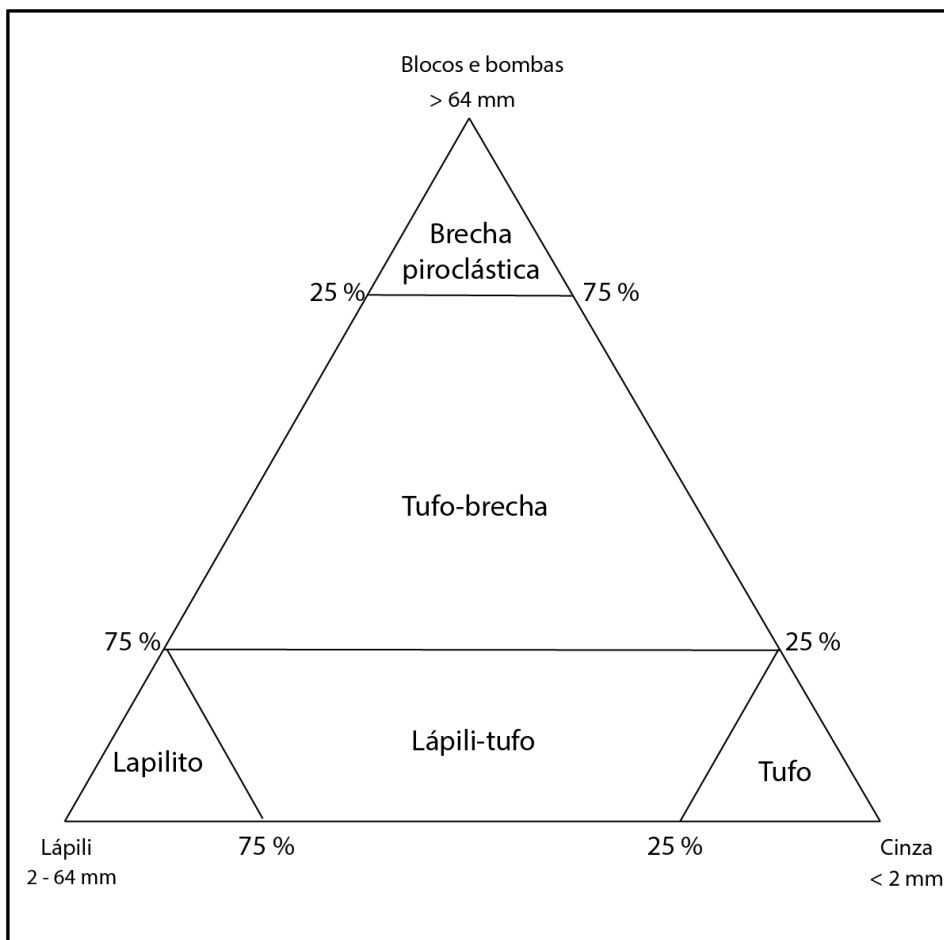
**Figura 14:** Classificação de rochas autoclásticas e piroclásticas (depósitos unimodais bem-selecionados) com base na granulometria.

TAMANHO DE GRÃO	DEPÓSITOS AUTOCLÁSTICOS		DEPÓSITOS PIROCLÁSTICOS	
	AUTOBRECHAS	HIALOCLASTITOS	INCONSOLIDADOS (TEFRA)	CONSOLIDADOS (ROCHAS PIROCLÁSTICAS)
< 1/16 mm	?	Hialoclastito fino	Cinza fina	Tufo fino
1/16 - 2 mm		Arenito hialoclastítico	Cinza grossa	Tufo grosso
2 - 4 mm	Autobrecha granular	Hialoclastito granular	Tefra lapilítica	Lapilito
4 - 64 mm	Autobrecha	Brecha hialoclastítica		
> 64 mm	Autobrecha grossa	Brecha hialoclastítica grossa	Tefra de bomba/bloco	Brecha pitroclástica

Fonte: Modificado de Fischer (1961), Schimd (1981) e McPhie (1983).



**Figura 15:** Classificação granulométrica para depósitos piroclásticos primários polimodais.



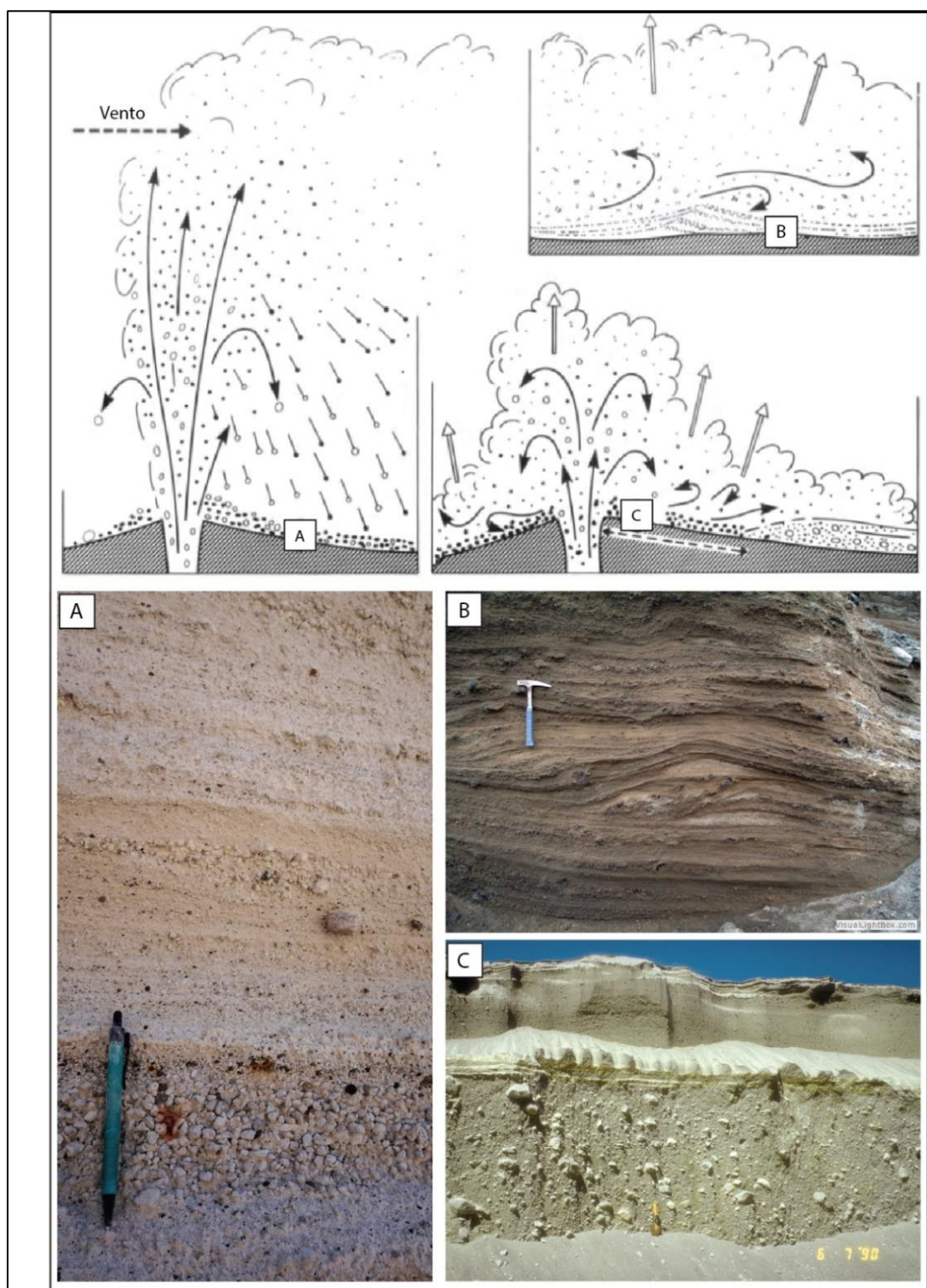
Fonte: Modificado de Fisher (1966) e Sommer et al. (2003).

Os depósitos piroclásticos podem ser de três tipos de acordo com o principal mecanismo de transporte dos fragmentos: queda, *surge* ou de fluxo (SPARKS; WALKER, 1973). Os depósitos de queda (Fig.16A) têm a suspensão como principal mecanismo de transporte e são formados quando a coluna de erupção se expande pela ação dos gases e as partículas carregadas na coluna assentam gravitacionalmente. São bem selecionados e ocorrem como camadas tabulares, com estratificação plano-paralela ou maciças. Os depósitos de *surge* (Fig.16B) são formados quando há uma baixa concentração de partículas que se movem como um fluxo altamente expandido tendo a tração como principal mecanismo de transporte. Geralmente são bem a moderadamente selecionados e apresentam estruturas sedimentares trativas como, por exemplo, estratificação cruzada. Os depósitos de fluxo (Fig.16C) ocorrem quando há alta concentração de partículas que se movem como um fluxo quente, sendo o principal mecanismo de transporte o fluxo de massa.

São depósitos com grau de seleção moderado a baixo, com camadas irregulares, por vezes lenticulares, e geralmente maciças. Ignimbritos são depósitos de fluxo piroclástico constituídos predominantemente por púmice (DRUITT, 1998).

Os depósitos de *surge* e de fluxo são reconhecidos como membros finais de correntes de densidade piroclástica (PDCs – *pyroclastic density currents*) (FISHER; SCHMINCKE, 1984; CAS; WRIGHT, 1987). As PDCs são misturas heterogêneas de partículas vulcânicas e gases que se deslocam de acordo com as suas densidades em relação ao fluido circundante (geralmente a atmosfera) e pela ação da gravidade (DRUITT, 1998). Podem ser geradas por colapso de uma coluna de erupção, desintegração explosiva de magma e rochas em um conduto vulcânico, a partir de explosões laterais ou de avalanches quentes derivadas de domos de lava. Os membros finais podem estar presentes em um mesmo fluxo de corrente de densidade piroclástica, como um fluxo piroclástico basal denso (fluxo) e outro superior diluído (*surge*) (FISHER, 1995), transicionando verticalmente e continuamente dentro da PDC.

**Figura 16:** Tipos de depósitos piroclásticos e mecanismo de transporte ilustrado no desenho. As setas pretas indicam o movimento das partículas e as brancas a expansão do gás. A) Depósitos de queda de púmices com estratificação plano-paralela da erupção Minoica, em Santorini; B) Depósitos de surge da base do cone de cinzas de Vatnsfell com antidunas, na Islândia; C) Depósitos de fluxo do vulcão Redoubt no Alaska.




Fonte: Modificado de Walker (1983) e Cas e Wright (1987). A) Foto do autor, 2015; B) Foto de Tobias Weisenberger, 2010; C) Foto de C. Neal, 1990.

### 3.4 ESTILOS ERUPTIVOS

As erupções vulcânicas podem ser dos tipos magmática, hidromagmática e freáticas e o estilo eruptivo é determinado por diversos fatores físicos e químicos como a temperatura, viscosidade, velocidade de ascensão e teor de cristais e voláteis no magma (CAS; WRIGHT, 1987; SCHMINCKE, 2004; GILL, 2010). As erupções magmáticas (Tabela 2) são caracterizadas pela exsolução e expansão de voláteis magmáticos, com pouca participação de fluidos externos, produzindo grandes quantidades de púmice/escórias e *shards*.

As erupções freatomagmáticas ocorrem pela interação do magma/lava com águas superficiais. O superaquecimento dessa água gera gases que rapidamente se expandem e provocam a fragmentação simultânea do magma. Como produtos são gerados pirocastos com alta variação na vesicularidade e abundância de litoclastos. As freáticas são erupções nas quais os gases responsáveis pela explosão são gerados pela ação do calor do magma da água em subsuperfície, sem a incorporação do magma na erupção. Desta forma, ocorre a emissão de uma grande quantidade de vapor associada a uma pequena proporção de ejetólitos não juvenis.

**Tabela 2:** Descrição dos estilos eruptivos magmáticos e seus produtos. Modificado de Sommer et al. (2003) e Gill (2010). Ilustrações extraídas de Encyclopædia Britannica (2006).

Estilo Eruptivo	Descrição	Produtos
<p><b>Havaiano</b></p> 	<p>Ocorre em magmas de baixa viscosidade e baixo teor de voláteis. Caracterizada por fluxos de lava e jatos de lava incandescente lançados no ar, fenômeno conhecido como <i>fire fountaining</i>.</p>	<p><i>Spatter</i> cones, vulcão em escudo, fluxos de lava, levées.</p>
<p><b>Estromboliano</b></p> 	<p>Erupções intermitentes que ocorrem em magmas basálticos ou andesíticos pelo rompimento de grandes bolhas de gás na porção superior dos condutos vulcânicos.</p>	<p>Cones de escória.</p>
<p><b>Vulcaniano</b></p> 	<p>Erupções pequenas e curtas, mas cíclicas, que geralmente ocorrem em magma mais viscoso (andesitos e dacitos) e supersaturado em voláteis. São formadas colunas de erupção de 5-10 km e plumas de convecção de cinzas.</p>	<p>Crateras.</p>
<p><b>Pliniano</b></p> 	<p>Ocorre em magmas silicosos e com alto teor de voláteis e é o maior e mais violento estilo eruptivo. A liberação de gases e piroclastos pode gerar colunas de erupção com até 50 km.</p>	<p>Estratovulcões, crateras, caldeiras.</p>

## 4 PRINCÍPIOS DA ESTRATIGRAFIA

Esta seção tem como objetivo apresentar conceitos da estratigrafia de sequências, bem como a aplicação destes para a análise de sucessões vulcânicas, com a finalidade de prover embasamento teórico para o estudo estratigráfico do Vulcão do Paredão.

### 4.1 CONCEITOS BÁSICOS

Definida por Van Wagoner et al. (1987) como o estudo da relação das rochas dentro de um arcabouço cronoestratigráfico, a estratigrafia de sequências objetiva subdividir o preenchimento de uma bacia sedimentar em pacotes de rochas geneticamente relacionadas, limitados por superfícies de erosão ou não-deposição e por suas conformidades correlatas.

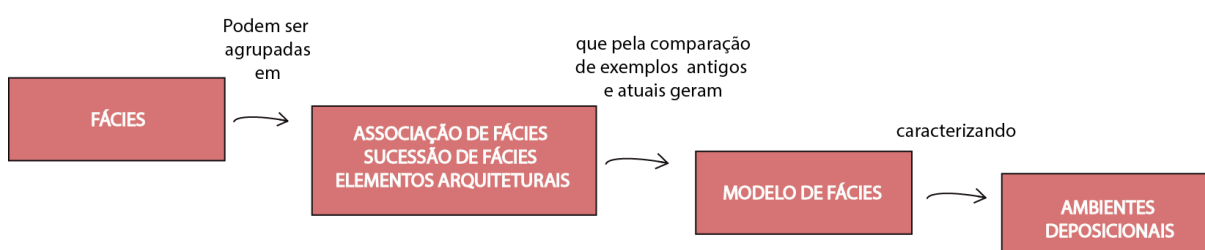
A estratigrafia de sequências sedimentares tem como premissas básicas a ciclicidade das sucessões e a variação do nível relativo do mar (NRM) ao longo do tempo, função da tectônica e eustasia, e o influxo sedimentar como controles do preenchimento de uma bacia. A variação do NRM controla a maior ou menor disponibilidade de espaço para o acúmulo de sedimentos (espaço de acomodação) em um determinado ponto no tempo.

A unidade fundamental da estratigrafia de sequências é a *sequência*, que é limitada por discordâncias e suas conformidades correlatas (MITCHUM, 1977). Uma sequência pode ser subdividida em *tratos de sistemas* (BROWN; FISCHER, 1977) que são um conjunto de sistemas deposicionais contemporâneos, definidos pela sua posição dentro da sequência e seus padrões de empilhamento.

Os estratos depositados em um mesmo intervalo temporal têm um conjunto de características particulares que os distinguem dos adjacentes, resultantes de uma combinação de litologia, estruturas sedimentares e biológicas. Este conjunto ímpar de características descritivas foi definido como *fácies* (MIDDLETON, 1978; SELLEY, 1978; WALKER, 1984). *Fácies* geneticamente relacionadas entre si podem ser agrupadas em *associações de fácies* (COLLINSON, 1969), ou ainda em uma *sucessão de fácies*, na qual ocorre uma variação gradual em uma direção (lateral ou vertical) de um ou mais parâmetros faciológicos específicos. Algumas associações

de fácies tornam-se recorrentes e típicas de determinado ambiente deposicional, constituindo um *elemento arquitetural* de tal ambiente. Segundo Allen (1983), elementos arquiteturais são subdivisões morfológicas de grande escala de sistemas deposicionais, caracterizados pela associação e geometria de fácies e pelos processos deposicionais. Através da comparação das associações e sucessões de fácies e elementos arquiteturais de sistemas antigos e atuais, é possível gerar um *modelo de fácies* que caracteriza um *sistema deposicional* específico (FISHER; MCGOWAN, 1967) (Fig. 17).

**Figura 17:** Esquema que correlaciona os conceitos básicos da estratigrafia de sequências.



Fonte: Modificado de Walker e James (1992).

## 4.2 ESTRATIGRAFIA DE SEQUÊNCIAS APLICADA A SUCESSÕES VULCÂNICAS

Devido à ampla variedade de tipos de rochas e processos em terrenos vulcânicos, a interpretação da origem das sucessões vulcânicas e suas relações estratigráficas podem ser bastante complexas (CAS; WRIGHT, 1987). Através de uma abordagem de descrição, documentação e interpretação semelhante às sequências sedimentares foi possível uma melhor compreensão dos ambientes e processos vulcânicos.

Tanto a estratigrafia de sequências sedimentares quanto a de vulcânicas utilizam análogos para a comparação de sucessões, o que permite uma perspectiva de escala e a comparação das características semelhantes e distintas entre o modelo e a sucessão real. Além disso, em ambas há a necessidade de estabelecer elementos de referência que auxiliem na interpretação da distribuição espacial das fácies (proximais/distais), como por exemplo, a linha de costa no estudo de sistemas plataformais e o centro eruptivo nos sistemas vulcânicos.



Nos ambientes sedimentares há um equilíbrio dinâmico que torna fácil a previsão da sucessão de fácies, que geralmente é característica de um ambiente deposicional específico. Nas sucessões vulcânicas a identificação de um modelo previsível se torna mais difícil, por conta da aleatoriedade dos eventos em termos temporais e espaciais, de intensidade e volume de material produzido. Por mais que eventos individuais gerem depósitos que sirvam para um modelo de fácies geral, isto não se aplica a sucessão vulcânica como um todo.

Por conta da existência de poucos estudos acerca do tema, algumas premissas e conceitos básicos da estratigrafia de sequências sedimentares precisam ser revistos quando aplicados às sequências vulcânicas, como por exemplo, a ciclicidade dos eventos, dependência da variação do NRM e do influxo sedimentar (Tabela 3).

**Tabela 3:** Revisão das premissas da estratigrafia de sequências quando aplicadas às rochas vulcânicas.

<b>PREMISSAS</b>	<b>ESTRATIGRAFIA SEDIMENTAR</b>	<b>ESTRATIGRAFIA VULCÂNICA</b>
<b>Ciclicidade das sucessões</b>	Eventos cíclicos (transgressão/regressão).	Eventos predominantemente episódicos.
<b>Espaço de acomodação</b>	Necessário para o acúmulo de sedimentos; função da variação do NRM (tectônica x eustasia).	Não é necessário para a ocorrência de depósitos vulcânicos primários, não depende da variação do NRM.
<b>Influxo sedimentar/vulcânico</b>	Depende da taxa de denudação.	Depende do estilo eruptivo e da taxa de denudação (termos epiclásticos).

Uma etapa importante para a construção de um arcabouço estratigráfico em sistemas vulcânicos é a análise faciológica. Selley (1978) indicou 5 elementos essenciais para a descrição de fácies: geometria, litologia, estruturas sedimentares,



paleocorrentes e conteúdo fossilífero. Este trabalho levou em consideração apenas os três primeiros elementos, tendo em vista que as rochas vulcânicas em geral não preservam fósseis e que as paleocorrentes/paleofluxo não são relevantes em escala faciológica, apenas na associação e sucessão de fácies, por serem obtidas através das estruturas que compõem as diferentes fácies.

A descrição de fácies para depósitos piroclásticos e epiclásticos segue os critérios adotados para as rochas sedimentares, havendo diferença apenas na terminologia utilizada para a descrição do tamanho das partículas (cinza, lúpili, bombas e blocos). Nos derrames e rochas autoclásticas, a descrição de fácies envolve outras características. A litologia é descrita com base nos constituintes principais dos derrames (cristais, fenocristais, micrólitos, vidro vulcânico, vesículas e xenólitos) e a descrição das estruturas considera feições como o grau de massividade, fraturas, disjunções colunares/tabulares, padrões de vesiculação, estrias de fluxo e bandamento.

Através da análise de depósitos fluviais, Miall (1977) criou um código de fácies constituído pelo identificador de fácies (granulometria + estrutura) seguido pela descrição da litofácies, das estruturas sedimentares e de uma possível interpretação do processo (Tabela 4).

**Tabela 4:** Exemplo do código de fácies proposto por Miall (1977).


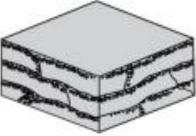

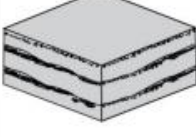
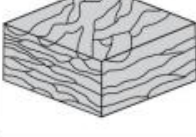
<b>Código de fácies</b>	<b>Litofácies</b>	<b>Estruturas sedimentares</b>	<b>Interpretação</b>
<b>Sh</b> (Sand horizontal)	Arenito fino a grosso, podendo ser conglomerático.	Estratificação plano-paralela.	Fino - Regime de fluxo inferior Grosso – Regime de fluxo superior.

Seguindo a lógica proposta por Miall (1977), Cas e Wright (1987) descreveram uma tabela de classes de tamanho de grão de rochas vulcanoclásticas, suas características diagnósticas e possível processo de origem. Rossetti et al. (2014) e Barreto et al. (2014) propuseram um código de fácies e associação destas para os derrames básicos subaéreos da Província Ígnea Paraná-Etendeka na Calha de Torres e no perfil Santa Cruz-Herveiras, respectivamente.

A partir da descrição e associação de fácies, Jerram (2002) propôs a arquitetura de fácies para derrames em províncias basálticas continentais. Alguns anos depois, Single (2004) hierarquizou a arquitetura de fácies em micro, meso e

macro-escala. A micro-escala consiste no estudo das heterogeneidades intrafaciológicas, a meso nas heterogeneidades geométricas dos derrames em um campo de derrames, e a macro na arquitetura de fácies em escala de bacia, através da correlação de seções estratigráficas ou uso de fotogrametria. Waichel et al. (2012) descreveram a arquitetura de fácies para os derrames do Grupo Serra Geral, na calha de Torres (Fig.18). Recentemente, Rossetti et al. (2017) utilizaram esta metodologia para a construção de um arcabouço estratigráfico regional para os derrames da Província Ígnea Paraná-Etendeka. Estes autores elaboraram uma nova proposta estratigráfica que subdivide a sucessão vulcânica de acordo com a arquitetura de fácies, morfologia dos derrames, posição e marcadores estratigráficos aliados às características petrográficas em 4 unidades: Fm. Torres, Fm. Vale do Sol, Fm. Palmas e Fm. Esmeralda, compondo o Grupo Serra Geral. Estes trabalhos servirão como base para o levantamento estratigráfico dos depósitos do Vulcão do Paredão.

**Figura 18:** Arquitetura de fácies vulcânicas descritas por Waichel et al. (2012) na calha de Torres.

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 Escorreácea		derrames 'a'a	10 -15 m	~250 m
Domos de Lava		domos ácidos	até 30 m	~150 m
Tabular Clássica		derrames <i>pahoehoe</i> simples	10 - 20 m	~500 m
Composta Anastomosada		derrames <i>pahoehoe</i> compostos (área de duna) derrames <i>pahoehoe</i> pondeados (áreas de interdunas)	0,3 - 1,0 m até 40 m	100-200 m

Fonte: Tradução extraída de Barreto (2016).

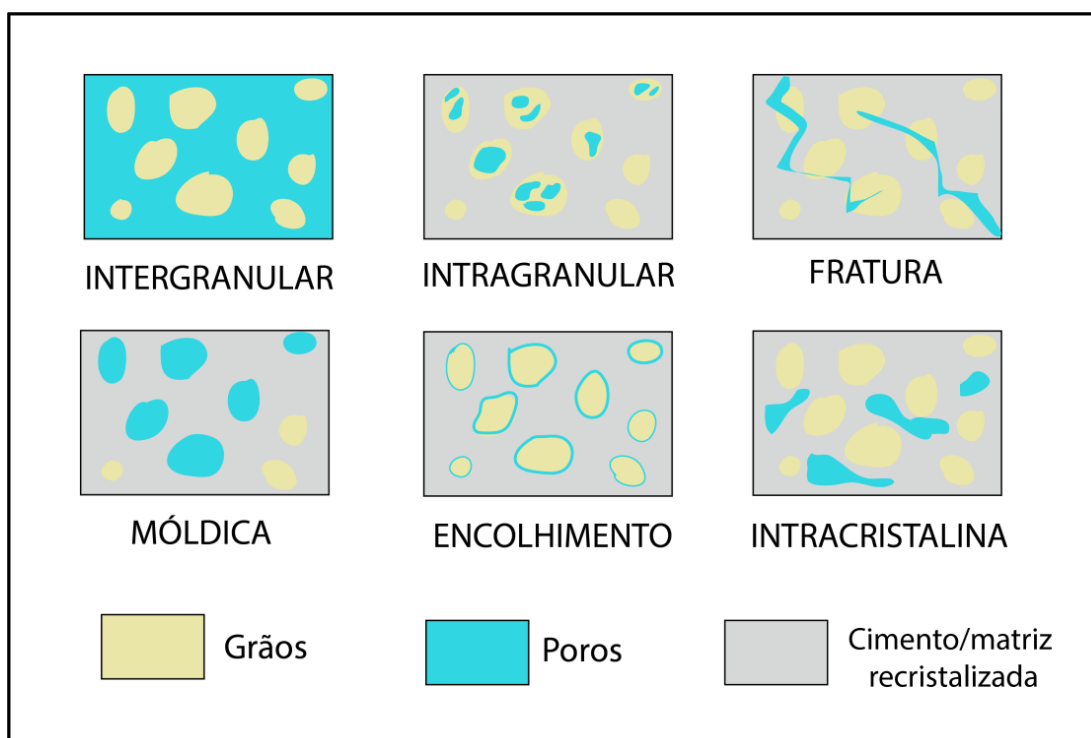
## 5 POROSIDADE E PERMEABILIDADE

Esta seção tem como objetivo revisar conceitos teóricos e abordar exemplos de estudos que discutem padrões de porosidade e permeabilidade em rochas vulcânicas, fatores que influenciam na geração destes padrões e as metodologias aplicadas para o estudo destas propriedades.

### 5.1 POROSIDADE

De acordo com Klobes, Munro e Meyer (2006), a porosidade ( $\phi$ ) de uma rocha é o espaço vazio entre os grãos capaz de armazenar fluidos, matematicamente expressa pela razão entre o volume de espaços vazios ( $V_v$ ) sobre o volume total ( $V_t$ ) da rocha ( $\phi = V_v/V_t$ ). Esta fórmula representa a porosidade absoluta, que considera tanto os poros interconectados como aqueles não conectados. A porosidade efetiva é o volume de poros efetivamente disponível para ser ocupado por fluidos livres, ou seja, a relação entre os vazios interconectados e o volume total da rocha.

O desenvolvimento da porosidade em rochas vulcanoclásticas é semelhante às sedimentares siliciclásticas, que pode ser primária, formada durante a deposição, ou secundária, formada por um processo diagenético (ex: dissolução mesodiagenética de carbonatos por  $\text{CO}_2$ , dissolução telodiagenética por água meteórica, dissolução mesodiagenética de feldspatos por solventes orgânicos) (SCHMIDT; MCDONALD, 1979; BJORLYKKE; RAMM; SAIGAL, 1989; SURDAM et al., 1989). A porosidade em rochas particuladas pode ser classificada quanto à morfologia de acordo com Terra (1984) como: intergranular, intragranular, móldica, de encolhimento, de fratura ou intercristalina (Fig.19).

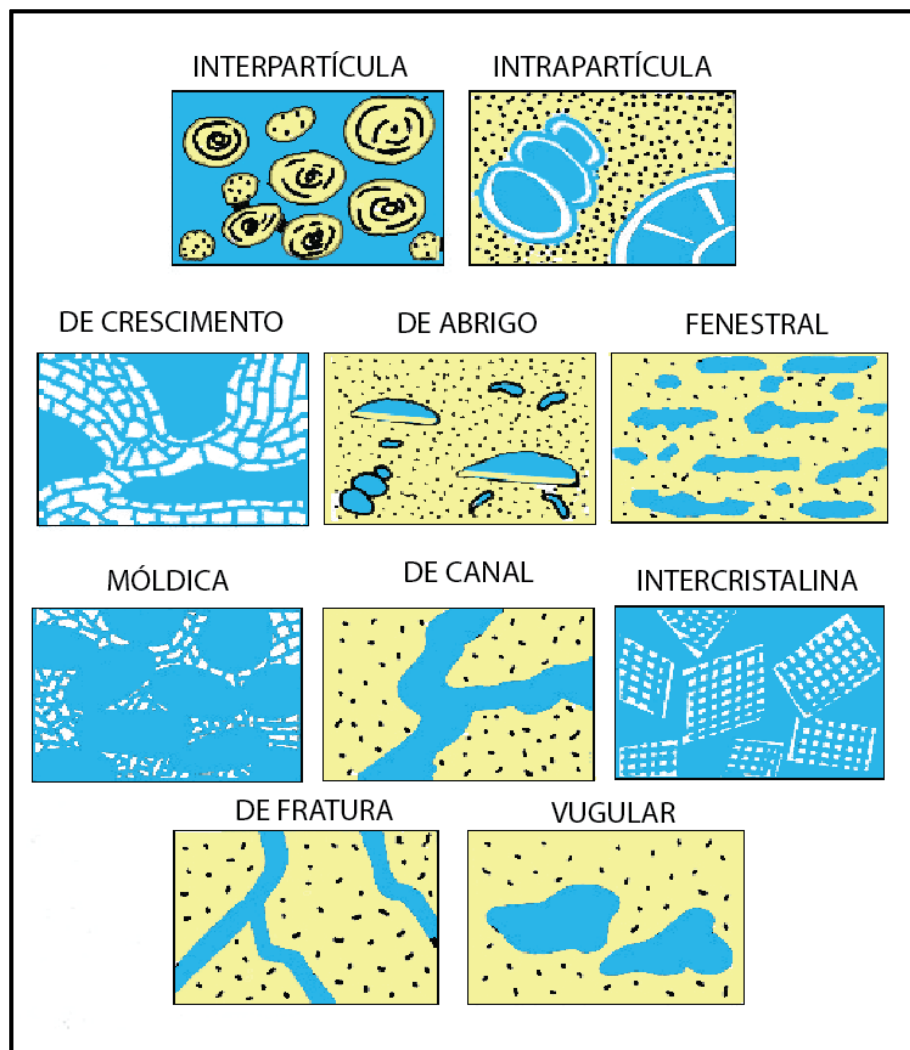
**Figura 19:** Tipos de porosidade em arenitos.

Fonte: Modificado de Terra (1984).

Diferentemente das rochas vulcanoclásticas, a evolução da porosidade nos fluxos de lava apresenta semelhanças maiores com desenvolvimento da porosidade em sistemas carbonáticos. De acordo com Choquette e Pray (1970), nos arenitos a porosidade primária geralmente sofre poucos efeitos da compactação e cimentação, havendo uma pequena redução da porosidade, sem modificação da morfologia ou posição dos poros. Além disso, a porosidade se dá de forma homogênea em relação ao tamanho, forma e distribuição e sofre pouca influência do faturamento da rocha. Em contrapartida, nos carbonatos ocorre intensa obliteração durante a diagênese, geração de novos poros que também são parcial ou totalmente obliterados, com intensa redução na porosidade. A distribuição, forma e tamanho dos poros são muito variáveis e há uma forte influência do faturamento da rocha na geração da porosidade efetiva, características também observadas em derrames.

A porosidade nos carbonatos pode ser seletiva ou não-seletiva em relação à fábrica. Os tipos de porosidade seletiva são interpartícula, intrapartícula, de crescimento, de abrigo, fenestral, mórdica ou intercristalina e os de não-seletiva são de canal, fratura, vugular ou ainda cavernosa (aumento da porosidade vugular) (Fig.20).

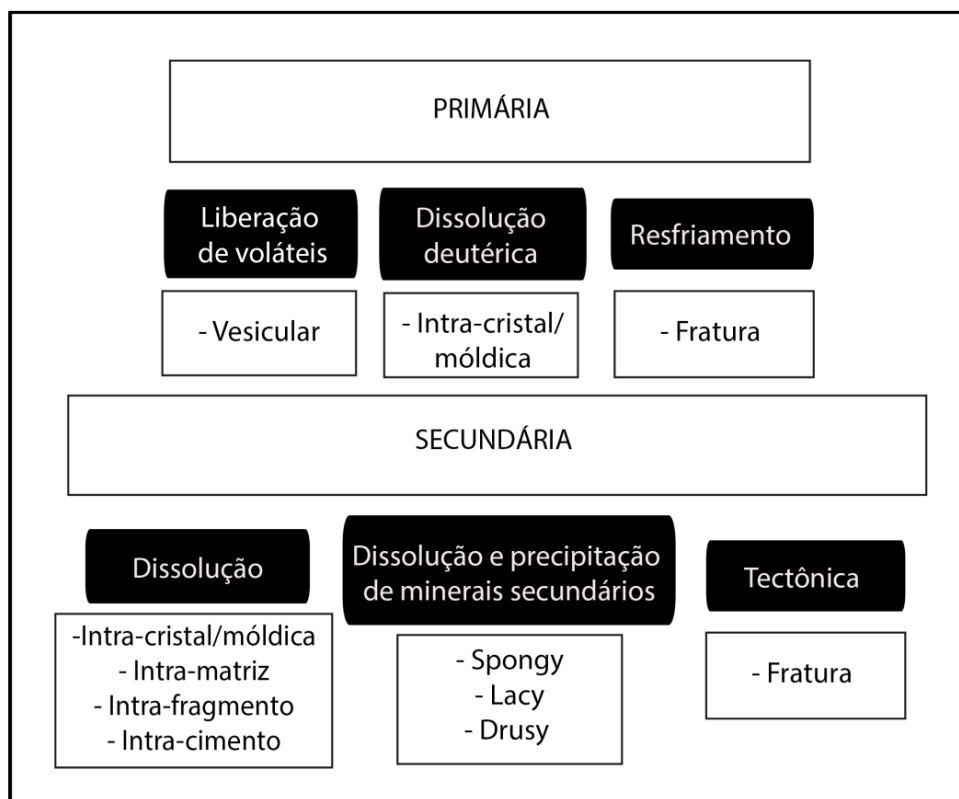
**Figura 20:** Principais tipos de porosidade em carbonatos.



Fonte: Modificado de Choquette e Pray (1970).

Através do estudo da porosidade em rochas vulcânicas desenvolvido por Sruoga e Rubinstein (2007), Barreto (2016) elencou os tipos de porosidade gerados por processos primários e secundários nos derrames do tipo *pahoehoe* e *rubbly* da Província Basáltica Continental Paraná-Etendeka. Tendo estes trabalhos como base, a classificação dos tipos de porosidade em lavas pode ser observada na figura 21.

**Figura 21:** Tipos de porosidade em derrames elencado primeiramente por Sruoga e Rubinstein (2007). Os retângulos pretos representam os processos geradores dos tipos de porosidade.



Fonte: Modificado de Barreto (2016).

A porosidade primária pode ser do tipo vesicular, formada pelo escape de gases durante a colocação da lava, ou intracristalina em peneira a móldica, gerada por dissolução cristalina deutérica, como ocorre, por exemplo, em um plagioclásio com textura em peneira, no qual a fusão do cristal pode ser decorrente do processo primário de desvolatilização do magma, de mistura de magmas, ou descompressão de uma intrusão. As fraturas geradas durante o resfriamento da lava também caracterizam porosidade primária. Além disso, pode ocorrer porosidade primária intercristalina da desgaseificação tardia, gerando textura diktitaxítica ou inter-fragmentos em zona de brecha de derrames *rubbly pahoehoe* ou 'A'a.

A porosidade secundária é gerada principalmente pela dissolução da mineralogia primária, dos tipos intracristalina/móldica ou intra-matriz. Em rochas autoclásticas, pode ocorrer a dissolução de fragmentos de lava caracterizando a porosidade intra-fragmentos ou inter-fragmentos da dissolução da matriz. Em interação de lava com sedimento, a dissolução do cimento da matriz caracteriza o

tipo de porosidade intra-cimento. A porosidade secundária também pode ser gerada pela precipitação parcial de minerais secundários em poros primários (*spongy, lacy, drusy*; BARRETO, 2016) e por fraturas geradas por processos tectônicos pós-vulcânicos.

## 5.2 PERMEABILIDADE

A permeabilidade é a medida da capacidade da rocha em permitir o fluxo de fluidos, expressa em unidades Darcys (D) ou milidarcys (md) (REIS, 2013). Quando existe apenas um fluido saturando a rocha, a permeabilidade é absoluta ( $K_a$ ). Porém, em reservatórios de hidrocarbonetos, sempre há dois ou mais fluidos saturando a rocha. A permeabilidade efetiva ( $K_e$ ) é a permeabilidade de um fluido quando outro está presente. A permeabilidade relativa ( $K_r$ ) é usada para quantificar o transporte simultâneo de duas ou mais fases imiscíveis num meio poroso (HEAVISIDE; BLACK, 1983), sendo a razão entre a porosidade efetiva e a absoluta ( $K_r = K_e / K_a$ ).

Alguns fatores que influenciam no coeficiente de permeabilidade são:

- 1) Granulometria: quanto maiores os grãos, maior o espaço entre eles e mais eles estão conectados.
- 2) Forma dos grãos: quanto mais arredondadas e esféricas as partículas, maior o espaço entre os grãos e a permeabilidade.
- 3) Grau de seleção: Em uma rocha mal selecionada, grãos menores ocuparão o espaço existente entre os maiores, diminuindo a porosidade e permeabilidade.
- 4) Composição mineralógica: Em rochas com alto teor de argilominerais a permeabilidade é mais baixa, já em arenitos constituídos principalmente de minerais silicosos, o valor de permeabilidade é maior.
- 5) Fábrica: A compactação e orientação dos grãos diminui a permeabilidade.
- 6) Fluido: O tipo de fluido que se encontra nos poros influencia na permeabilidade por conta da viscosidade. Quanto mais viscoso, menor a permeabilidade.
- 7) Temperatura: Quanto maior a temperatura, menos viscosos se tornam os fluidos, aumentando a permeabilidade.

Na figura 22 são apresentados valores de permeabilidade obtidos para diferentes tipos de rochas e sedimentos (BEAR, 1972).

**Figura 22:** Classificação de diferentes tipos de sedimentos e rochas em permeável, semipermeável e impermeável de acordo com os valores de permeabilidade obtidos em milidarcy e  $\text{cm}^2$ .

Permeabilidade	Permeável				Semi-permeável				Impermeável				
Areia e cascalho inconsolidados	Cascalho bem-selecionado		Areia / Areia e cascalho bem-selecionado		Areia muito fina, silte, loess e argila								
Argila e m.o. inconsolidados					Turfa		Argila estratificada		Argila inalterada				
Rochas	Rochas intensamente fraturadas				Rochas reservatório de óleo		Arenito fresco		Calcário fresco, dolomito		Granito fresco		
K ( $\text{cm}^2$ )	0.001	0.0001	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$	$10^{-8}$	$10^{-9}$	$10^{-10}$	$10^{-11}$	$10^{-12}$	$10^{-13}$	$10^{-14}$	$10^{-15}$
K (mildarcy)	$10^{+8}$	$10^{+7}$	$10^{+6}$	$10^{+5}$	10,000	1,000	100	10	1	0.1	0.01	0.001	0.0001

Fonte: Modificado de Bear (1972).

### 5.3 ESTUDOS DE CASOS

Diversos autores (FAROOQUI et al., 2009; LIU et al., 2013; SEUBERT, 2015; MAO et al., 2015; WANG; CHEN, 2015) utilizaram a análise estratigráfica aliada a geofísica de poço (raios-gama, resistividade e velocidade de ondas P), petrografia e o uso do porosímetro e permeâmetro para o estudo dos padrões petrofísicos em reservatórios vulcânicos. Becker (2014) caracterizou a porosidade e permeabilidade de três litofácies vulcânicas da Fm. Serra Geral através da técnica da microtomografia de raios X, que permitiu uma boa caracterização do sistema poroso das rochas vulcânicas, mas que subestima os valores de porosidade absoluta, comparado aos obtidos pelo porosímetro.

Wang e Chen (2015) estudaram os reservatórios vulcânicos do Cretáceo na bacia de Songliao, na China, e consideram que a porosidade primária nestas rochas é originada pelo grau de vesiculação, espaços inter e intragranulares, vazios entre os fluxos laminares e fraturas de resfriamento enquanto que a porosidade



secundária é consequência de fraturas e falhas de origem tectônica, dissolução ou alteração, brechas hidrotermais e, ocasionalmente, da recristalização de vidro vulcânico. Estes autores concluíram que, no contexto da bacia de Songliao, os diferentes processos diagenéticos favoreceram maior preservação da porosidade das lavas e ignimbritos soldados do que nas rochas piroclásticas e siliciclásticas e que a alternância destas litologias e da arquitetura de fácies promove uma combinação favorável de rochas reservatórios e selos.

Depósitos de hialoclastitos do Havaí foram estudados por Watton et al. (2014), que correlacionou a mudança nas propriedades petrofísicas com o tipo de alteração e composição mineralógica, mais especificamente com a quantidade de fenocristais de olivina. Nesse trabalho, as zonas preenchidas por phillipsita apresentam uma porosidade melhor do que por zeolita e rochas ricas em fenocristais de olivina tiveram maiores valores de resistividade e de velocidade de ondas P, indicando porosidade reduzida.

## 6 SISTEMAS PETROLÍFEROS

Um sistema petrolífero é definido por Demaison e Huizinga (1994) como um sistema físico-químico que gera e concentra petróleo, constituído por rochas geradoras, reservatórios e selantes. Os principais processos atuantes são a geração de hidrocarbonetos, migração e a formação de armadilhas.

### 6.1 ROCHAS GERADORAS

São definidas como rochas que contêm uma quantidade e qualidade de matéria orgânica (querogênio) adequada e que passa por uma série de reações químicas dependentes da maturação térmica, transformando o querogênio em óleo e gás. Estas rochas geralmente são folhelhos, margas e calcilutitos.

A quantidade de matéria orgânica que caracteriza uma rocha geradora é medida pelo COT (Carbono Orgânico Total), cujo mínimo aceito é de 0,5%, sendo que as mais efetivas têm COT > 3%. Em termos de qualidade, a matéria orgânica pode ser classificada de acordo com McCarthy et al. (2011) em quatro tipos: I, II, III e IV (Tabela 5), sendo que de I para IV o potencial de geração de hidrocarbonetos diminui.

De acordo com Fernandes (2004) e McCarthy et al. (2011), o querogênio de tipo I é originado a partir de algas, ricas em lipídios e, conseqüentemente, com alto teor de hidrogênio e elevado potencial para gerar óleo. O tipo II, encontrado na maioria das rochas geradoras, apresenta uma composição intermédia e deriva predominantemente de fitoplânctons e zooplânctons e também de material de origem continental rico em lipídeos, como esporos e pólenes. O querogênio de tipo III apresenta valores baixos de hidrogênio, rico em compostos orgânicos aromáticos derivados de plantas, com maior potencial para gerar gás do que petróleo. O querogênio de tipo IV, formado por matéria orgânica remobilizada ou altamente oxidada derivada de ambientes mistos, apresenta um potencial praticamente nulo para gerar hidrocarbonetos.

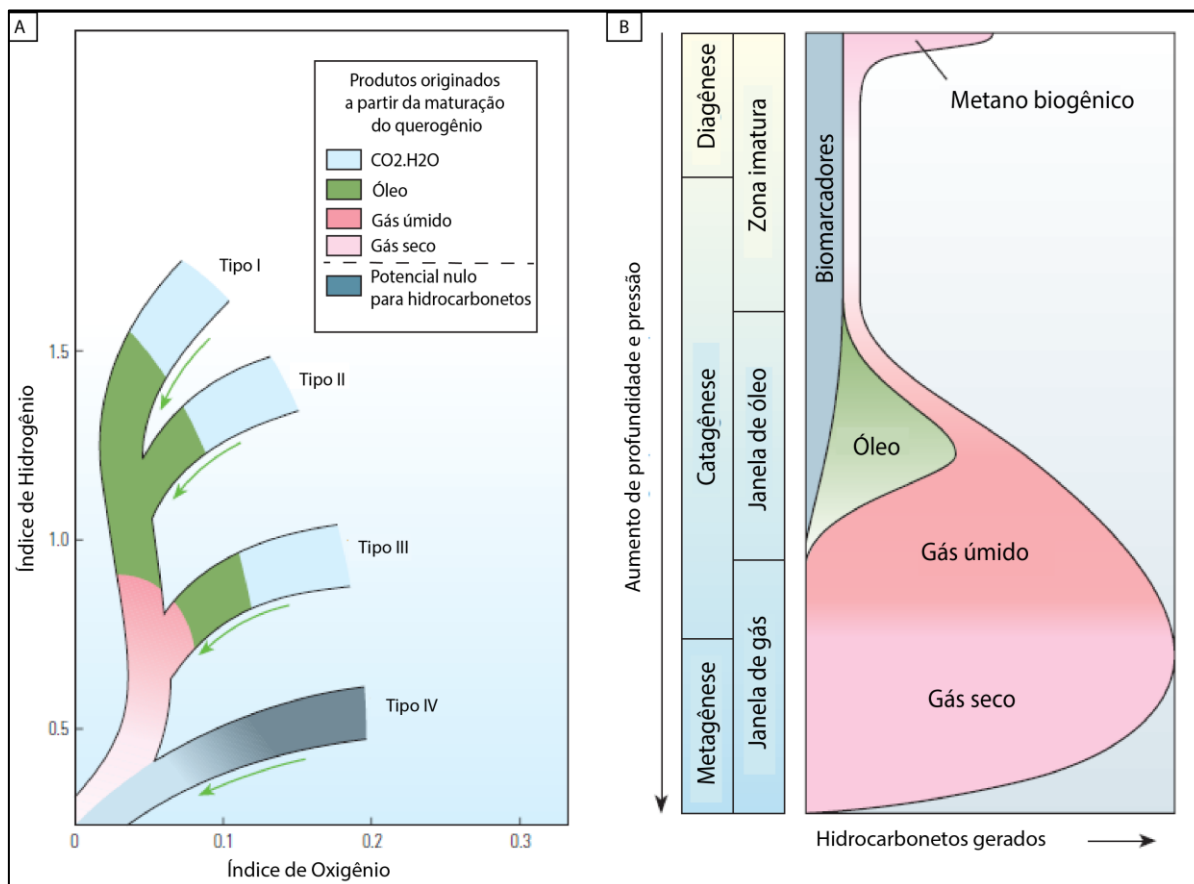
**Tabela 5:** Tipos de querogênio e material fonte.

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

Como as proporções entre os três elementos mais abundantes no querogênio (C, H e O) variam consideravelmente em função da sua origem e evolução, é possível avaliá-lo pelos índices de hidrogênio e oxigênio obtidos na pirólise Rock-Eval. Este procedimento consiste no aquecimento em até 500 °C de 100 mg de amostra pulverizada e subsequente medida dos hidrocarbonetos e CO<sub>2</sub> liberados através de detectores de ionização de chama e de condutividade térmica, respectivamente (LIMA, 2004). Os resultados são obtidos em mg de HC (Hidrocarbonetos)/g de rocha (índice de Hidrogênio – IH) e mg de CO<sub>2</sub>/g de rocha (índice de Oxigênio – IO), e expressos no diagrama Van Krevelen (Fig. 23A) para interpretação. Além da pirólise Rock-Eval, a evolução térmica do querogênio pode ser avaliada petrograficamente através da reflectância da vitrinita.

O mesmo tipo de matéria orgânica pode originar diferentes hidrocarbonetos, dependendo das transformações químicas ocorridas devido à evolução térmica da rocha geradora. A figura 23B demonstra os estágios de evolução do querogênio. Em baixas profundidades, nas quais pressão e temperatura são baixas, o único hidrocarboneto formado é o metano biogênico. Esta é chamada de zona imatura (diagênese). Durante a catagênese, a faixa térmica fica entre 50-150° C, na qual ocorre a maturação do querogênio gerando óleo (janela de óleo) e gás úmido. Com o aumento progressivo do soterramento, ocorre a metagênese, estágio em que somente gás seco é estável.

**Figura 23:** a) Diagrama Van Krevelen modificado, indicando os produtos da maturação do querogênio, que é marcada pelas setas verdes. B) Diagrama da transformação termal do querogênio com aumento da profundidade e pressão. Nota-se a janela do óleo e gás úmido na catagênese e a de gás seco na metagênese.



Fonte: extraído e modificado de McCarthy et al. (2011).

## 6.2 ROCHAS RESERVATÓRIOS

Uma rocha reservatório deve ser capaz de conter e transmitir fluidos. Para isso, é necessário que a porosidade e permeabilidade destas rochas sejam adequadas ao armazenamento e ao fluxo de fluidos. Estas propriedades definem a qualidade do reservatório que é influenciada pela forma e o tamanho dos grãos, o grau de seleção, o empacotamento e a continuidade lateral e vertical da rocha. Hyne (2012) elencou valores de porosidade e permeabilidade que qualificam um reservatório de óleo desde insignificante a excelente (Tabela 6).

**Tabela 6:** Valores de porosidade em percentual (%) e de permeabilidade em milidarcy (md) que qualificam um reservatório de óleo de acordo com Hyne (2012).

Valores de porosidade (%)		Valores de 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		

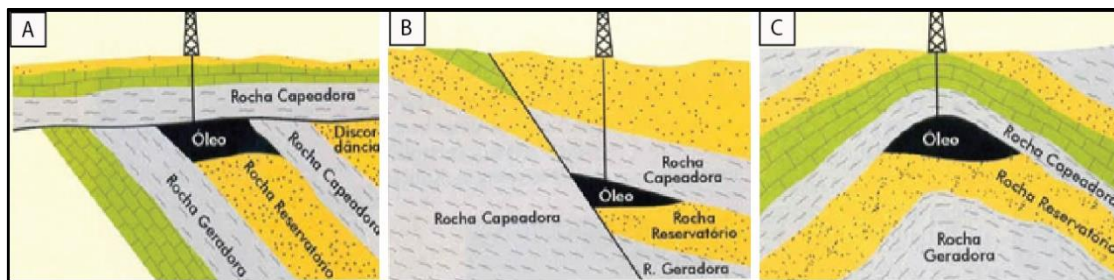
A migração dos hidrocarbonetos dentro da rocha geradora e desta para a rocha reservatório é primária, enquanto que a migração que ocorre dentro da própria rocha reservatório é secundária.

### 6.3 ROCHAS SELOS E ARMADILHAS (*TRAPS*)

Diferentemente das rochas reservatórios, rochas selos devem ser pouco permeáveis para que a migração do óleo seja bloqueada e que este seja concentrado. As armadilhas ou *traps* ocorrem quando a rocha reservatório e selo estão em situação geológica favorável ao acúmulo de hidrocarbonetos e podem ser estruturais, estratigráficas, hidrodinâmicas e mistas.

*Traps* estratigráficas (Fig. 24A) são as primeiras a se formar e podem ocorrer por conta da variação faciológica no sistema deposicional, ocasionando mudança na permeabilidade, por *pinch-outs* mergulho acima, que confina o reservatório, ou ainda por discordâncias. As estruturais (Figs. 24B e 24C) podem estar associadas a estruturas dômicas, anticlinais e falhas. *Traps* hidrodinâmicas ocorrem pelo movimento da água em subsuperfície que dificulta o movimento dos hidrocarbonetos e os retém. Por fim, as mistas incluem aspectos de dois ou até dos três tipos fundamentais combinados.

**Figura 24:** Exemplos de armadilhas. a) *Trap* estratigráfico de discordância angular; b) *Trap* estrutural por falhamento; c) *Trap* estrutural de anticlinal.



Fonte: Extraído de Taioli (2000);

## **7 METODOLOGIA E ESTRATÉGIAS DE AÇÃO**

### **7.1 ETAPA PRÉ-CAMPO**

Na etapa pré-campo foi feita a revisão bibliográfica e utilizadas técnicas de sensoriamento remoto.

#### **7.1.1 Revisão bibliográfica**

A revisão bibliográfica envolveu a leitura de uma série de trabalhos com informações sobre contexto geológico, geocronologia e petrologia da Ilha da Trindade e dos depósitos do Vulcão do Paredão, além de uma revisão dos conceitos de vulcanologia, estratigrafia, padrões de permeabilidade e sistemas petrolíferos. Esta etapa constituiu o embasamento teórico para o desenvolvimento do trabalho.

#### **7.1.2 Sensoriamento remoto**

Técnicas de sensoriamento remoto (ArcGis e Google Earth) foram utilizadas para a confecção de um mapa geológico e para o entendimento da distribuição dos depósitos do Vulcão do Paredão na ilha, essenciais para o desenvolvimento de uma boa etapa de campo.

### **7.2 ETAPA DE CAMPO**

A etapa de campo envolveu a aquisição de dados geológicos dos depósitos do Vulcão do Paredão para a análise estratigráfica, da macroporosidade e coleta de amostras para petrografia, geoquímica e MEV.

#### **7.2.1 Seções colunares**

Uma seção colunar é uma representação gráfica da sucessão de litologias que ocorrem ao longo de uma área específica, acompanhada da descrição litológica e de estruturas, utilizada para a construção de um arcabouço estratigráfico. Para a

análise estratigráfica do Vulcão do Paredão, foram levantadas 4 seções colunares em escala 1:50, sendo 3 delas nos depósitos da Praia das Tartarugas (TRV-01, TRV-02 e TRV-03), espaçadas lateralmente em ~25m, e uma delas no cone de escórias (TRV-04) (Fig. 6) . Em cada seção foram medidas as espessuras das camadas e descritas as diferentes litofácies vulcânicas, com base na cor, mineralogia primária, textura e estrutura (Fig.25). Também foram utilizadas letras à esquerda da seção para a indicação de amostragem e fotos.

### 7.2.2 Estimativa visual e registro fotográfico da macroporosidade

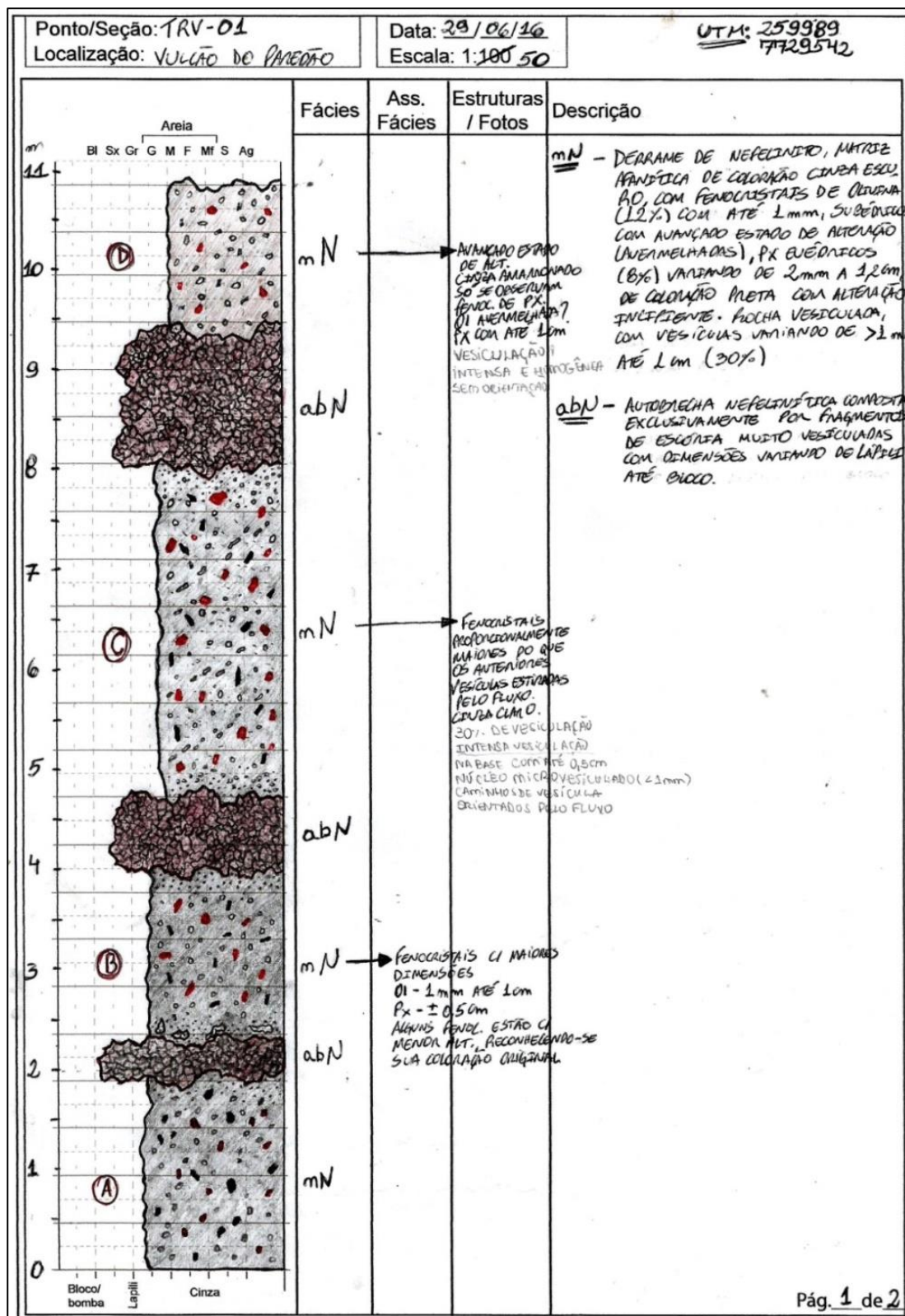
A macroporosidade foi avaliada através de uma estimativa visual quantitativa e qualitativa dos padrões de vesiculação, que envolveu a descrição do tamanho, geometria e distribuição dos poros nas diferentes fácies e dos padrões de fraturamento. Foi feito o registro fotográfico das litofácies, associações de litofácies e dos padrões de vesiculação e de fraturas associados. As atitudes das fraturas foram obtidas com uma bússola Brunton Geotransit F-5010. A descrição destes padrões em macroescala é importante por fornecer dados sobre a porosidade *in situ* (3D), que é complementar e fundamental às análises da microporosidade.

### 7.2.3 Amostragem

A amostragem foi realizada com o uso de marreta e talhadeira e de um GPS Garmin eTrex 10 com precisão de 3 m para a localização das amostras. Os pontos foram amostrados ao longo das seções TRV-01 e TRV-03, com exceção das amostras TR-07 e TR-08 (tabela 7), totalizando 10 amostras (8 de fácies coerentes e 2 de vulcanoclásticas) para petrografia, geoquímica e MEV (microscopia eletrônica de varredura).



**Figura 25:** Representação gráfica feita em campo dos derrames do Vulcão do Paredão através do levantamento de seção colunar no ponto TRV-01, acompanhada da descrição litológica na coluna da direita. Outras informações importantes foram inseridas na seção, como conteúdo de fenocristais e padrões de vesiculação. As letras à esquerda indicam fotos e amostragens.



**Tabela 7:** Tabela de pontos amostrados.

<b>Amostra</b>	<b>UTM (mE)</b>	<b>UTM (mN)</b>	<b>Altitude (m)</b>	<b>Descrição</b>
<b>TRV-01A</b>	259989	7729542	1	Núcleo de derrame nefelinítico
<b>TRV-01B</b>	259989	7729542	3	Núcleo de derrame nefelinítico
<b>TRV-01C</b>	259989	7729542	6	Núcleo de derrame nefelinítico
<b>TRV-01F1</b>	259989	7729542	14	Núcleo de derrame nefelinítico
<b>TRV-01F2</b>	259989	7729542	16	Núcleo de derrame nefelinítico
<b>TRV-03A</b>	259909	7729503	11	Núcleo de derrame nefelinítico
<b>TRV-03B</b>	259909	7729503	13	Núcleo de derrame nefelinítico
<b>TRV-03F</b>	259909	7729503	15	Lapilito
<b>TR-07</b>	259693	7729046	206	Lápili-tufo
<b>TR-08</b>	260120	7729243	10	Núcleo de derrame nefelinítico

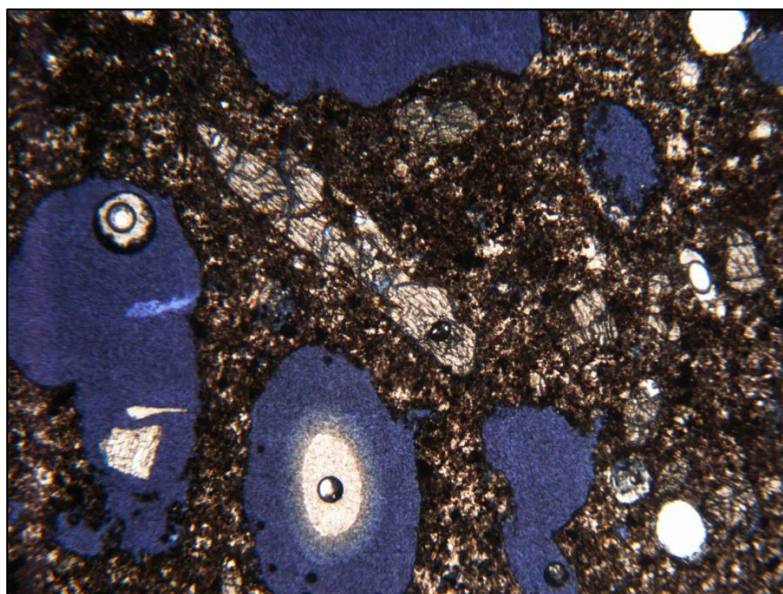
### 7.3 ETAPA PÓS-CAMPO

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, microscopia eletrônica de varredura e a integração final dos dados.

#### 7.3.1 Preparação de amostras

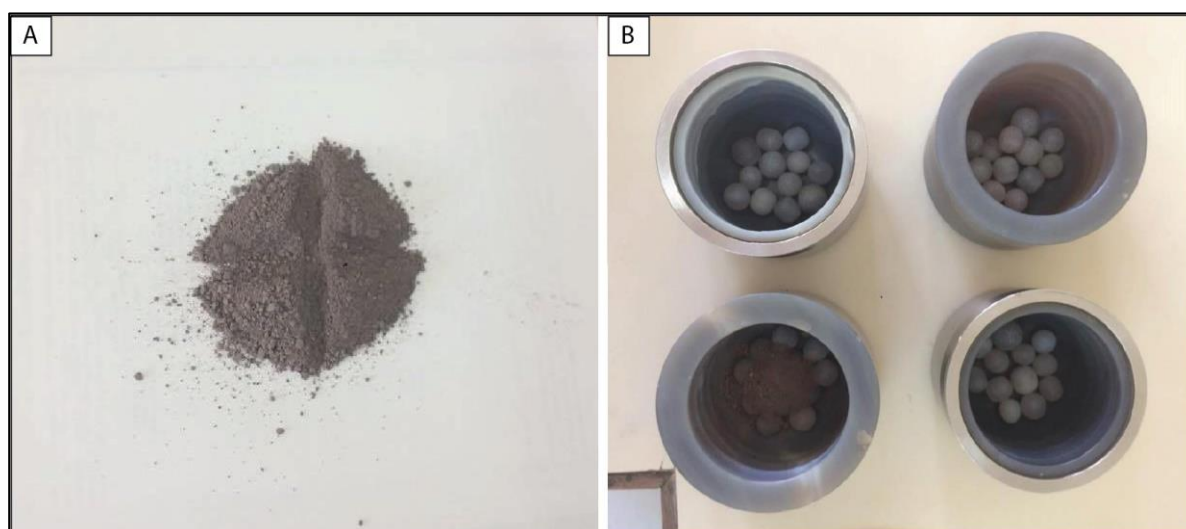
As amostras coletadas foram preparadas para petrografia e geoquímica de rocha total no laboratório de preparação de amostras do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IGEO-UFRGS). As amostras selecionadas para petrografia foram cortadas em uma serra diamantada, para a confecção de lâminas delgadas com 30  $\mu\text{m}$  de espessura e impregnadas com resina azul para análise da microporosidade (Fig. 26). Devido à possibilidade de destruição da amostra TRV-03F por ser altamente porosa, não foi possível serrá-la.

**Figura 26:** Fotomicrografia da lâmina TR-07 impregnada com resina azul à luz natural.



As amostras para análise de química de rocha total foram primeiramente reduzidas ao tamanho cascalho com um martelo e posteriormente ao tamanho areia grossa com o uso do graal. Em sequência, as amostras foram quarteadas (Fig. 27A) e em torno de 20g foram submetidos ao moinho de bolas (Fig. 27B), sendo reduzidas ao tamanho argila. Posteriormente, foram enviadas ao laboratório de análise química de rochas da UFRGS para análise dos elementos maiores, menores e perda ao fogo através de fluorescência de raios X.

**Figura 27:** A) Quarteamento de amostra no tamanho areia grossa. B) Recipientes de ágata dentro dos quais as amostras são colocadas após o quarteamento para serem inseridas no equipamento de moagem.



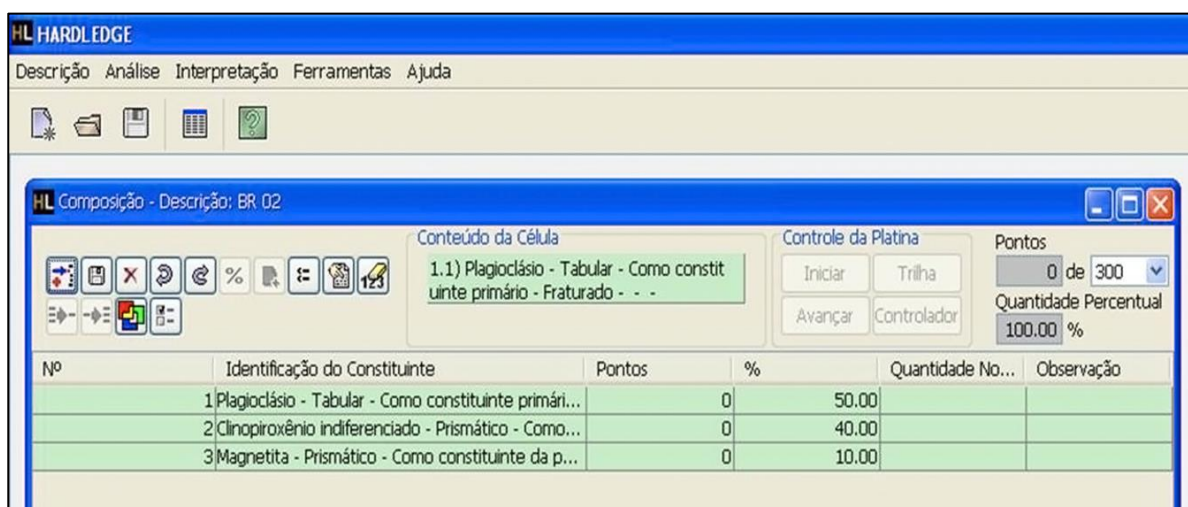
### 7.3.2 Tratamento dos dados de campo

As seções colunares foram digitalizadas e desenhadas através do programa *Adobe Illustrator* juntamente aos padrões de vesiculação. As fotografias representativas das diferentes litofácies e associações de litofácies foram tratadas com *Adobe Photoshop* e colocadas em plates de fotos também com uso do *Illustrator*. O padrão de fraturas foi interpretado através de projeções estereográficas de mesma área, hemisfério inferior, geradas pelo software Stereo 32.

### 7.3.3 Petrografia

A descrição petrográfica das lâminas delgadas impregnadas foi realizada para a caracterização das fases minerais e da microporosidade dos depósitos do Vulcão do Paredão. Para isso, foi utilizado o microscópio petrográfico Leitz Labourlux 12 com uma câmera digital colorida *Scion Corporation* modelo CFW-1612C acoplada, sob luz transmitida polarizada, juntamente ao software *Hardledge* (Fig. 28). Este software permite a organização sistemática dos dados de acordo com a mineralogia primária, produtos de alteração, texturas principais e subordinadas, descrição dos tipos de poros, além da classificação da rocha e quantificação da microporosidade a partir da contagem modal de 300 pontos.

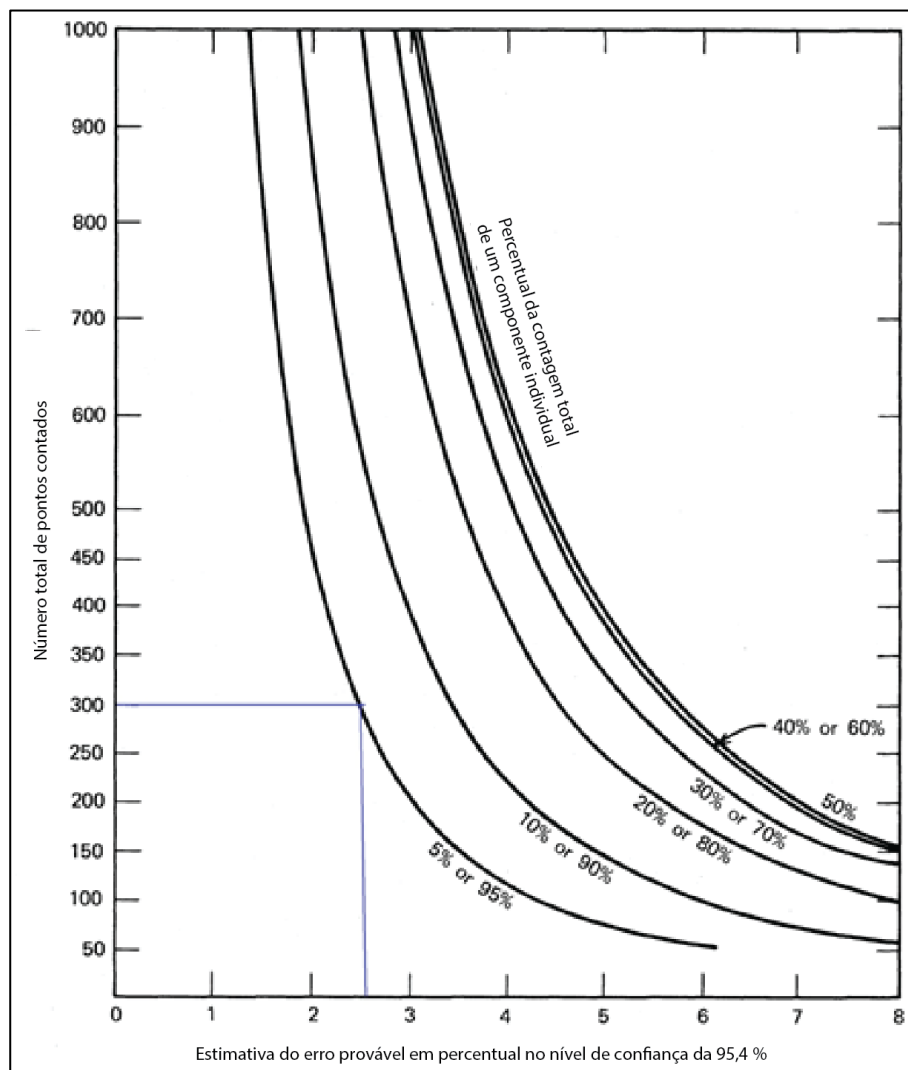
**Figura 28:** Interface do software *Hardledge* na seção da descrição da composição e contagem modal de 300 pontos.





De acordo com Galehouse (1971) a contagem modal de menos de 300 pontos apresenta uma margem de erro relevante, o que demonstraria uma menor confiabilidade na técnica, enquanto que acima de 300 pontos não há redução considerável na margem de erro (Fig.29).

**Figura 29:** Gráfico do provável erro na contagem de pontos. Observa-se que a contagem de mais de 300 pontos não promove redução considerável na margem de erro.



Fonte: Modificado de Galehouse (1971).

#### 7.3.4 Aquisição e tratamento de dados geoquímicos

As análises de química de rocha total possibilitaram a caracterização das condições químicas do vulcanismo, tornando possível a relação entre estas e a

geração da porosidade primária. As análises foram feitas por fluorescência de raios X no laboratório de análise química de rochas da UFRGS.

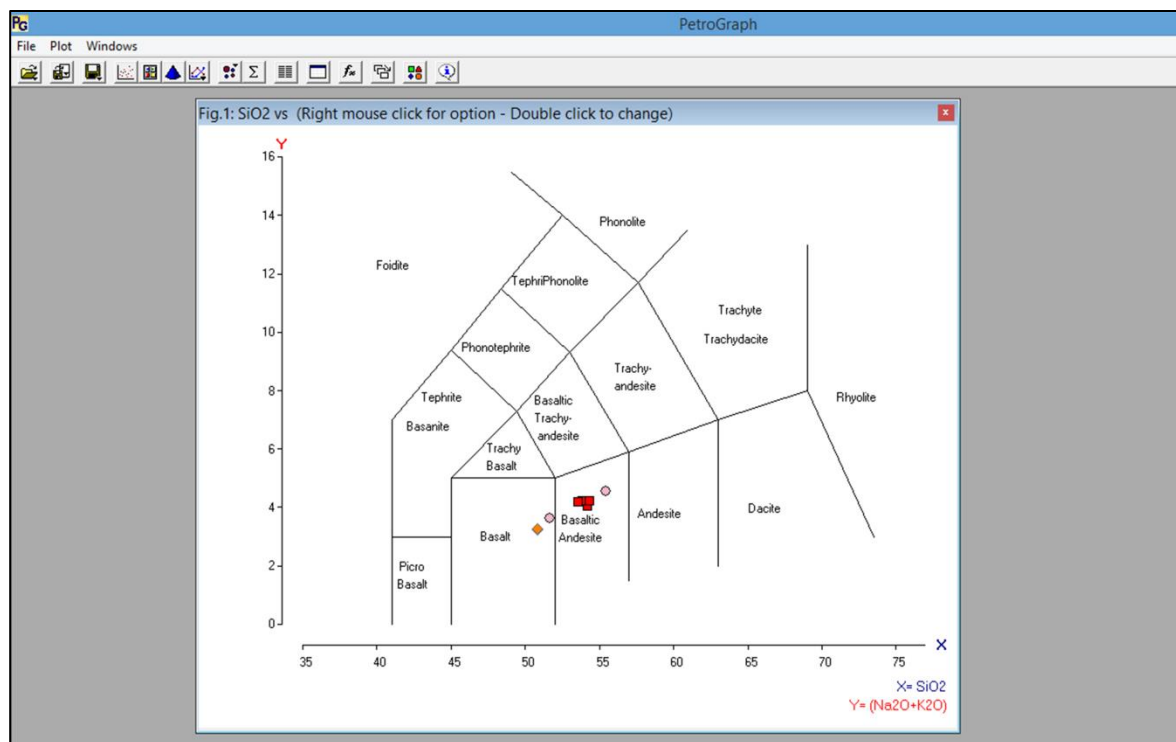
A fluorescência de raios X é fundamentada na excitação de átomos por raios X provocando a emissão de radiações características de cada elemento. Quando um átomo recebe uma descarga de raios X, um elétron é removido da camada atômica de menor energia e é substituído por um elétron da camada interna de maior energia. Este processo libera energia em forma de luz (fluorescência) através da emissão de um fóton de raios X. Este método permite a identificação de elementos com número atômico mínimo de  $Z=11$  (Sódio), sendo uma técnica analítica multi-elementar não destrutiva. A radiação fluorescente pode ser analisada através de duas técnicas: EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) ou WDS (Wavelength Dispersive Spectroscopy). A técnica de EDS consiste em analisar a energia dispersiva dos fótons e a de WDS em analisar os comprimentos de onda da radiação.

As amostras selecionadas para litoquímica foram analisadas através do aparelho Rigaku RIX-2000, por espectrometria por fluorescência de raios X e técnica de EDS. O pacote de análises inclui elementos maiores ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_{3(t)}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ), perda ao fogo e menores (Cr, Co, Ni, Zn, Ga, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Ba, As, Pb). Os dados obtidos foram tratados através do software *Petrograph* (Fig.30) para a geração de diagramas de classificação e de Harker e interpretação.

Através das análises químicas foi possível calcular a Norma CIPW, que transforma os valores dos elementos maiores da rocha em um percentual de minerais hipotéticos (normativos), sugerindo o grau de saturação de  $\text{SiO}_2$  do sistema. A tabela utilizada para o cálculo é da *United States Geological Society* (USGS), construída com base no cálculo da norma de Kelsey (1965) e está disponível em:

[https://volcanoes.usgs.gov/observatories/yvo/jlowenstern/other/NormCalc\\_JBL.xls](https://volcanoes.usgs.gov/observatories/yvo/jlowenstern/other/NormCalc_JBL.xls).

**Figura 30:** Interface do software *PetroGraph*. A figura mostra o diagrama de classificação TAS (LE BAS et al., 1986), um dos diagramas gerados pelo programa.



### 7.3.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

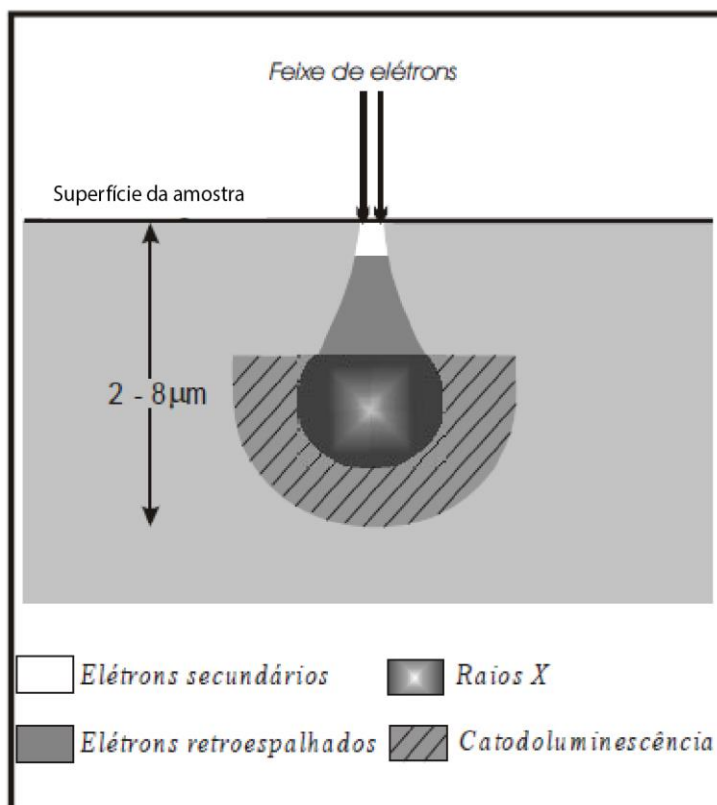
A microscopia eletrônica de varredura é um método que produz imagens de alta ampliação (300.000 x) e resolução. Através das imagens de MEV foi possível o reconhecimento de minerais específicos não identificáveis na microscopia óptica convencional e o detalhamento da porosidade em micro e nanoescala. As análises foram realizadas no laboratório de geologia isotópica da UFRGS no Microscópio Eletrônico da marca JEOL JSM-6610LV com EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*) Brucker acoplado. O uso em conjunto de EDS com o MEV é de grande importância na caracterização de materiais. Enquanto o MEV proporciona imagens nítidas, o EDS permite a imediata identificação de sua composição química através da emissão de raios X característicos, assim como na FRX.

As lâminas analisadas (TRV-01C e TR-07) foram metalizadas com a precipitação de uma película micrométrica de ouro (Au) sobre a superfície dos minerais, possibilitando a condução da corrente elétrica. Após a metalização, as amostras foram colocadas no equipamento e atingidas por feixes de elétrons emitidos por um filamento de tungstênio, gerado pela aplicação de uma diferença de

potencial (entre 0,5 a 30 KV). A transcodificação da energia emitida pelos elétrons ao atingirem a amostra resulta na imagem de MEV. A imagem eletrônica de varredura representa em tons de cinza o mapeamento e a contagem de elétrons secundários (SE – *secondary electrons*) e retroespalhados (BSE – *backscattering electrons*) emitidos pelo material analisado.

Os elétrons secundários resultam da interação do feixe eletrônico com o material da amostra. Estes elétrons resultantes são de baixa energia (<50 eV) e formarão imagens com alta resolução (3-5 nm), fornecendo detalhes da superfície ionizada do mineral em tons de cinza. A imagem de BSE é gerada pela emissão de elétrons retroespalhados, que são elétrons com energia que varia entre 50 eV até o valor da energia do elétron primário, e demonstra diferenças composicionais na região ionizada do mineral. É resultante das interações ocorridas mais para o interior da amostra e proveniente de uma região do volume de interação abrangendo um diâmetro maior do que o diâmetro do feixe primário (Fig.31).

**Figura 31:** Representação esquemática da região de ionização gerada na interação do feixe de elétrons com a superfície da gema.



Fonte: Extraído e modificado de Duarte et al. (2003).



### 7.3.6 Integração dos dados

A integração dos dados foi feita através de planilhas e gráficos do Excel e *Adobe Illustrator* para o entendimento da distribuição lateral de fácies, da porosidade e de seus principais controladores nos depósitos do Vulcão do Paredão, servindo como modelo para reservatórios não convencionais vulcânicos.

## 8 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir das metodologias descritas no capítulo 7.

### 8.1 ESTRATIGRAFIA

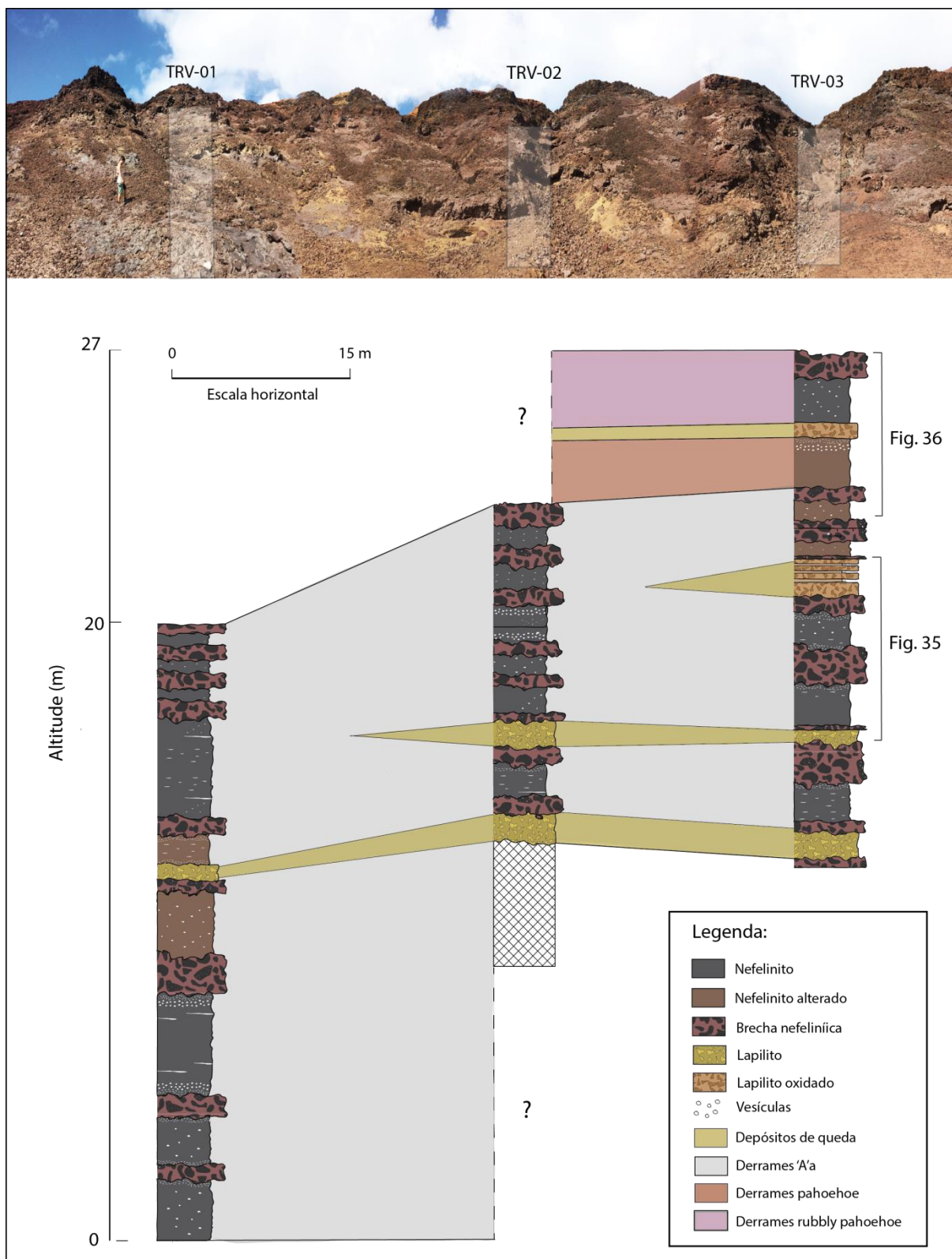
O arcabouço estratigráfico do Vulcão do Paredão foi construído a partir de 4 seções colunares (apêndice A), sendo três nos depósitos da Praia das Tartarugas (TRV-01,02 e 03) (Fig. 32) e uma no cone de escórias (TRV-04). Foram identificadas 7 litofácies, das quais 2 coerentes e 5 vulcanoclásticas (1 autoclástica e 4 piroclásticas), agrupadas em 5 associação de litofácies, descritas e interpretadas nas seções 8.1.1 e 8.1.2, respectivamente.

#### 8.1.1 Litofácies

As descrições e interpretações das litofácies são apresentadas na tabela 8. As litofácies coerentes foram descritas nas seções TRV-01,02 e 03 como nefelinito porfirítico maciço (Npm) (Fig. 33A) e vesiculado (Npv) (Fig.33B) e interpretadas como a porção central dos derrames nefeliníticos, enquanto que a fácies autoclástica de nefelinito brechado (Nb) indica a fragmentação *in situ* do topo do derrame (Figs. 33C e 33D), que pode ser transportado para a porção basal durante o fluxo.

As litofácies piroclásticas identificadas nos depósitos da Praia das Tartarugas, intercalam-se com os derrames e foram descritas como lapilito maciço (Lm) (Fig. 33E) e lápili-tufo com estratificação plano-paralela (LTp) (Fig.33F). A fração lapilítica destas litofácies é composta exclusivamente por fragmentos de escória que podem chegar a 1 cm de diâmetro, indicando queda a partir de uma trajetória balística. A fração cinza da fácies LTp sugere a suspensão como principal mecanismo de transporte e queda a partir de uma nuvem de cinzas.

**Figura 32:** Fotomosaico com a posição das seções TRV-01, TRV-02 e TRV-03 no afloramento da Praia das Tratarugas e correlação das seções. As diferentes cores usadas na correlação indicam as associações de litofácies identificadas.



**Tabela 8:** Tabela de litofácies do Vulcão do Paredão.

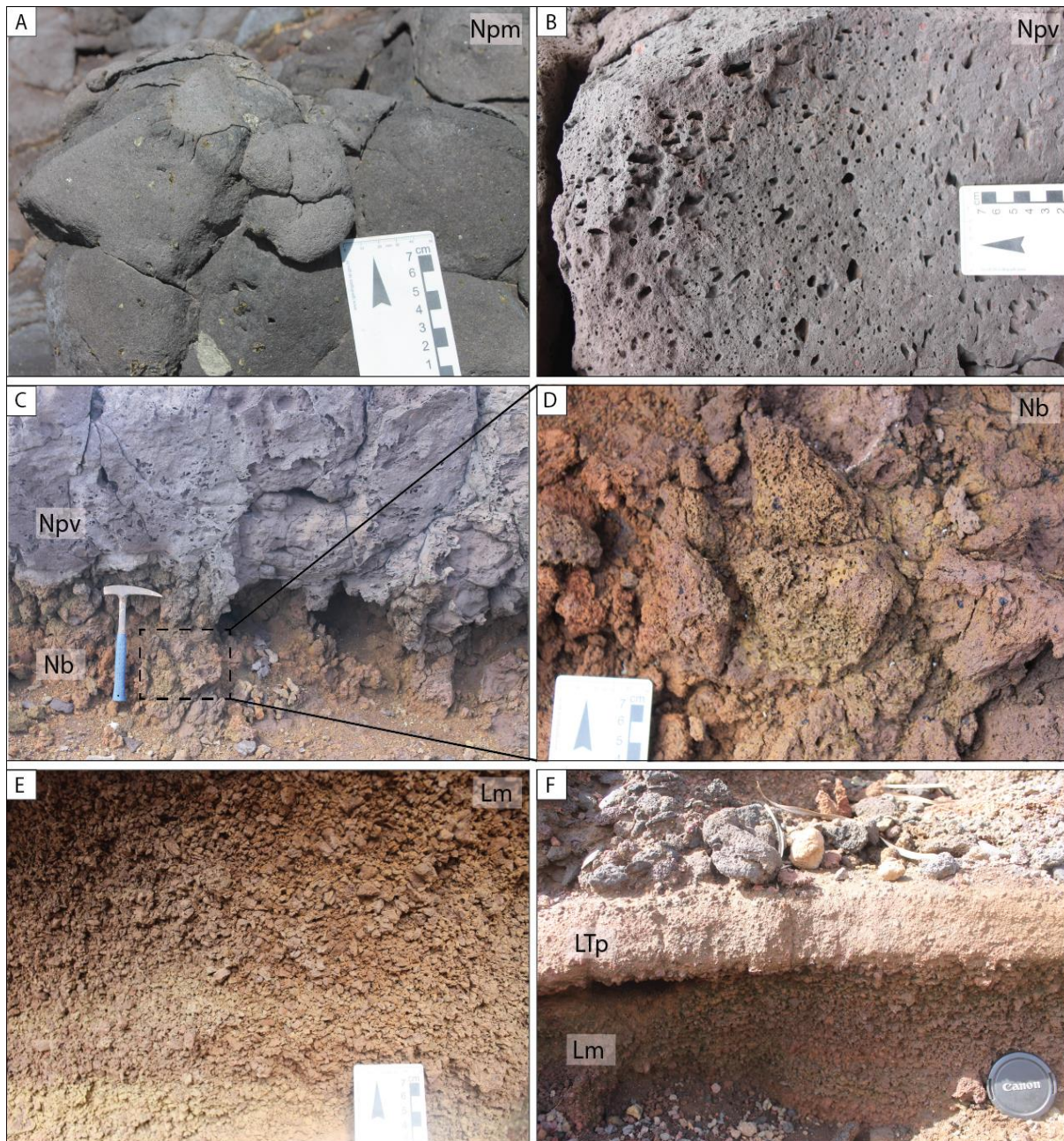
<b>Fácies</b>	<b>Descrição</b>	<b>Interpretação</b>
<b>Npm</b>	Nefelinito* porfirítico maciço - Vulcânica máfica coerente, cinza escura, maciça, porfirítica, com fenocristais (7-25%) euédricos a subédricos de olivina esverdeada/oxidada com dimensões de 2 mm a 1,5 cm em matriz afanítica.	Lava nefelinítica da porção central dos derrames.
<b>Npv</b>	Nefelinito* porfirítico vesiculado - Vulcânica máfica coerente, cinza escura, vesiculada, porfirítica, com fenocristais (7-25%) euédricos a subédricos de olivina esverdeada/oxidada com dimensões de 2 mm a 1,5 cm em matriz afanítica. As vesículas são arredondadas, podem estar alongadas segundo o fluxo e conectadas formando caminhos de vesícula. A vesiculação varia de 1 mm a 4 cm e pode chegar a 30%.	Lava nefelinítica supersaturada em voláteis das porções periféricas do núcleo de derrames. As vesículas alongadas indicam deformação durante o fluxo.
<b>Nb</b>	Brecha monomítica composta por fragmentos de nefelinito* escoriáceo, subarredondados, oxidados, com dimensões que variam de 2 mm a 15 cm.	Fragmentação do topo do derrame durante o fluxo. Pode ocorrer na base de derrames (efeito <i>caterpillar</i> ).
<b>LTP</b>	Lápili-tufo oxidado com estratificação plano-paralela, composto por cinzas vulcânicas e fragmentos de escória angulosos e de esfericidade baixa de tamanho lápili de até 1 cm.	Queda de partículas com dimensões de cinza a lápili a partir de uma nuvem de cinzas e trajetória balística.
<b>Lm</b>	Lapilito maciço amarelo/oxidado, composto exclusivamente por fragmentos de escória angulosos e de esfericidade baixa com até 1 cm.	Queda de partículas com dimensões de lápili a partir de trajetória balística.
<b>LBm</b>	Lápili-brecha maciça marrom, composta por fragmentos de escória (0,3 - 6 cm), angulosos e de esfericidade baixa e subordinados cristaloclastos de olivina e flogopita milimétricos a centimétricos. A fração brecha contém de 5-30 % de bombas nefeliníticas e de escória (10 - 80 cm), subangulosas e de esfericidade moderada.	Queda de fragmentos com dimensões de lápili a bomba a partir de trajetória balística. Pulsos de maior (fração lápili) e menor (fração bomba) explosividade do sistema.
<b>Lgi</b>	Lapilito com gradação inversa, marrom, composto por fragmentos de escória oxidados (0,2-2 cm), angulosos e de esfericidade baixa e cristaloclastos de olivina alterados, com ~ 3 mm. Contém ~5% de bombas (7cm) de escória e de lava nefelinítica subordinada, subangulosas e de esfericidade baixa, por vezes imbricadas.	Queda de fragmentos com dimensões de lápili a bomba a partir de trajetória balística; Diminuição gradativa da explosividade do sistema da base para o topo da camada.

\*Nefelinito: Classificação petrográfica

As litofácies piroclásticas identificadas no cone de escórias descritas como lápili-brecha maciça (LBm) e lapilito com gradação inversa (Lgi) tem grau de seleção moderado e são compostas por fragmentos de escória, lava nefelinítica e cristaloclastos de olivina e flogopita, indicando a queda a partir de uma trajetória balística de fragmentos com dimensões de lápili a bomba. A litofácies LBm (Fig.34A) é composta predominantemente por fragmentos de escória com tamanho lápili (0,3-6 cm) (Fig.34B), com níveis de maior concentração de bombas (Figs.34C e 34D), indicando pulsos de menor explosividade. A litofácies Lgi (Figs. 34E e 34F) sugere uma diminuição gradativa da explosividade da base para o topo das camadas, evidenciado pela granocrescência ascendente. Na porção superior do cone (~200 m), foi possível identificar a litofácies LTp, indicando que também houve a deposição de partículas a partir da nuvem de cinzas durante a construção do cone (Fig. 34D).

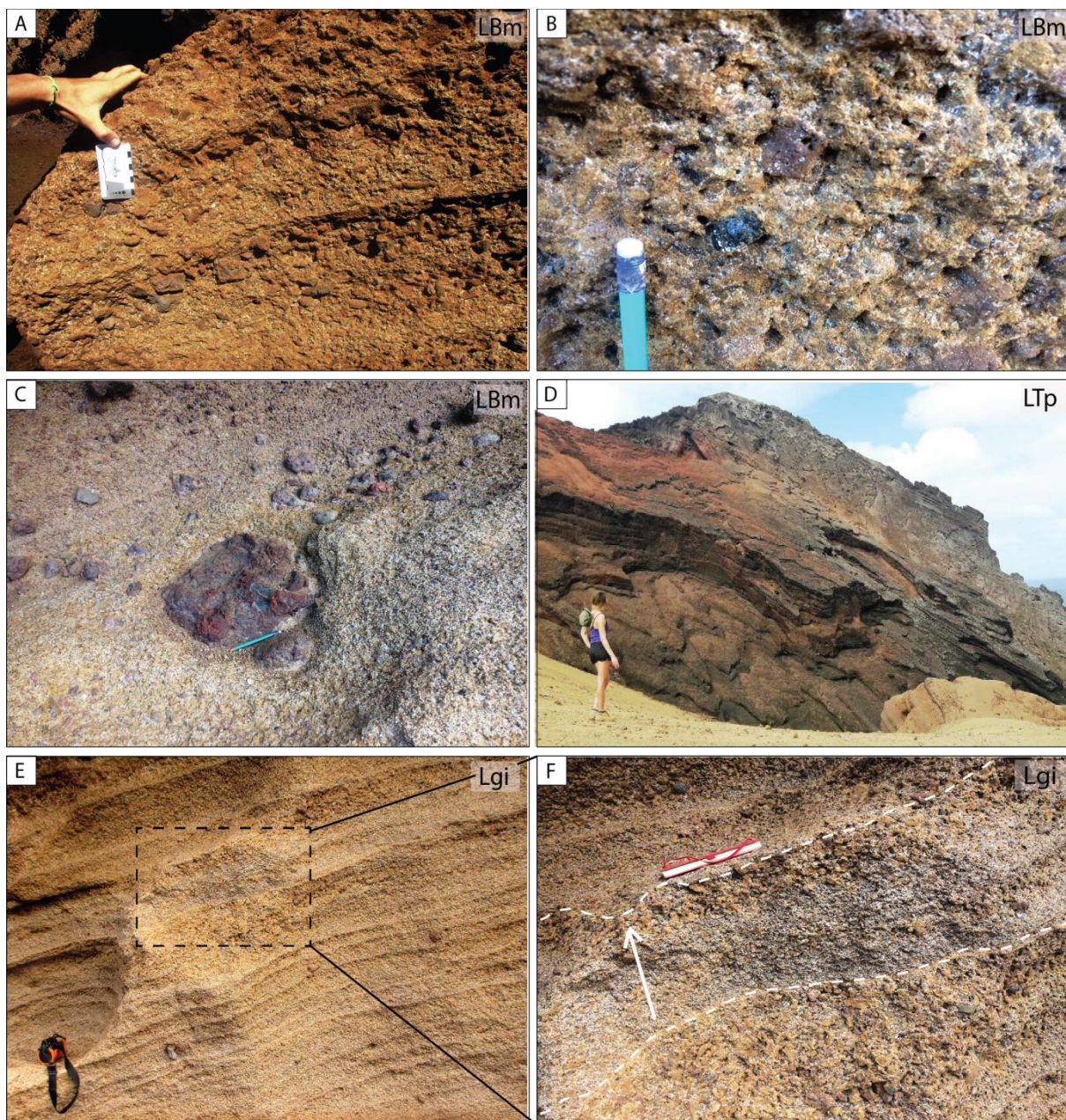


**Figura 33:** Litofácies identificadas nos depósitos da Praia das Tartarugas: A) Nefelinito porfirítico maciço (Npm); B) Nefelinito porfirítico vesiculado (Npv); C) Contato entre as fácies de brecha nefelinítica (Nb) e nefelinito porfirítico maciço (Npm); D) Brecha nefelinítica (Nb); E) Lapilito maciço (Lm); F) Lápili-tufo com estratificação plano-paralela (LTp) sobre o lapilito maciço (Lm).





**Figura 34:** Litofácies identificadas no cone de escórias: A) Lápili-brecha maciça (LBm); B) Fração lapilítica da fácies LBm, com fragmentos de escória marrons e cristaloclastos de olivina pretos; C) Nível com concentração de bombas da fácies LBm; D) Sucessão de camadas de lápili-tufo com estratificação plano-paralela (LTP) na porção superior do cone; E) Camadas planares de lapilito com gradação inversa (Lgi); F) Detalhe da gradação inversa na fácies Lgi indicada pela seta branca.



### 8.1.2 Associação de litofácies

As associações de litofácies caracterizam derrames do tipo 'A'a, *rubbly pahoehoe*, *pahoehoe* e depósitos de queda e do cone de escórias (tabela 9).

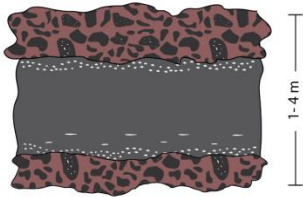

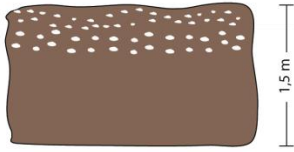
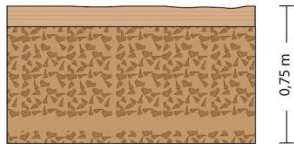

Nos depósitos da Praia das Tartarugas, predominam a associação de litofácies do tipo 'A'a (Figs. 35B e 35C), caracterizados pelas fácies Npm e Npv associadas à fácies Nb no topo e na base, indicando que as condições de colocação dos derrames foram sob alta taxa de efusão e/ou uma declividade do terreno  $>5^\circ$ . Intercalados aos derrames 'A'a, ocorre a associação de litofácies de depósitos de queda, caracterizada pelas litofácies Lm e LTp (Fig.35A), representando momentos de aumento da explosividade do sistema. É possível observar que quando os derrames 'A'a ocorrem sobre os depósitos de queda, a zona de brecha basal é muito pouco espessa (no máx. 10 cm) (Fig. 35D).

Nos últimos metros da seção TRV-03, foram identificadas associações de litofácies do tipo *pahoehoe* e *rubbly pahoehoe* (Fig. 36). A associação das litofácies Npv e Npm caracteriza um derrame do tipo *pahoehoe* (Fig. 36A), com uma superfície lisa e um núcleo com aumento gradativo da vesiculação e diminuição no tamanho das vesículas em direção ao topo do derrame. A *pahoehoe* é sucedida por um depósito de queda e sobre este ocorre um derrame do tipo *rubbly pahoehoe* (Fig. 36B), caracterizada por uma porção central de Npv de contato abrupto com o lapilito (Fig. 36C), associada à litofácies Nb somente na porção de topo. A identificação destas associações de litofácies ao final da fase efusiva do sistema pode indicar a peneplanação do terreno e/ou a diminuição das taxas de efusão.

A associação de litofácies do cone de escórias (Fig.37) é representada pela alternância de camadas planares centimétricas de LBm e Lgi em sua porção basal, sugerindo a construção do cone a partir da queda de fragmentos ejetados do conduto central. As características texturais dos fragmentos como a alta vesicularidade, forma e coloração evidenciam os processos de desgaseificação e fragmentação do magma em ascensão próximo a superfície e a diversidade de tamanho sugere variação na explosividade do sistema durante a construção do cone.

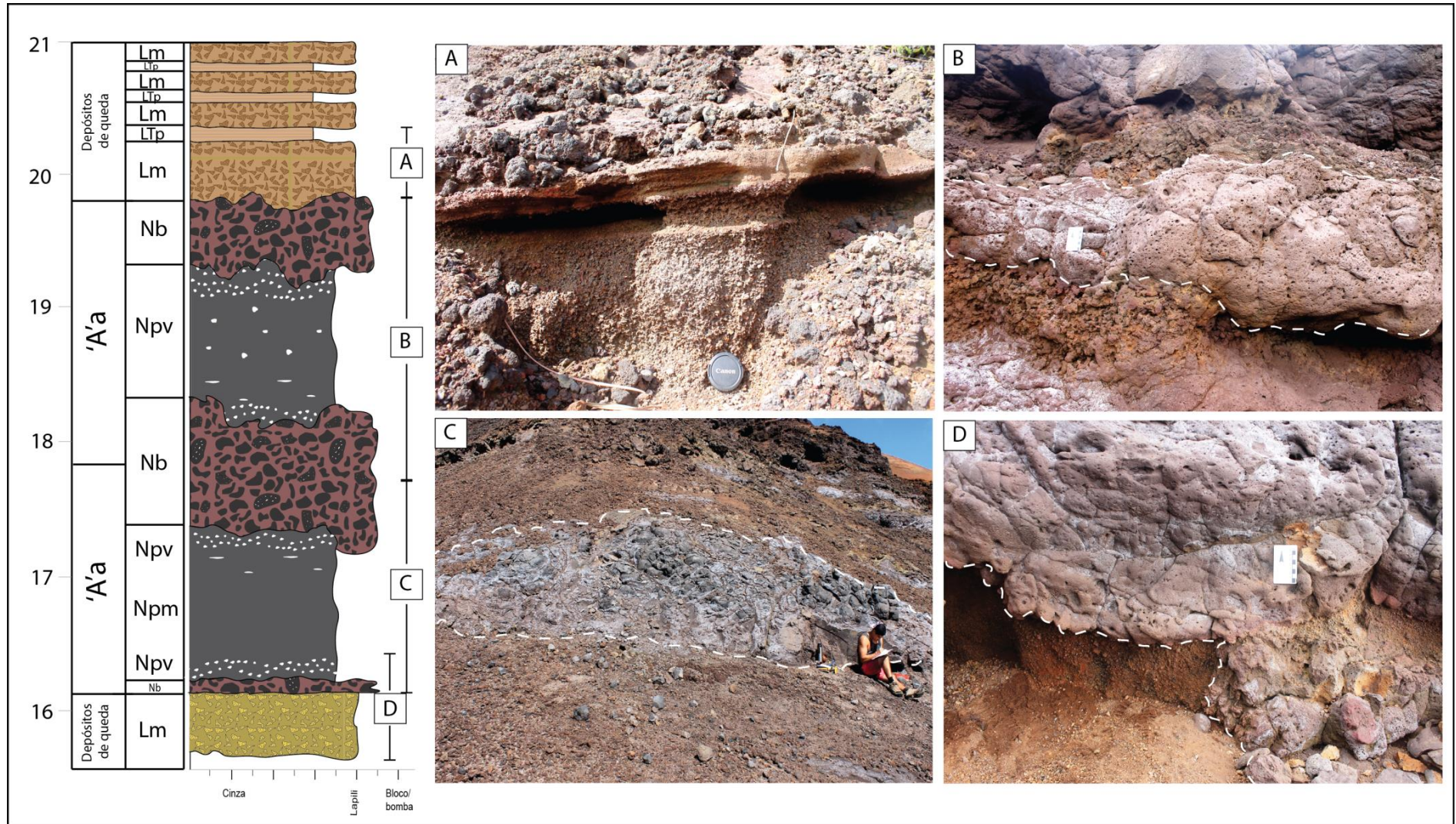


**Tabela 9:** Descrição e interpretação das associações de litofácies.

Associação de litofácies	Arquitetura e geometria de fácies	Descrição	Litofácies	Interpretação
'A'a		Derrames tabulares com espessuras que variam de 0,5 m a 3 m, de núcleo maciço a vesiculado. Estrutura de fluxo destacada pela orientação de vesículas alongadas. Zonas de brecha no topo e na base com até 1 m de espessura.	Nb, Npv, Npm	Altas taxas de efusão e/ou maior (>5) declividade do terreno com autobrecha no topo e na base do derrame.
<i>Rubblly Pahoehoe</i>		Derrames tabulares de 1,5 m com núcleo vesiculado e topo brechado. A base é texturalmente coerente e tem contato abrupto. A zona de brecha de topo tem 75 cm.	Nb, NPV	Peneplanação do terreno e/ou diminuição nas taxas de efusão com rompimento do topo do derrame.
<i>Pahoehoe</i>		Derrames tabulares de 1,5 m com núcleo maciço e topo vesiculado com granodecrescência ascendente das vesículas.	Npv, Npm	Topografia plana e/ou baixas taxas de efusão.
Depósitos de queda		Camadas tabulares isoladas de lapilito maciço com no máx. 1 m de espessura, intercaladas com camadas centimétricas de lúpili -tufo planares.	Lm, LTp	Fase explosiva do sistema.
Cone de escórias		Camadas planares centimétricas de lúpili-brecha maciça intercaladas com lapilito com gradação inversa. As camadas mergulham aprox. 20 °.	LBm, Lgi	Fragmentação magmática na porção superior do conduto vulcânico, com variações na explosividade do sistema.

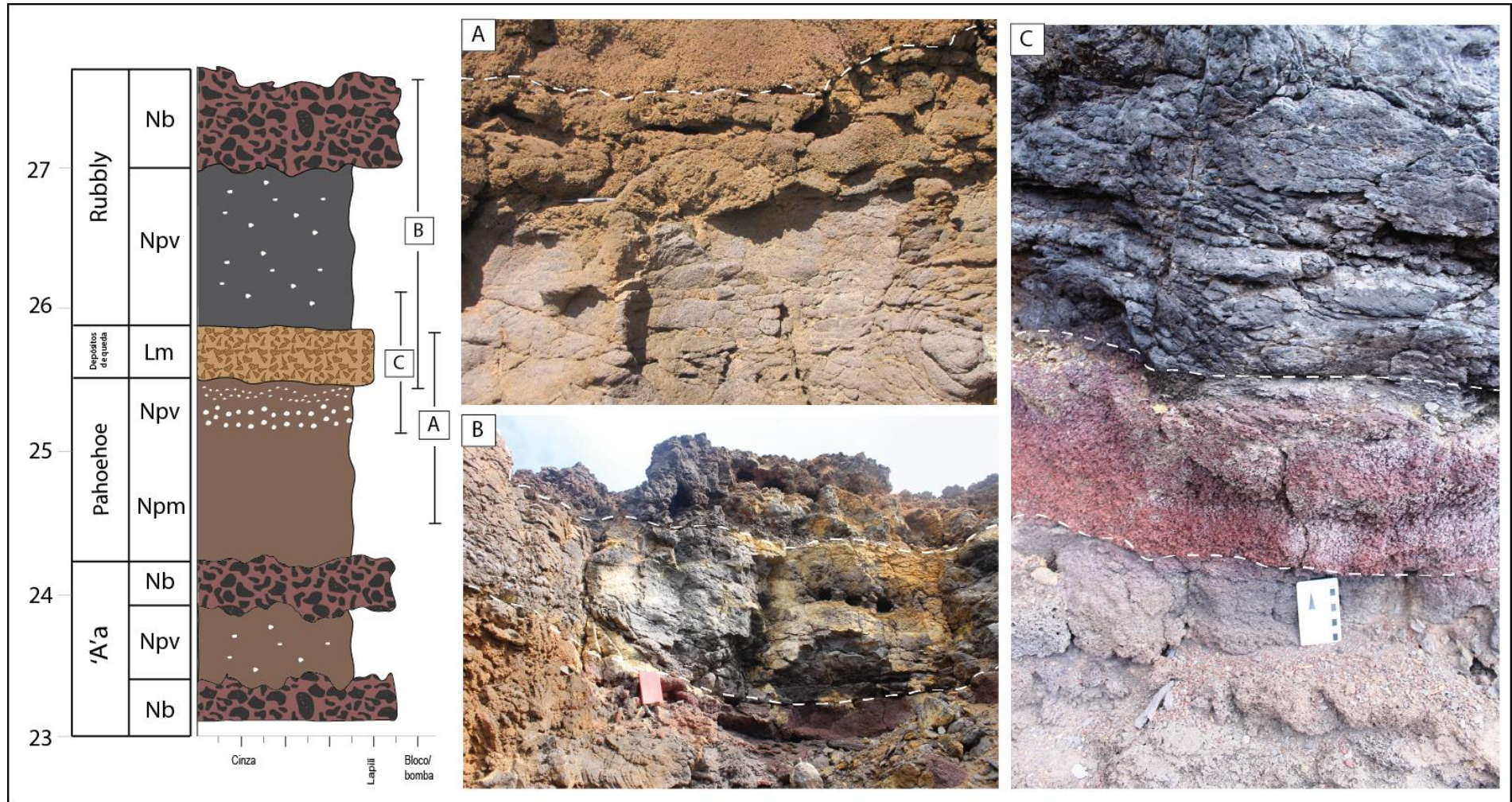


**Figura 35:** Associações de litofácies do tipo 'A'a e depósitos de queda. A) Depósitos de queda; B) Derrame 'A'a com núcleo vesiculado (Npv); C) Derrame 'A'a com núcleo predominantemente maciço (Npm); D) Contato da brecha basal pouco desenvolvida de derrame 'A'a sobre depósitos de queda da base da seção TRV-03.



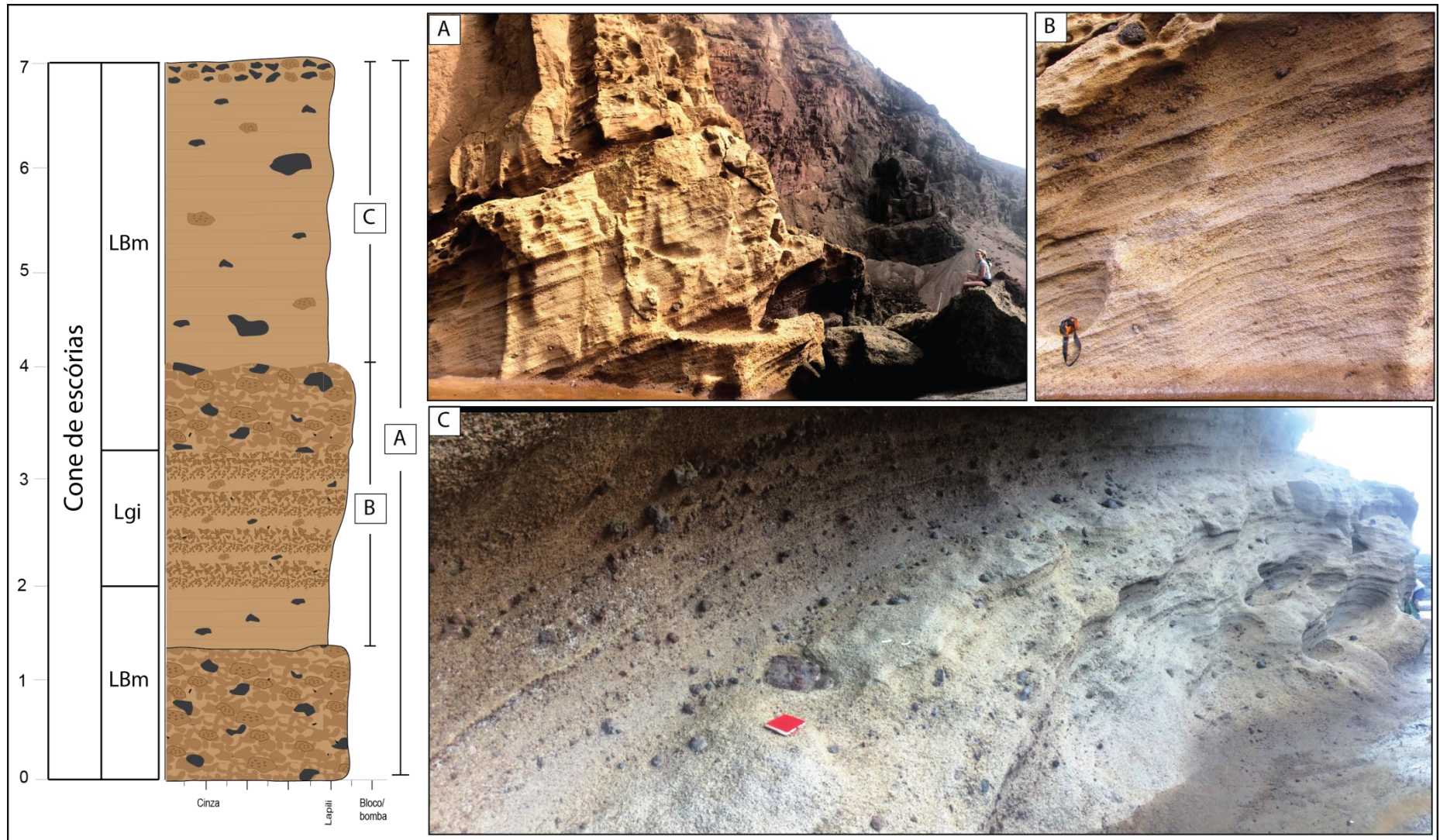


**Figura 36:** Associações de litofácies do tipo *pahoehoe* e *rubbly pahoehoe*. A) Derrame *pahoehoe* caracterizado por núcleo de Npm e topo de Npv, sobreposto pela camada de lapilito maciço (tracejado); B) Derrame de *rubbly pahoehoe* definido pela associação das fácies Npv (tracejado) e Nb; C) Contato da camada de Lm sobre o topo vesiculado da *pahoehoe* e sob a base reta da *rubbly pahoehoe*.





**Figura 37:** A) Associação de litofácies da base do cone de escórias; B) Camadas de Lgi na base e de LBm no topo; C) Camadas planares de LBm, com níveis de maior concentração de bombas.



Os depósitos da Praia das Tartarugas são caracterizados por derrames do tipo 'A'a intercalados com os depósitos de queda, sugerindo que o início da atividade do Vulcão do Paredão foi predominantemente efusivo, caracterizando um estilo eruptivo do tipo Havaiano. A construção do cone de escórias evidencia uma segunda fase de atividade explosiva, resultado de um estilo eruptivo Estromboliano, na qual ocorre a ascensão e rompimento de enormes bolhas de gás na porção superior de condutos vulcânicos (FISHER; SCHMINCKE, 1984; CAS; WRIGHT, 1987).

De acordo com o modelo proposto por McGetchin, Settle e Chouet (1974), os depósitos que compõem um cone de escórias são predominantemente tamanho bomba e lápili, que seguem uma trajetória balística e avalanche de grãos, conforme o ângulo de deposição dos fragmentos aumenta com a construção do cone. No entanto, outros modelos (ex. SELF, 1976; RIEDEL; ERNST; RILEY, 2003; MARTIN; NEMÉTH, 2006) consideram que a formação de um cone de escórias pode envolver a queda de partículas a partir de uma nuvem de cinzas. As litofácies identificadas na porção basal do cone do Vulcão do Paredão permitem inferir que o principal processo atuante é o clássico, como no modelo de McGetchin, Settle e Chouet (1974), porém a identificação da litofácies LTp no topo do cone de escórias indica a deposição das partículas a partir de uma nuvem de cinzas no final da atividade eruptiva.

Desta forma, a análise estratigráfica do Vulcão do Paredão permite concluir que o vulcanismo foi heterogêneo, com uma fase inicial Havaiana, e uma fase final Estromboliana (Fig.38).

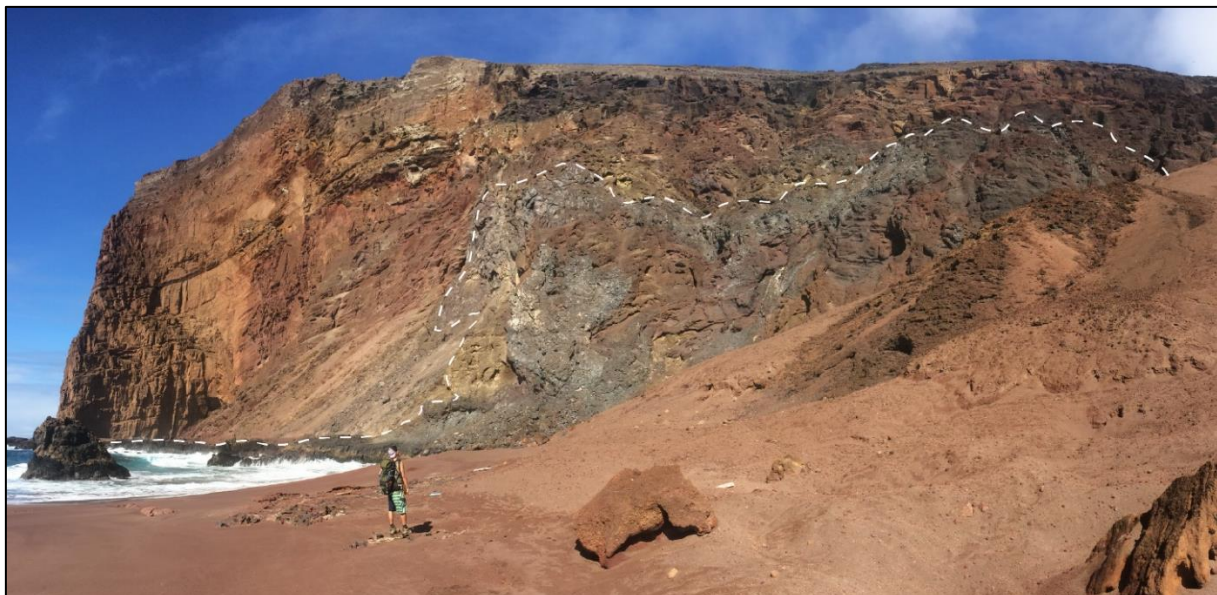
Não foram observadas estruturas indicativas de interação magma-água, portanto a construção do Vulcão do Paredão dependeu principalmente do conteúdo de gases e de parâmetros físicos do magma em ascensão como a viscosidade, temperatura e fluxo de magma (*Dry eruptive processes* – NÉMETH, 2010). Alguns autores (PARFITT; WILSON, 1995; SCHMINCKE, 2004) sugerem que a variação na taxa de ascensão magmática, que é influenciada pelo teor de voláteis e viscosidade, é o principal fator para que ocorra a transição do estilo eruptivo Hawaiano-Estromboliano.

Possivelmente, a velocidade inicial de ascensão do magma do Vulcão do Paredão foi alta, impedindo a coalescência das bolhas e proporcionando uma maior



fluidez ao magma, gerando os fluxos de lava. Posteriormente, uma diminuição da velocidade de ascensão magmática favoreceu a formação de grandes bolhas na porção superficial do conduto vulcânico, causando a fragmentação magmática.

**Figura 38:** Cone de escórias marcando a transição no estilo eruptivo do Vulcão do Paredão de havaiano para estromboliano.



## 8.2 PETROGRAFIA

As descrições petrográficas geradas através do *Hardledge* são encontradas no apêndice B.

### 8.2.1 Fácies coerentes

As fácies coerentes foram classificadas petrograficamente como olivina nefelinitos porfirítico. Texturalmente são rochas holocristalinas e vesiculadas, compostas por fenocristais de olivina em uma matriz muito fina/microlítica de clinopiroxênio (titanoaugita – ALMEIDA, 1961), nefelina, zeolita (analcima – ALMEIDA, 1961) e titanomagnetita, podendo conter flogopita.

Contêm de 15 a 20 % de fenocristais de olivina euédricos a subédricos, com tamanhos que variam de 0,2 - 5 mm, fraturados, frequentemente com hábito

esqueletal (Fig. 39A). A olivina pode ocorrer em avançado estágio de alteração, com substituição parcial (Fig. 39B) ou completa por iddingsita (Fig. 39C). Também é comum a presença de aglomerados irregulares de olivina (Fig. 39D) com até 8 mm, por vezes com extinção ondulante, textura em mosaico (HARTE, 1977) e intenso fraturamento.

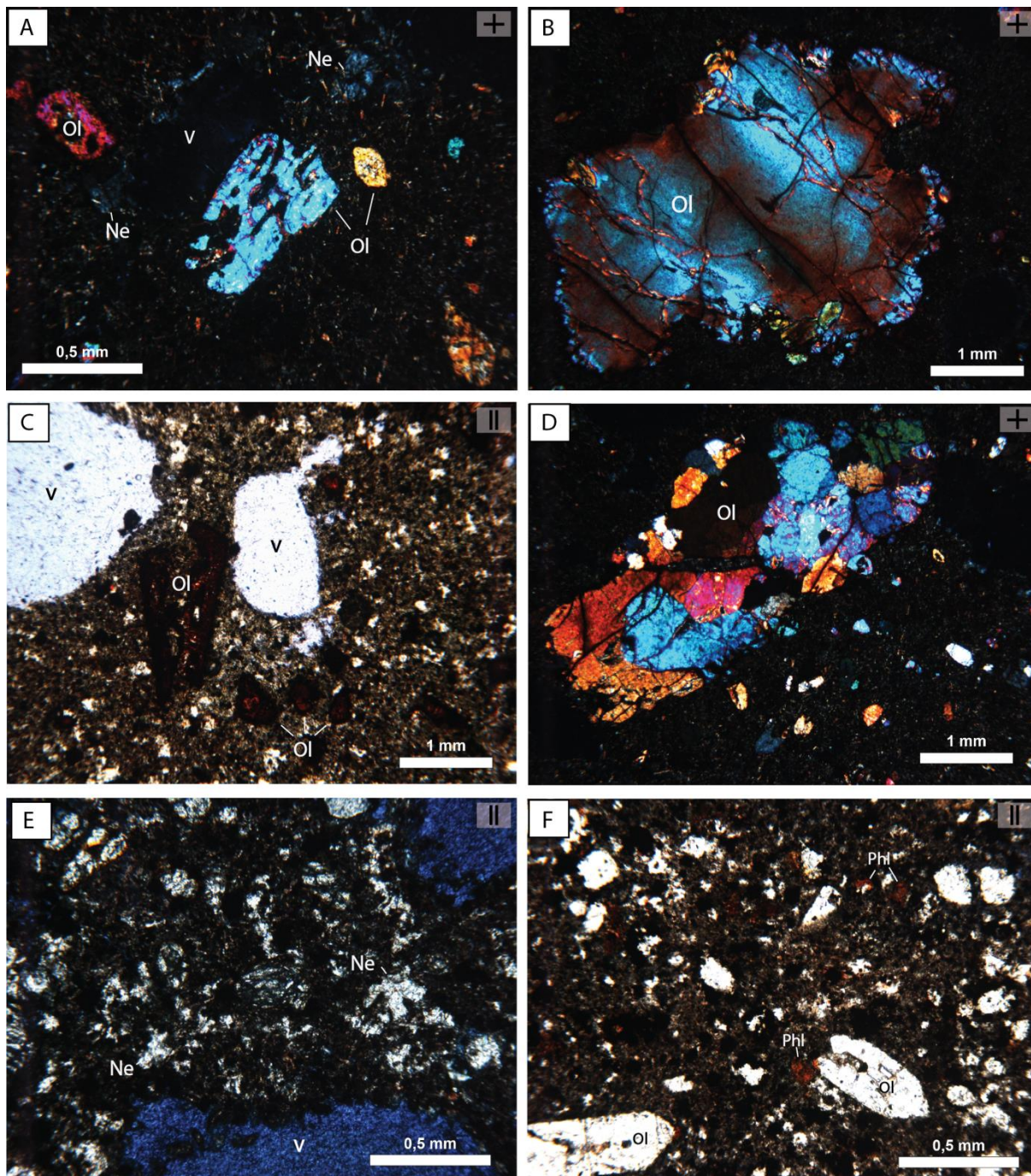
Os cristais de clinopiroxênio são microlíticos, aciculares, com pleocroísmo alaranjado/rosado, restritos à matriz juntamente à nefelina, flogopita, zeolita e titanomagnetita. A nefelina e a flogopita geralmente ocorrem subédricos a anédricos intergranulares (Figs. 39E e 39F), mas também podem ocorrer com tamanhos pouco maiores que a matriz (~0,3mm) subédricos circundando e projetando-se nas vesículas. A nefelina é tabular e incolor, a flogopita é lamelar com forte pleocroísmo marrom-avermelhado. A zeolita é isotrópica e incolor, anédrica intergranular. Os titanomagnetita são cúbicos e ocorrem em grandes quantidades na matriz, circundando cavidades e fenocristais de olivina.

A partir da análise petrográfica, pode-se inferir que a cristalização teve início em profundidade com a formação dos fenocristais de olivina. De acordo com Donaldson (1976), as diferentes morfologias da olivina indicam uma variação na taxa de resfriamento e no grau de *undercooling* do magma. A olivina esqueletal reflete maior taxa de resfriamento ( $C^{\circ}/h$ ) e grau de *undercooling* quando comparada à olivina poliedral, euédrica.

Os agregados irregulares de olivina podem ser interpretados como xenólitos, por apresentarem forma e textura características (HARTE, 1977; JONES et al., 2000). Talbot et al. (1963) demonstraram que xenocristais de olivina são composicionalmente distintos de fenocristais, com teores de FeO inferiores aos fenocristais (DEER; HOWIE; ZUSSMAN, 1962), e, portanto, maiores teores de MgO. Através de MEV com a técnica de EDS foram feitas análises semiquantitativas nos aglomerados e fenocristais de olivinas (Fig. 40) (apêndice C). Os espectros 3, 4, 5 e 9 representam as análises em fenocristais, enquanto que os espectros 11 a 16 são referentes às olivinas nos aglomerados (Fig. 40B). Os valores de MgO (% em peso) obtidos para as olivinas não diferem do aglomerado para os fenocristais (Fig. 40C), o que pode indicar um possível reequilíbrio químico.

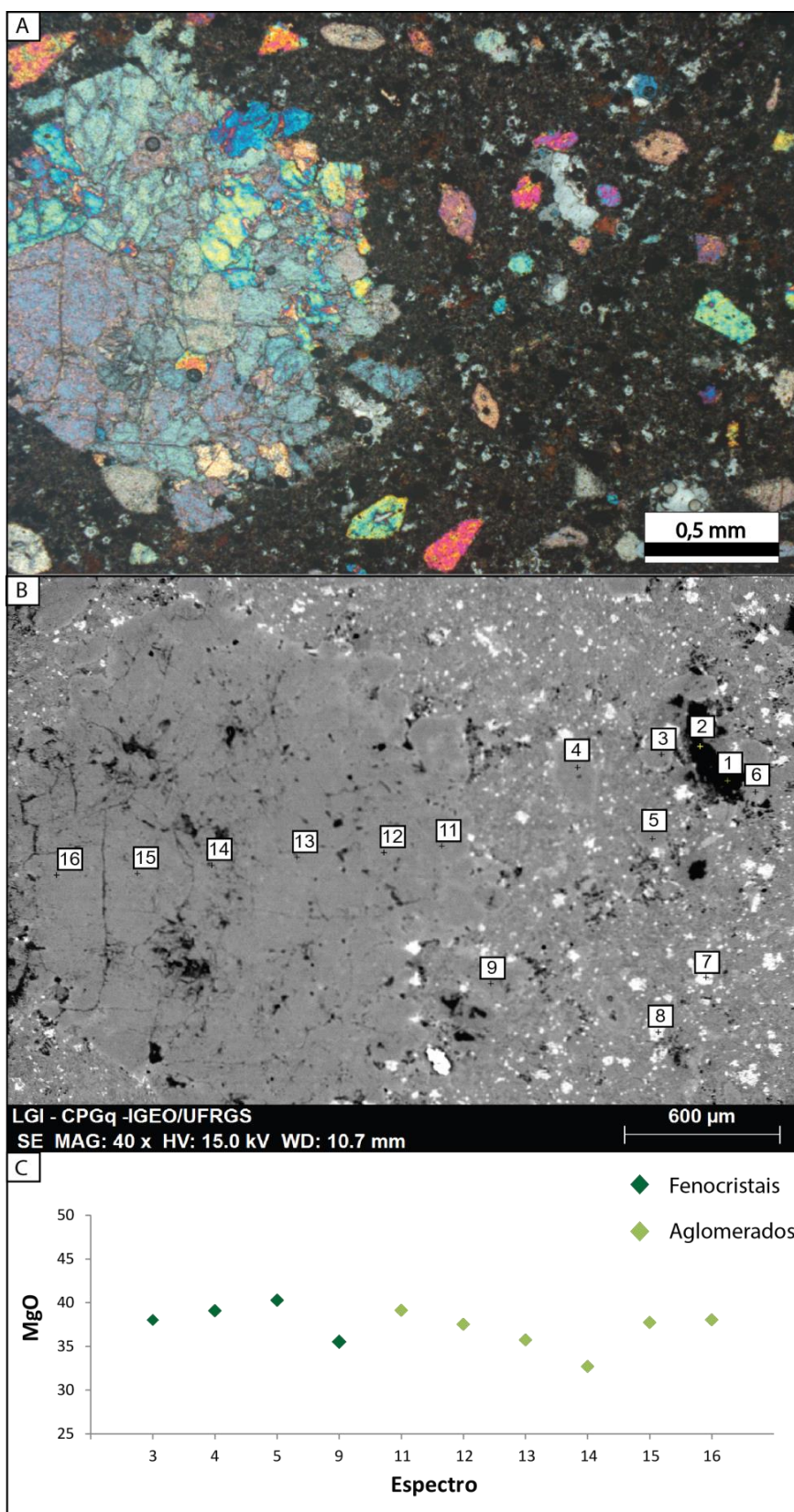


**Figura 39:** Olivina nefelinitos porfíricos, holocristalinos e vesiculados. A) Olivina romboédrica e esquelética; B) Olivina fraturada e parcialmente oxidada; C) Olivina totalmente oxidada, substituída por iddingsita; D) Aglomerados de olivina; E) Nefelina anédrica/subpedrica intergranular; F) Flogopita anédrica e intergranular. II – Nicóis paralelos; + – Nicóis perpendiculares; Ol – Olivina; Phl – flogopita; Ne – nefelina; V- vesículas.





**Figura 40:** A) Fotomicrografia à nicóis perpendiculares da lâmina TRV-01C, com aglomerado e fenocristais de olivina. B) Imagem de MEV na qual os números indicam os espectros analisados por EDS. C) Gráfico com as variações dos teores de MgO (% em peso) obtidos nos fenocristais e aglomerados de olivina pelas análises de EDS.

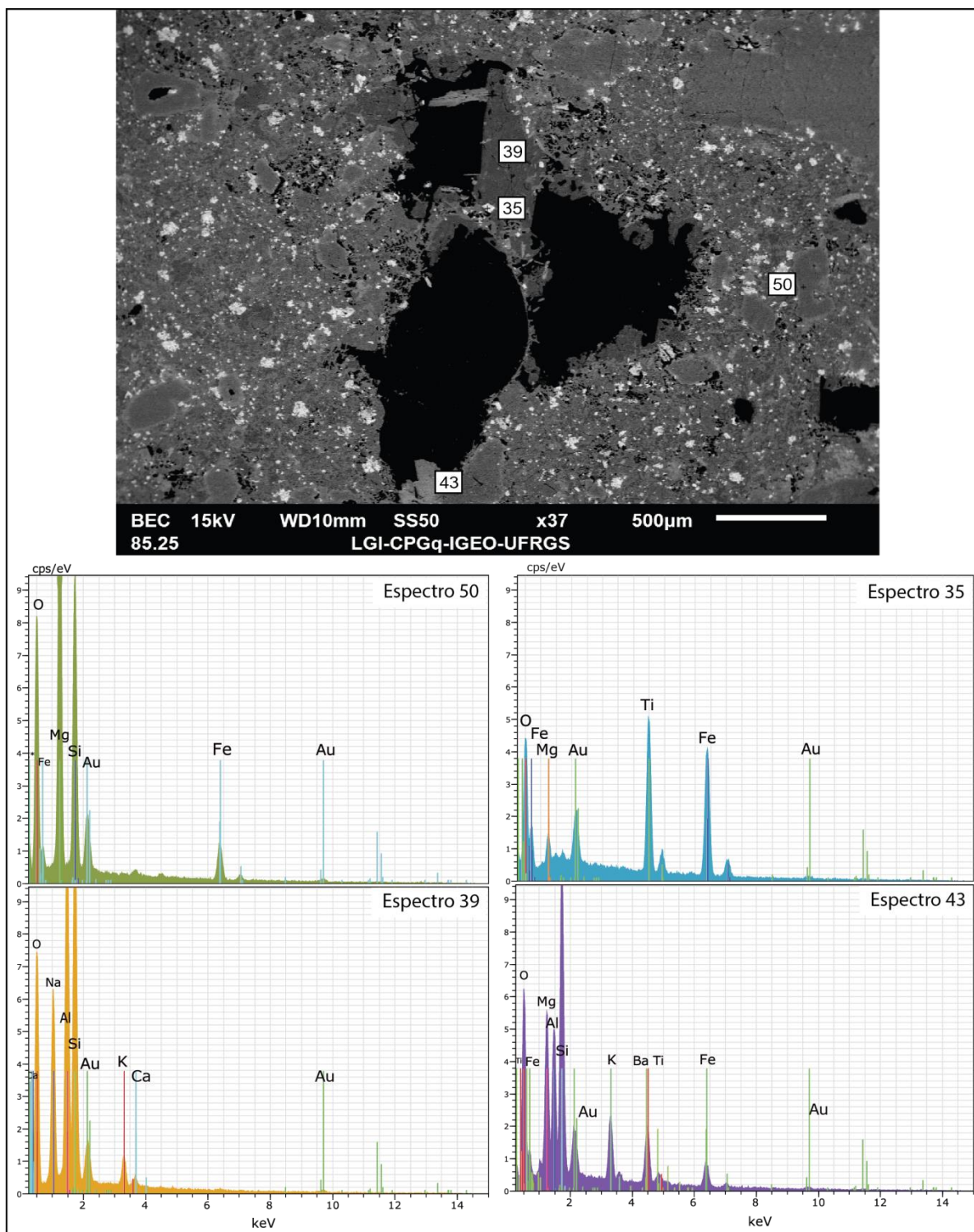


A matriz muito fina sugere um segundo momento de cristalização de maior *undercooling*. O resíduo final de cristalização composto por nefelina, analcima e por vezes flogopita intergranulares, indica deficiência em  $\text{SiO}_2$  e alta concentração de álcalis (principalmente Na). Os cristais de analcima ( $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) comumente são produto de alteração da nefelina ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ). No entanto, segundo Almeida (1961), além de analcima secundária, as lavas do Vulcão do Paredão contêm analcima magmática, evidenciando condições de elevada pressão da água no magma.

As imagens de MEV e análises da composição dos diferentes constituintes por EDS obtidas na lâmina TRV-01C (olivina nefelinito com flogopita) corroboram com os dados de petrografia, conforme observado na figura 41 e nos mapas composicionais da figura 42. Os picos de Mg, Fe, Si identificados no espectro 50 sugerem a presença de olivina magnesiânica (forsterítica); o espectro 35 indica óxidos de Fe com alto teor de Ti (titanomagnetita); o espectro 39 caracteriza um silicato de Al, Na e K, interpretado como nefelina; o espectro 43 caracteriza a flogopita, por conter picos de K, Mg, Fe, Si, Al e O; os picos de Au presentes em todos os espectros representam a metalização da lâmina. Os resultados dos valores obtidos para cada elemento nos diferentes espectros estão no apêndice C.

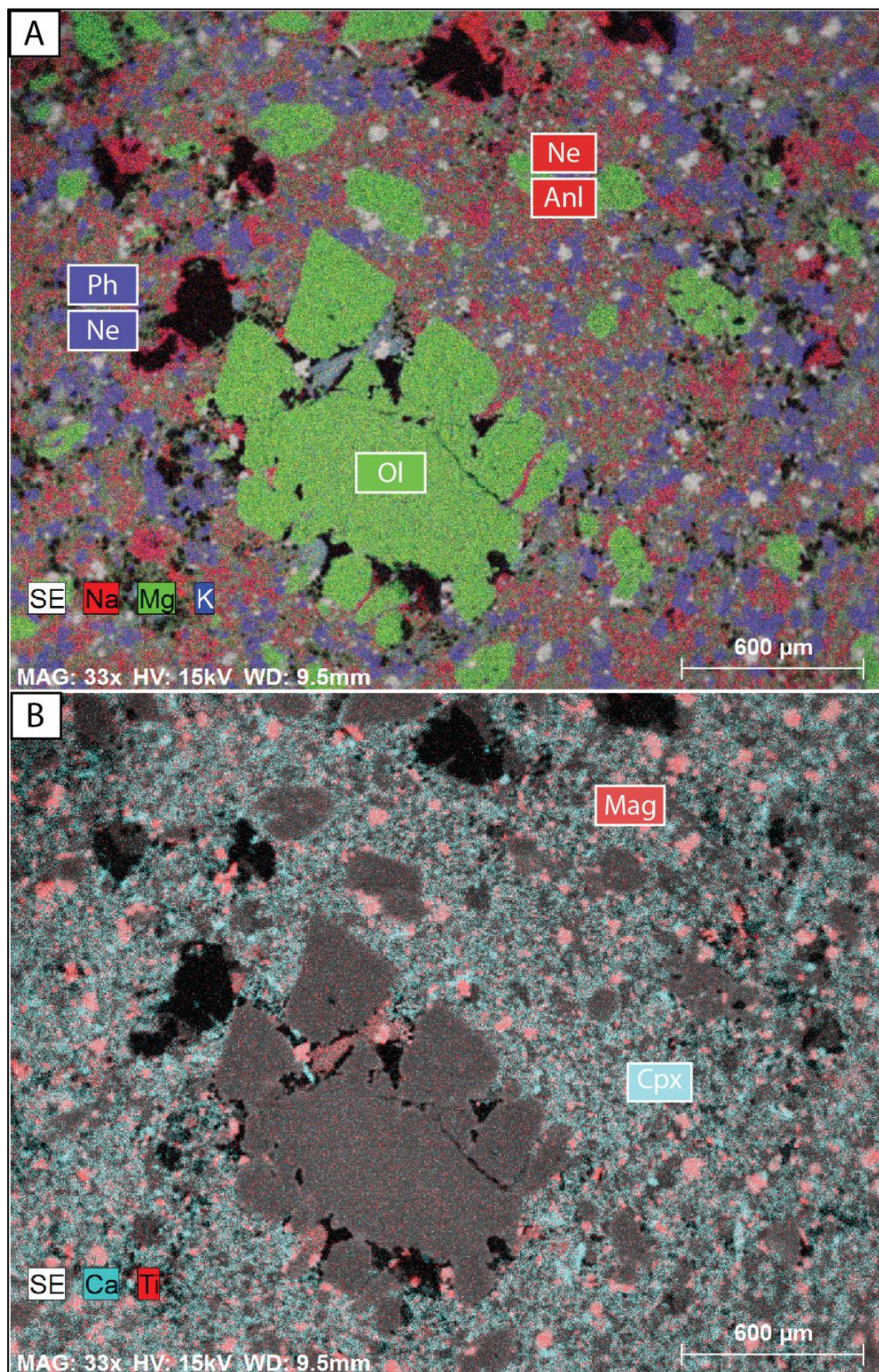
O mapa composicional de Mg, K e Na (Fig. 42A) indica uma matriz rica em Na e K, explicado pela presença da nefelina, analcima e flogopita em contraste com os fenocristais ricos em Mg, evidenciando a forsterita. A distribuição de Ti e Ca na figura 42B é explicada principalmente pela presença de titanomagnetita (Ti), e clinopiroxênio na matriz (Ca).

**Figura 41:** Imagem de MEV da lâmina TRV-01C e respectivos espectros analisados. Espectro 50 - olivina; Espectro 35 - titanomagnetita; Espectro 39 – nefelina; Espectro 43 – flogopita. Os picos de Au representam a metalização da lâmina.





**Figura 42:** Mapas composicionais da lâmina TRV-01C. As caixas de contorno preto representam os elementos utilizados na composição do mapa e de contorno branco os minerais observados na microscopia óptica que refletem as composições apresentadas pelo mapa. A) Mapa de Mg, Na e K, que expressa os cristais de olivina, nefelina e analcima e flogopita, respectivamente; B) Mapa de Ca e Ti, evidenciado principalmente pela cristalização de clinopiroxênio e titanomagnetita.



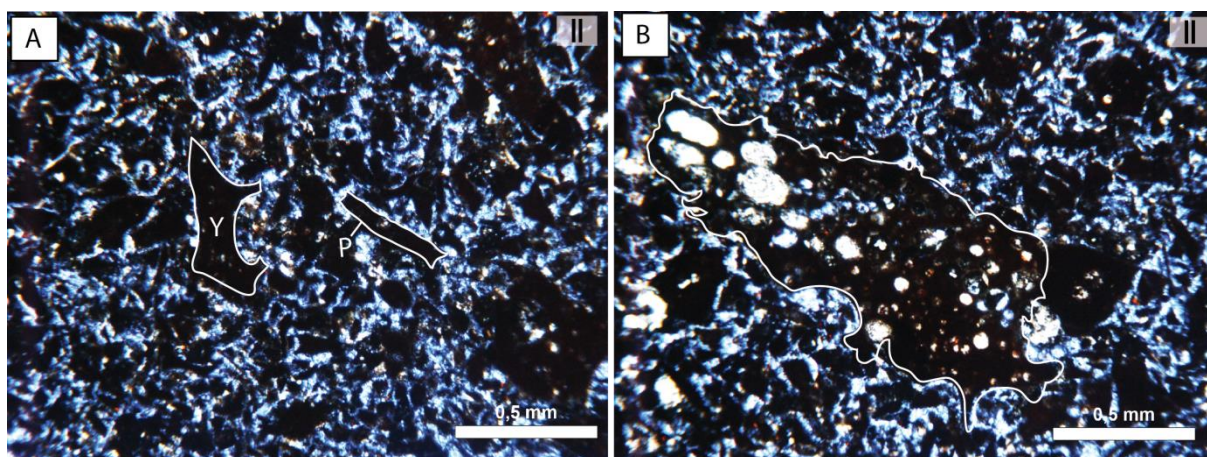


### 8.2.2 Fácies vulcanoclásticas

A fácies vulcanoclástica descrita foi classificada como lúpili-tufo (Tr-07). A rocha tem laminação incipiente, marcada pela variação granulométrica, composta predominantemente composta por *shards* (Fig. 43A) do tipo Y, P e X e fragmentos de escória subangulosos e pouco esféricos de tamanhos que variam de cinza a lúpili (Fig.43B). As partículas têm contatos pontuais e longos e um empacotamento frouxo, suportado pelos grãos. É possível observar fenocristais de olivina completamente oxidados nos fragmentos de escória e zeólita preenchendo parcial ou completamente os poros intra e interpartícula.

Os *shards*, que são fragmentos vítreos de morfologia variada, e os fragmentos escoriáceos subangulosos representam a fragmentação magmática durante a explosão. O tamanho das partículas sugere que o principal mecanismo de transporte foi de queda, gerando laminação plano-paralela. O arcabouço frouxo e forma dos piroclastos indica que as partículas foram depositadas já solidificadas, sem a ocorrência de soldagem.

**Figura 43:** Lúpili-tufo com laminação incipiente. A porosidade é representada pela resina azul. A) *Shards* do tipo Y e P. B) Fragmento de escória com amígdalas de zeólita. II – Nicóis paralelos.



### 8.3 CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA

Foram utilizadas seis amostras representativas para a caracterização geoquímica do Vulcão do Paredão (tabela 10). A perda ao fogo (PF) das amostras é de 0,44 – 1,92 e foi desconsiderada para evitar qualquer efeito de alteração/intemperismo no tratamento dos dados, sendo o percentual dos elementos maiores recalculado para 100%. O conteúdo de sílica recalculado varia de 39,82 - 40,20 %, indicando que as rochas são ultrabásicas (<45%). O teor de álcalis ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ) varia de 3,35 – 6,55 % e no diagrama de classificação Álcalis vs. Sílica (LE BAS et al., 1986) as amostras são alcalinas e ocupam o campo dos foiditos (Fig. 44).

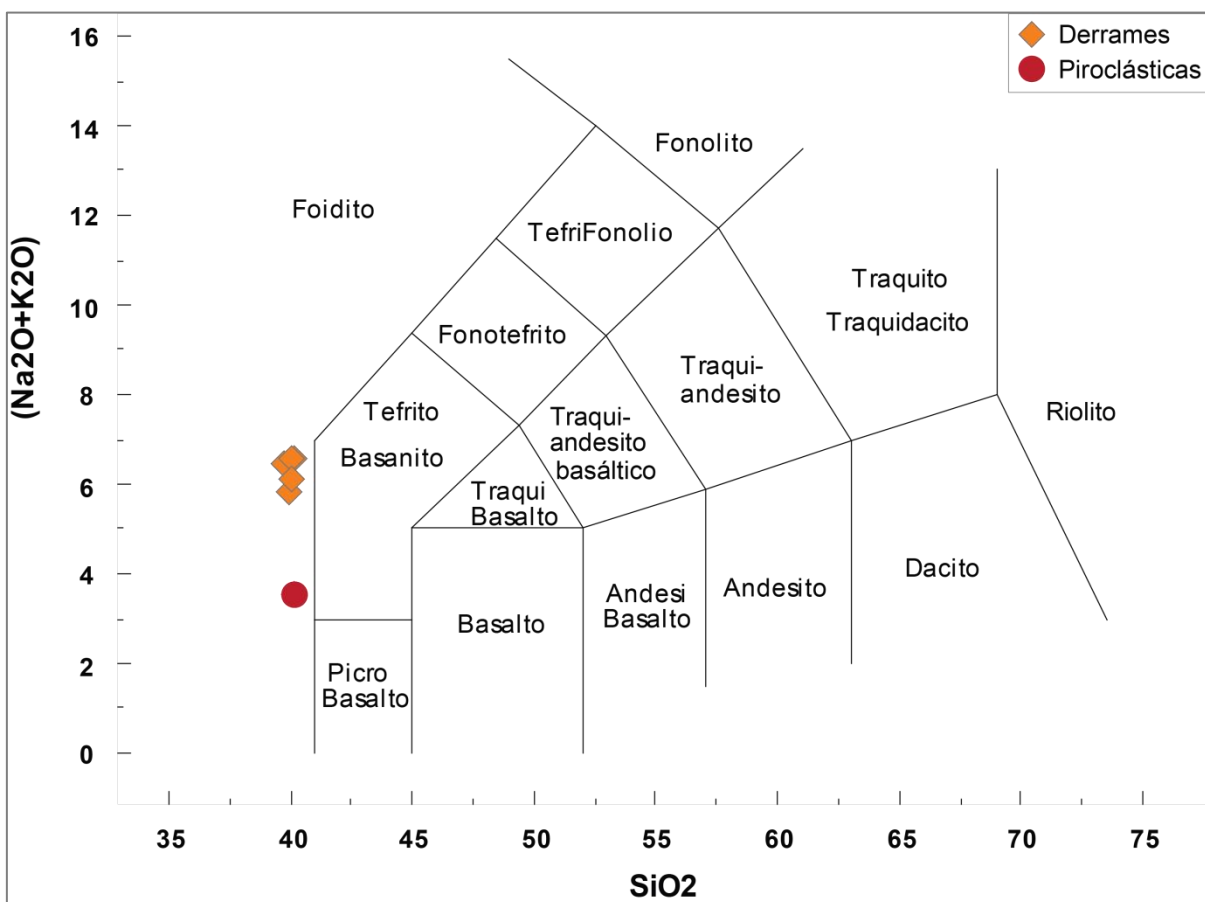
O MgO foi utilizado como índice de diferenciação nos diagramas de Harker. O diagrama MgO (% em peso) vs. elementos maiores (% em peso) (Fig.45) evidencia um decréscimo de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{FeO}_t$  e um aumento relativo de  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  e  $\text{P}_2\text{O}_5$  com a diferenciação magmática. A diminuição de  $\text{SiO}_2$  está associada à cristalização de olivina precoce e posterior fracionamento de clinopiroxênio. O  $\text{K}_2\text{O}$  decresce com a cristalização da nefelina, analcima e flogopita. O decréscimo de  $\text{FeO}_t$  ocorre pelo fracionamento de titanomagnetita em grande quantidade. A rocha piroclástica analisada apresenta um valor mais elevado de  $\text{FeO}_t$  e Ti por conta do alto grau de oxidação.

O trend de  $\text{Na}_2\text{O}$  é controlado pela cristalização da nefelina e analcima na matriz. O aumento de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  com a diferenciação ocorre pela ausência de feldspatos e cristalização tardia de feldspatóides e o de  $\text{TiO}_2$  sugere a cristalização tardia de titanomagnetita. Ainda que petrograficamente a apatita não tenha sido identificada, nas análises de EDS em MEV alguns espectros (ex. espectro 47 – APÊNDICE C) sugerem a composição de um fosfato de cálcio e cloro, o que poderia explicar o aumento de  $\text{P}_2\text{O}_5$ . O CaO tem uma correlação negativa acima de 12,76% de MgO, indicando que a cristalização é controlada pela olivina, sendo o Ca consumido principalmente na cristalização de clinopiroxênio da matriz.

**Tabela 10:** Resultado de elementos maiores (% em peso) e elementos traço (ppm), não recalculados para 100%, com Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> representando o ferro total.

<b>AMOSTRA</b>	<b>TRV-01B</b>	<b>TRV-01C</b>	<b>TRV01F1</b>	<b>TRV-03A</b>	<b>TRV-03B</b>	<b>TRV-03F</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	38,65	39,53	39,10	39,16	39,17	38,68
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	9,40	9,34	9,58	9,28	9,35	9,54
<b>TiO<sub>2</sub></b>	4,90	4,76	4,90	4,86	4,84	5,87
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	13,76	14,00	13,78	14,38	14,07	16,12
<b>MnO</b>	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
<b>MgO</b>	12,56	13,04	12,67	13,19	13,16	11,92
<b>CaO</b>	10,76	10,37	10,42	10,49	10,37	10,01
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	5,43	3,41	3,72	4,89	3,56	3,18
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0,79	3,03	2,65	0,81	2,40	0,19
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0,66	0,74	0,62	0,61	0,62	0,54
<b>SO<sub>4</sub></b>	nd	nd	nd	nd	nd	nd
<b>PF</b>	1,39	nd	0,44	1,35	0,53	1,92
<b>Total</b>	<b>98,46</b>	<b>98,38</b>	<b>98,03</b>	<b>99,17</b>	<b>98,24</b>	<b>98,14</b>
<b>Y</b>	33,1	44,7	43,6	46,1	44,4	43,3
<b>Pb</b>	1,9	1,9	0,8	1,9	nd	1,9
<b>Ni</b>	145,9	160,5	147,5	174,0	165,5	131,3
<b>Co</b>	87,1	87,0	87,3	92,0	89,0	104,5
<b>Cu</b>	44,3	49,4	48,3	48,8	48,4	49,9
<b>Ga</b>	15,5	14,2	15,1	14,5	14,8	16,8
<b>Sr</b>	807,1	772,3	741,6	788,5	778,7	611,1
<b>Zr</b>	144,3	139,8	137,0	141,8	138,7	138,3
<b>Zn</b>	130,2	128,1	136,5	151,4	126,0	143,4
<b>Nb</b>	74,8	73,5	72,8	74,7	71,9	74,9
<b>Rb</b>	nd	77,3	76,4	80,1	79,3	86,9
<b>As</b>	3,9	4,2	3,9	3,3	4,2	3,9
<b>Cr</b>	463,1	467,8	438,4	478,8	472,9	398,0
<b>Ba</b>	963,8	936,3	871,4	838,9	914,7	1118,1

**Figura 44:** Diagrama de classificação geoquímica TAS (Álcalis vs. Sílica) para rochas vulcânicas (LE BAS et al. 1986).

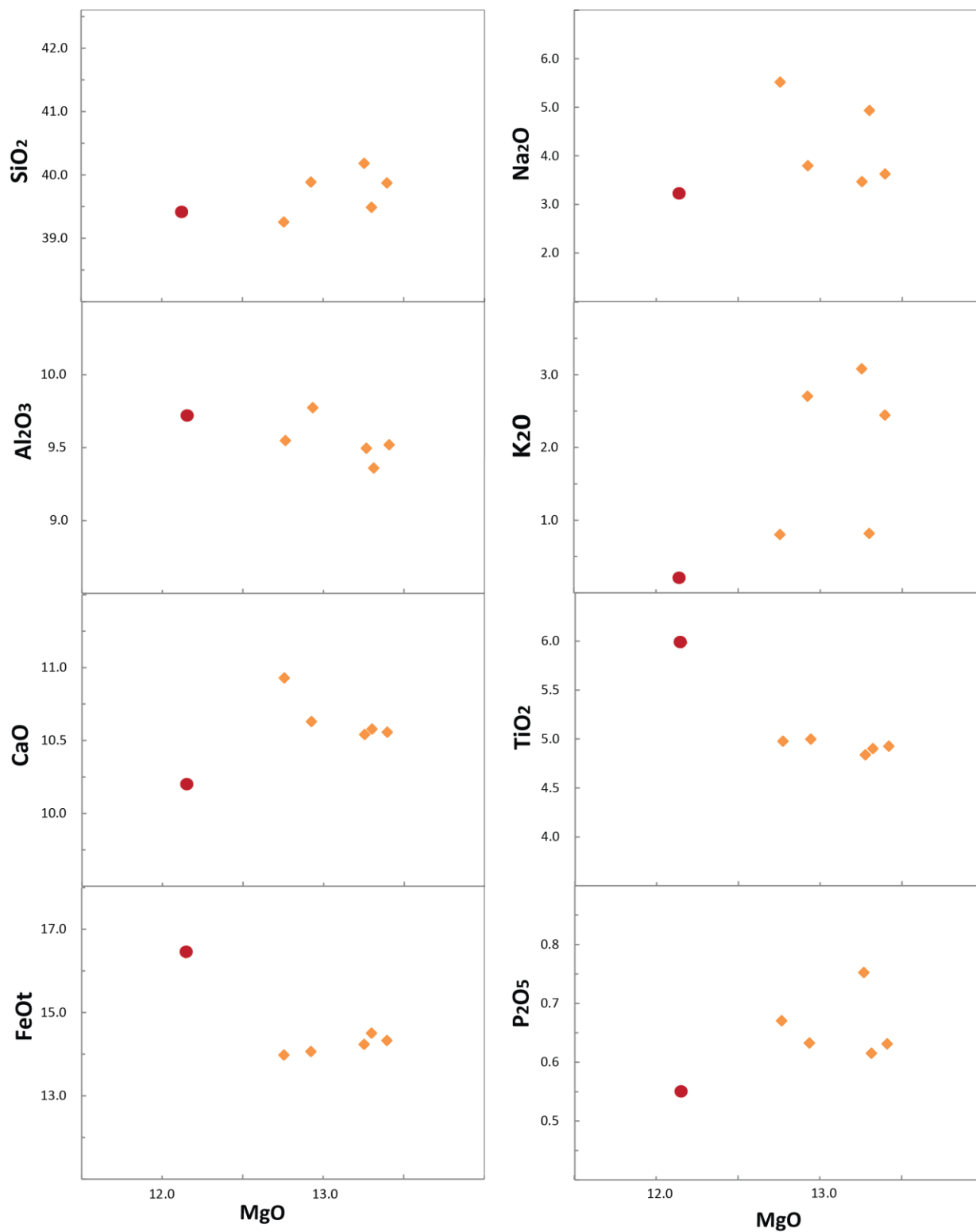


O diagrama de Harker de MgO (% em peso) vs. elementos traços (ppm) (Fig.46), mostra uma correlação positiva de Ni, Cr e Co com o MgO, indicando que a cristalização foi controlada predominantemente pelo fracionamento de olivina precoce. O aumento de Rb, Ba e Sr com a diferenciação mostra que, assim como o  $Al_2O_3$ , estes elementos não se ajustaram na estrutura de nenhum mineral, enriquecendo o resíduo final de cristalização.

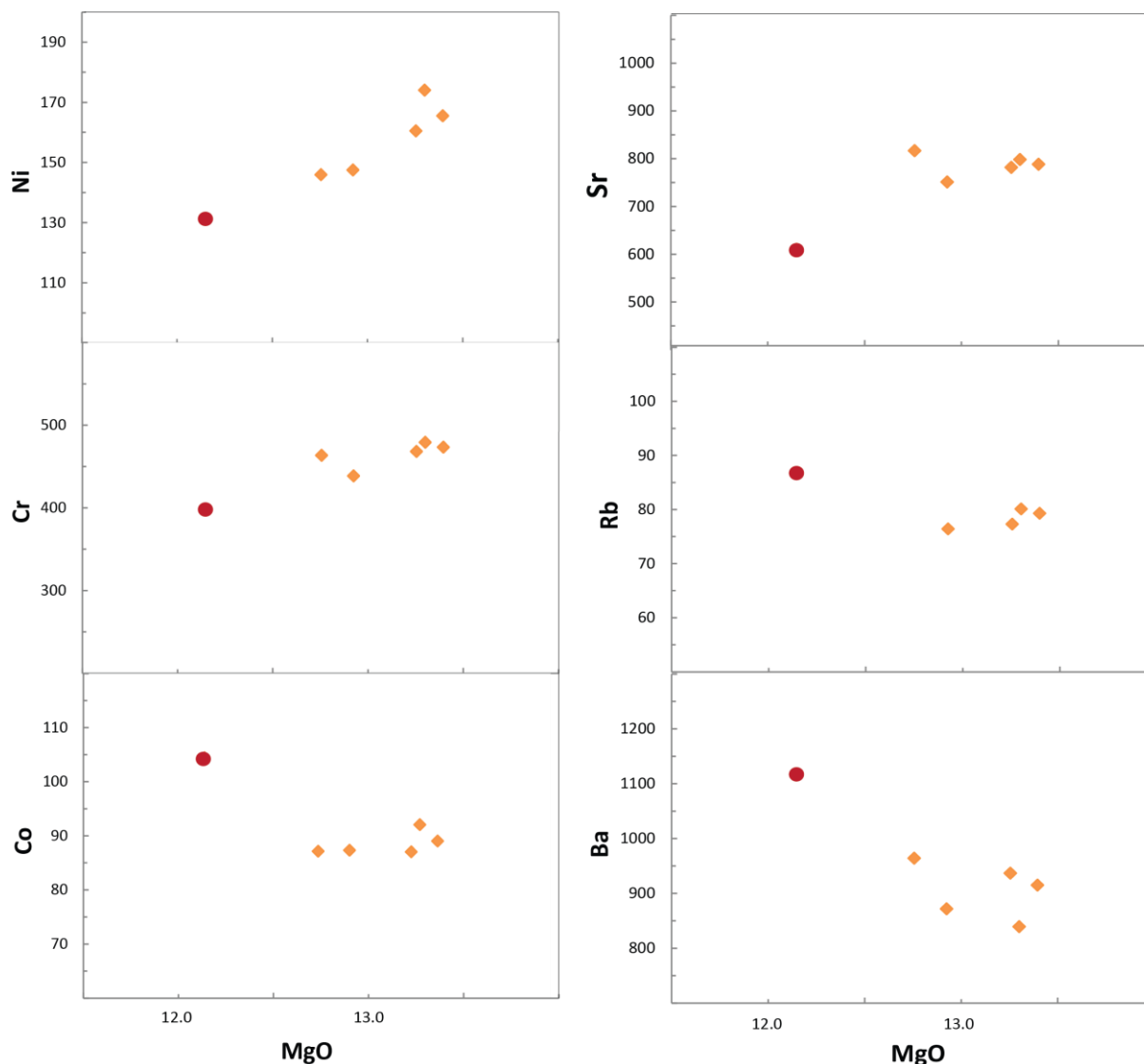
De acordo com o cálculo da norma CIPW (Fig. 47), todas as amostras contêm nefelina ( $Ne_n$ ) e olivina ( $Ol_n$ ) normativa, sendo subsaturadas em sílica. A amostra TRV-03F (piroclástica) difere na composição de minerais normativos por apresentar albita ( $Ab_n$ ) e ortoclásio ( $Or_n$ ) enquanto que o restante contém leucita ( $Lc_n$ ). Isto ocorre pois a fácies piroclástica possui menores valores de álcalis, então a quantidade de sílica disponível é utilizada para formar feldspatos.



**Figura 45:** Diagrama MgO (% em peso) vs. elementos maiores (% em peso) do Vulcão do Paredão. Os losangos laranjas representam derrames e o círculo vermelho a amostra piroclástica.



**Figura 46:** Diagrama MgO (% em peso) vs. elementos traços (ppm) do Vulcão do Paredão. Os losangos laranjas representam derrames e o círculo vermelho a amostra piroclástica.



No entanto, nas amostras com leucita normativa, que também são as que apresentam maior conteúdo de nefelina normativa, os valores de álcalis são mais altos e não há sílica suficiente para formar feldspatos. Além disso, em algumas destas amostras ocorre flogopita, que por ser um filossilicato hidratado, não é considerado no cálculo da norma CIPW e seus elementos são redistribuídos em outros minerais. Nestes casos, o K da flogopita é utilizado para formar leucita normativa.

A ocorrência de acmita normativa ( $Ac_n$ ) na amostra TRV-01B, que é a amostra com mais alto teor de Na, indica peralcalinidade. O ortossilicato de cálcio

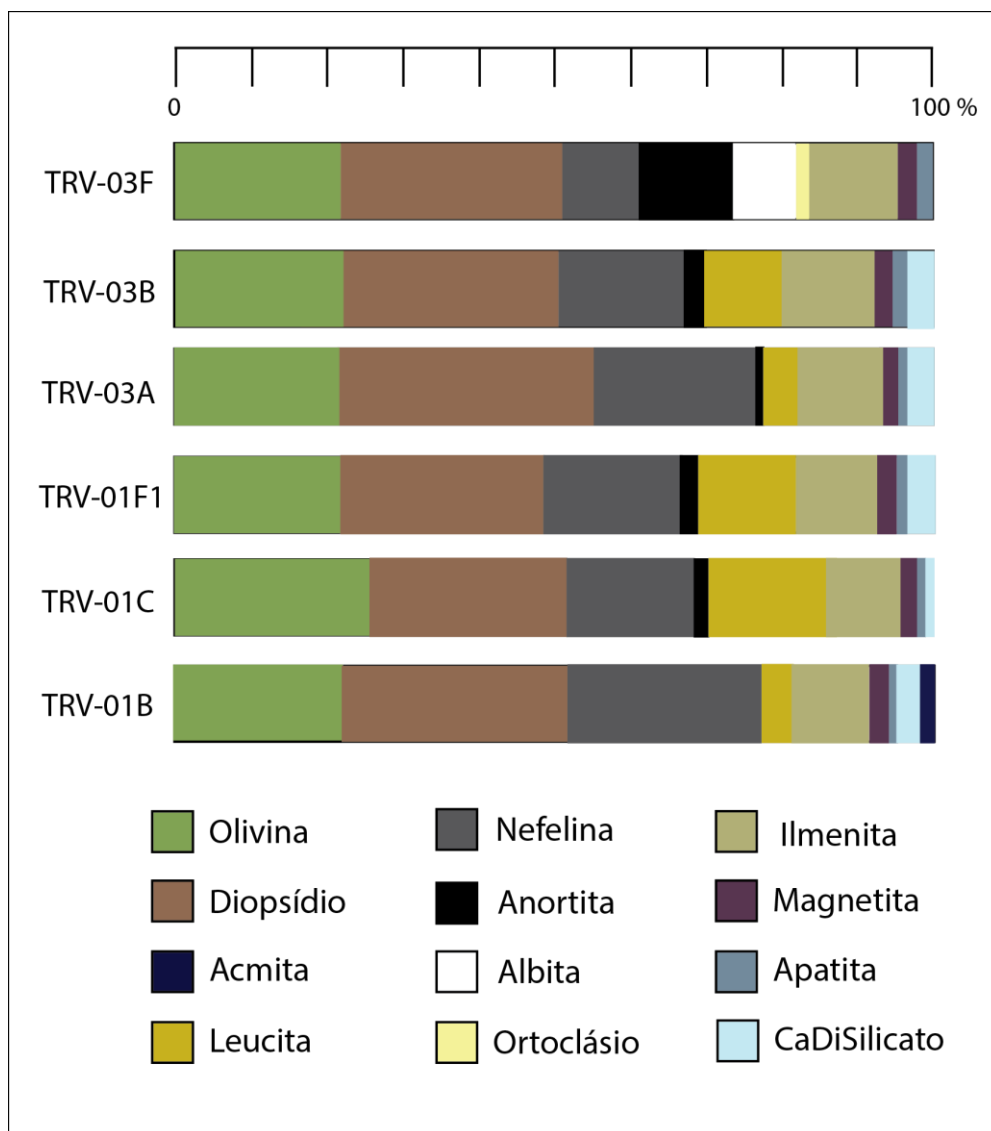
( $Cs_n$ ) indica rochas fortemente alcalinas e subsaturadas em  $SiO_2$ , nas quais o clinopiroxênio é decomposto em olivina ( $Ol_n$ ), ortossilicato de cálcio ( $Cs_n$ ) e sílica:



2 clinopiroxênios  $\rightarrow$  olivina + ortossilicato de cálcio + 2 sílica

A partir da interpretação dos dados geoquímicos, observam-se pequenas variações composicionais entre as amostras, mas todas são subsaturadas em  $SiO_2$  e pertencem à série alcalina sódica. Portanto, a variação geoquímica não é significativa para explicar a diversidade dos padrões de porosidade descritos na próxima seção.

**Figura 47:** Proporção de minerais normativos para as amostras do Vulcão do Paredão segundo cálculo da norma CIPW.



## 8.4 PADRÕES DE POROSIDADE

Nesta seção são expostos os padrões de macro e microporosidade obtidos para as diferentes fácies dos depósitos do Vulcão do Paredão.

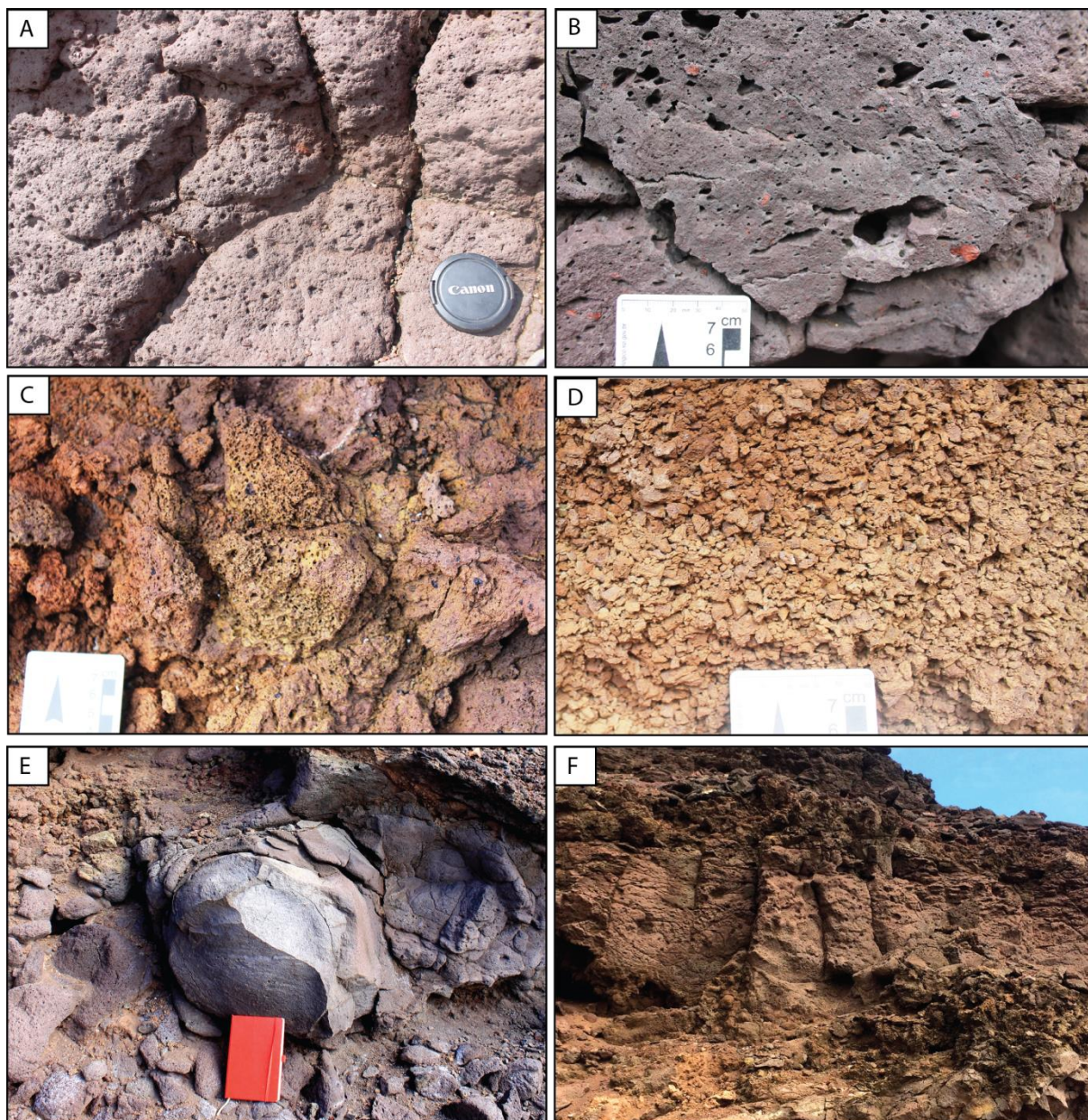
### 8.4.1 Macroporosidade

A vesiculação nas fácies coerentes (Npv e Npm) foi representada em detalhe nas seções colunares TRV-01,02 e 03. Foi estimada em aproximadamente 5% na fácies Npm e 30% na fácies Npv e é heterogênea, concentrando-se na porção central do núcleo dos derrames menores (Fig. 48A) e nas porções periféricas do núcleo dos derrames mais espessos (Fig. 48B). As vesículas são arredondadas, milimétricas a centimétricas (até 1,5 cm) e por vezes estiradas segundo o fluxo, por conta do aumento da viscosidade durante o resfriamento da lava.

Nas fácies vulcanoclásticas a vesiculação foi estimada entre 30-40%, sendo os menores valores na fácies autoclástica (Nb) (Fig. 48C). A redução da porosidade na fácies autoclástica ocorre porque ela é restrita a microvesiculação intrafragmentos, diferentemente das fácies piroclásticas que tem poros entre os fragmentos. As fácies piroclásticas, compostas quase que exclusivamente por fragmentos de escória não soldados, com grau de seleção alto a moderado, têm porosidade homogênea, representada pela microvesiculação dentro dos fragmentos de escória e pela porosidade entre as partículas (Fig. 48D).

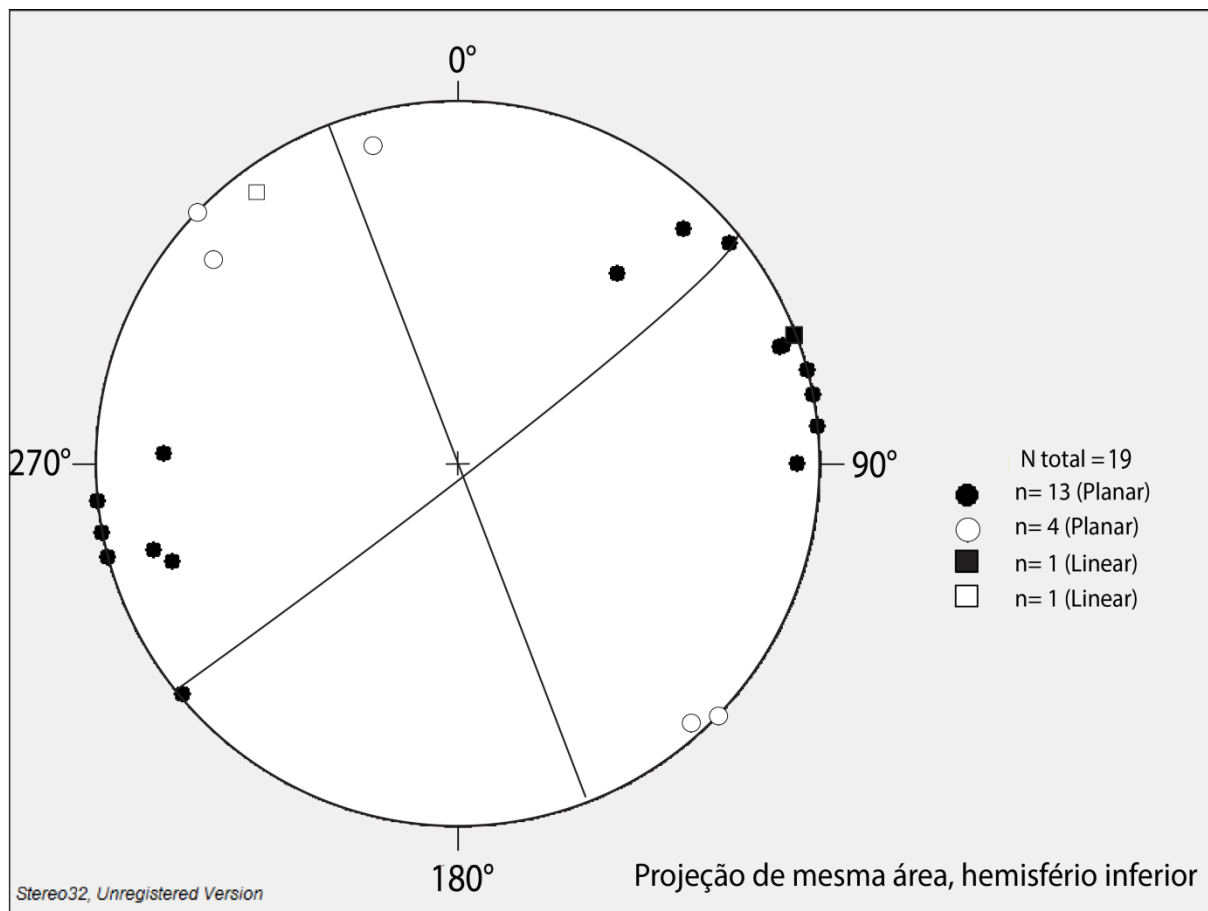
Além da vesiculação, é possível observar uma elevada heterogeneidade no padrão de fraturas dos depósitos da Praia das Tartarugas. Foram identificadas fraturas curvilíneas (Fig. 48E), resultantes da alteração dos derrames e fraturas planares com diversas atitudes, geradas pela tectônica. Através das medidas obtidas (apêndice D), destaca-se um plano de fraturas preferencial (Fig. 48E), sub-vertical com direção NNW-SSE e um plano secundário sub-vertical com direção NE-SW (Fig. 49). Estes planos podem ser interpretados como um conjugado de fraturas, com ângulo agudo de  $\sim 72^\circ$ , o que sugere um campo tensional com  $\sigma_1$  sub-horizontal, de direção  $014^\circ$  (NNE). Além disso, o padrão de fraturas NNE-SSW coincide com o alinhamento da metade preservada do cone de escórias, indicando um possível desabamento de parte do cone a partir de falhas de mesma direção.

**Figura 48:** A) Porção central de núcleo de derrame com vesículas arredondadas; B) Porção inferior de núcleo de derrame com vesículas irregulares e estiradas; C) Microvesiculação dos fragmentos de lava em autobrecha; D) Lapilito com porosidade entre os fragmentos de escória microvesiculados. E) Alteração esferoïdal gerando padrão de fraturas circulares; F) Plano de fraturas preferencial dos derrames do Vulcão do Paredão em núcleo de derrame 'A'a.





**Figura 49:** Polos dos planos de fratura (n=17), projetados em estereograma de mesma área, hemisfério inferior. Os círculos pretos (n=13) representam os polos dos planos de fratura NNW-SSE e os brancos (n=4), o conjugado com direção NE-SW. Os quadrados são os polos dos planos médios, representados na figura pelos grandes círculos.



#### 8.4.2 Microporosidade

A avaliação da microporosidade dos derrames do Vulcão do Paredão foi feita nas fácies coerentes e os resultados são expressos na tabela 11. Para estas fácies, a porosidade varia de 10,66 a 27,67% e é predominantemente do tipo vesicular, mas também ocorre como intracristalina, intercristalina, móldica e de fraturas.

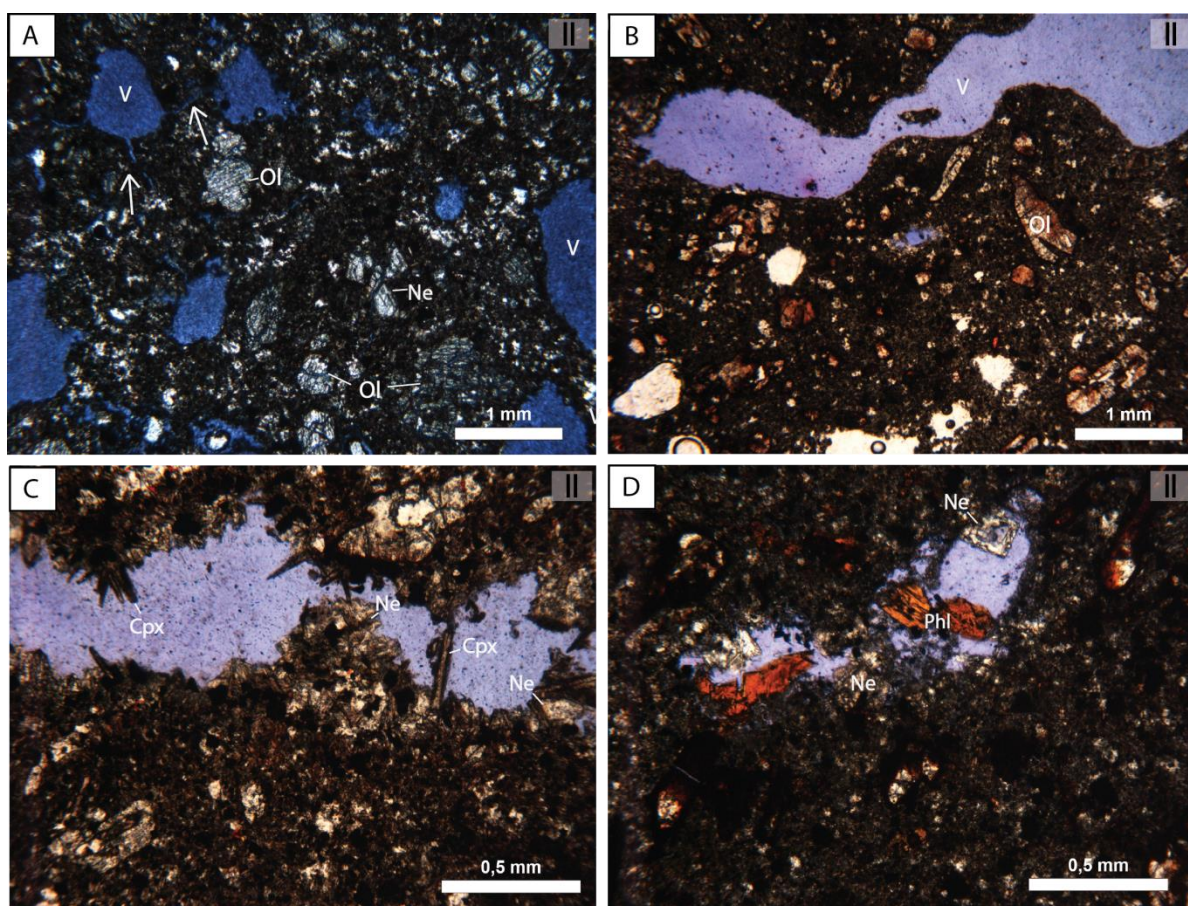
Vistas sob o microscópio óptico, as vesículas podem ser circulares, irregulares ou alongadas (Fig. 50), indicando processo primário de desgaseificação magmática. As vesículas circulares/irregulares (Figs. 50A e 51F) representam em 3D bolhas com diâmetros que variam de 0,2 a 2,5 mm e as alongadas (Fig. 50B), representam cilindros que variam de milímetros a centímetros de comprimento,

**Tabela 11:** Percentual dos diferentes tipos de porosidade, porosidade total e de fenocristais dos derrames do Vulcão do Paredão.

<b>Fácies</b>	<b>Amostra</b>	<b>Porosidade total (%)</b>	<b>Vesicular (%)</b>	<b>Intracristalina (%)</b>	<b>Fratura (%)</b>	<b>Móldica (%)</b>	<b>Intercristalina (%)</b>	<b>Fenocristais (%)</b>
<b>Npv</b>	TRV-01A	27,34	13,67	4	4	0	2,67	16,34
<b>Npv</b>	TRV-01B	19	7,33	2	3,67	1	5	15,33
<b>Npm</b>	TRV-01C	10,66	3,33	2	1	1	3,33	22
<b>Npv</b>	TRV-01F1	15,66	9,33	4,33	0	0	2	15
<b>Npv</b>	TRV-01F2	14	10,67	0,33	0,67	0	2,33	15,66
<b>Npv</b>	TRV-03A	24	10,64	4,33	4,33	0	5	14,33
<b>Npv</b>	TRV-03B	20,66	13	2	2,33	0	3,33	18,67
<b>Npv</b>	Tr-08	27,67	17,67	0	6,67	0	3,33	15,33
<b>MÉDIA</b>		19,87	10,70	2,37	2,83	0,25	3,37	16,58

resultantes do estiramento das vesículas arredondadas por conta do aumento da viscosidade da lava. Os maiores cilindros de vesícula representam a coalescência e estiramento das bolhas esféricas. A porosidade vesicular pode estar conectada por microfraturas e por vezes circundada por cristais aciculares de clinopiroxênio com crescimento perpendicular às paredes da vesícula, nefelina anédrica e titanomagnetita (Fig. 50C) ou ainda com cristais esparsos bem formados de nefelina e biotita, com cerca de 0,3 mm, inclusos nas vesículas (Fig. 50D).

**Figura 50:** Porosidade vesicular. A) Vesículas arredondadas e irregulares, por vezes conectadas por microfraturas (setas brancas); B) Vesículas alongadas, estiradas segundo o fluxo de lava; C) Vesícula alongada circundada por cristais de clinopiroxênio, nefelina e titanomagnetita; D) Inclusão de cristais subédricos de nefelina e flogopita em vesícula. II – Nicóis paralelos.

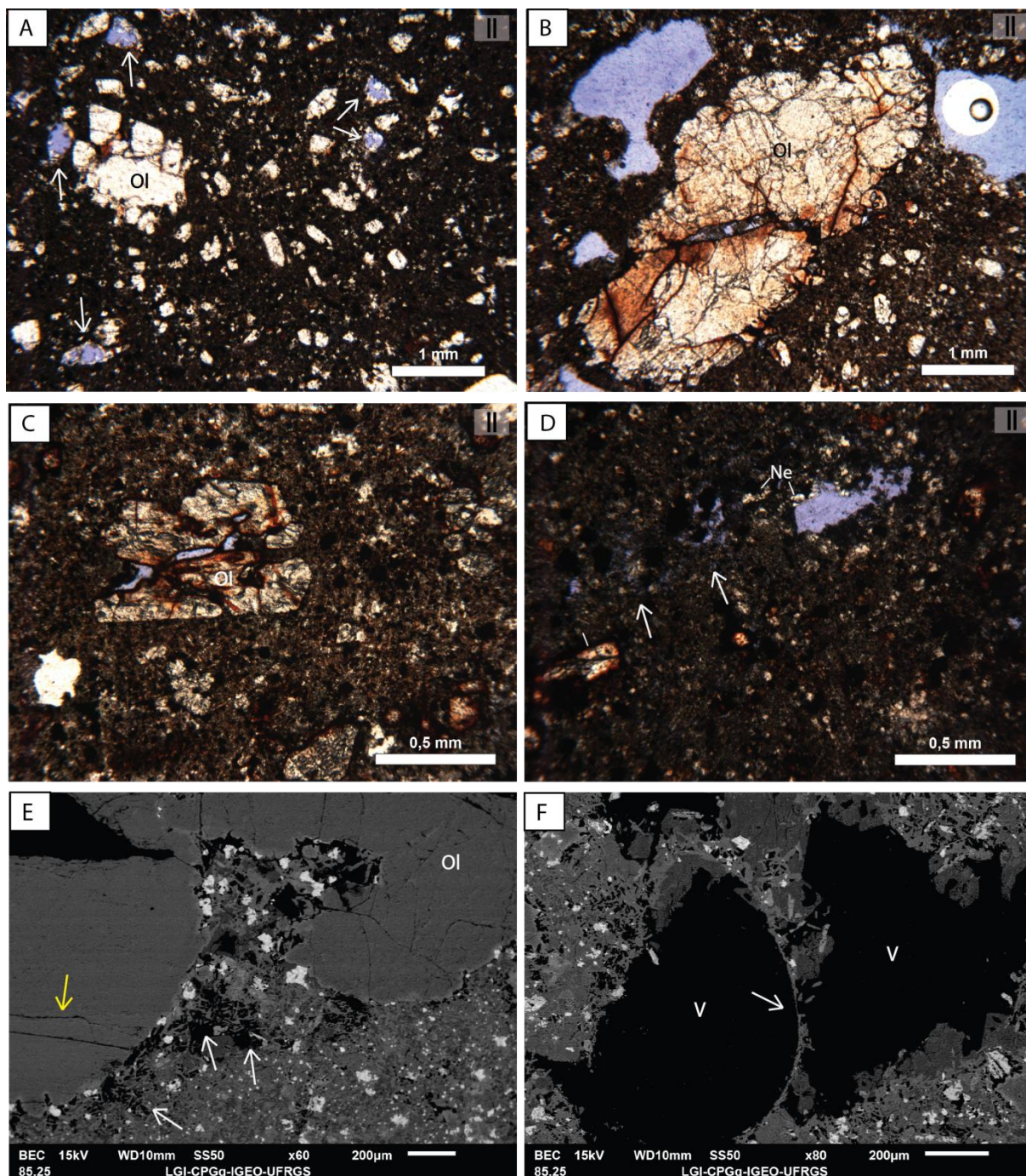


Além da porosidade vesicular, é possível observar poros móldicos da dissolução de cristais de olivina (Fig. 51A). A porosidade de fratura pode ocorrer ao longo da lâmina ou no interior de cristais de olivina (Fig. 51B) e a porosidade intracristalina (Fig. 51C) ocorre devido à morfologia da olivina, que quando esqueletal permite o acúmulo de fases gasosas no interior do cristal. A porosidade



intercristalina é anédrica, possivelmente originada da dissolução da matriz por processos secundários (Figs. 51D e 51E).

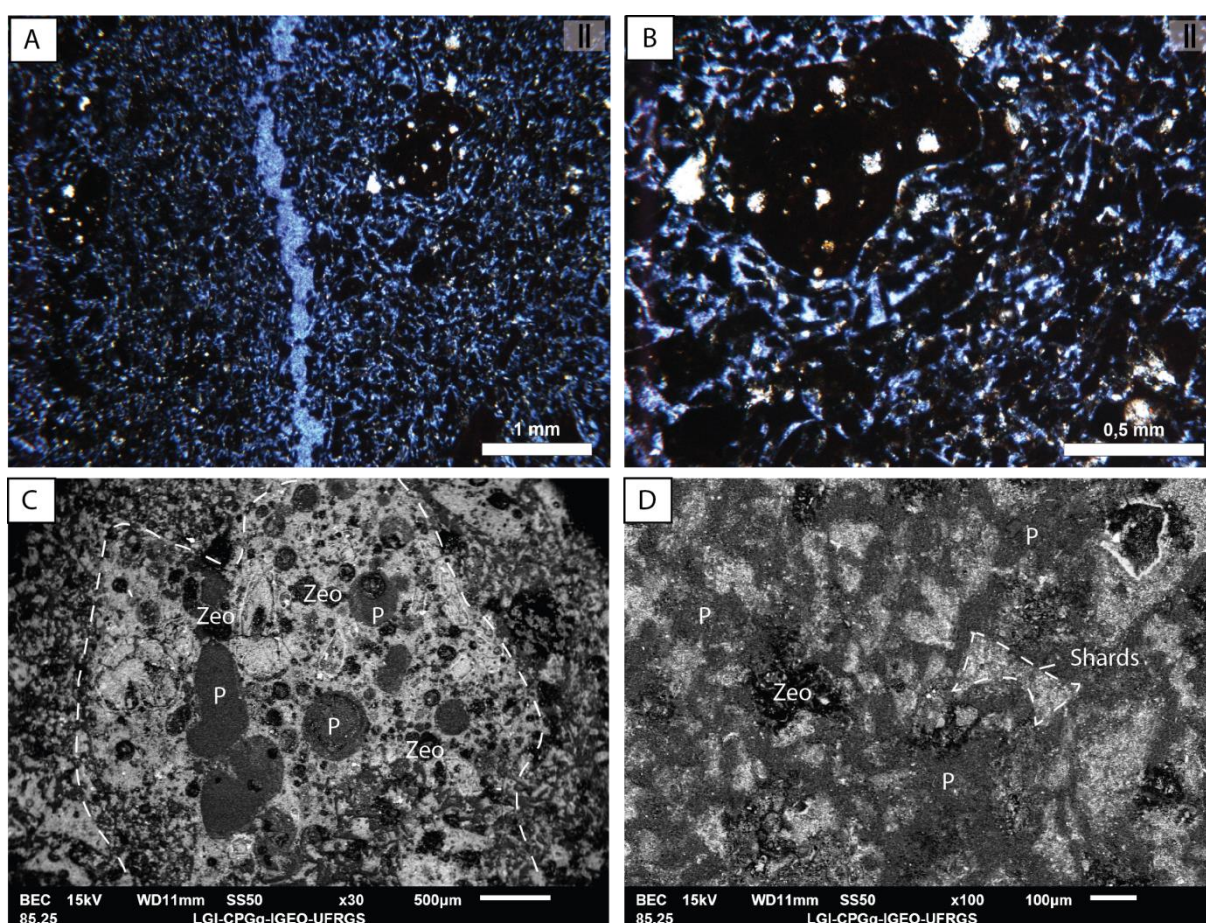
**Figura 51:** A) Porosidade móldica da dissolução de cristais de olivina, com precipitação de cristais de zeolita secundária. B) Porosidade de fratura em olivina; C) Porosidade intracristalina em cristal de olivina; D) Porosidade intercristalina da dissolução da matriz. E) Porosidade intercristalina indicada pelas setas brancas e de fratura em cristal de olivina pela seta amarela em MEV; F) Detalhe de vesículas com geometria circular/oval (esquerda) e irregular (direita) em imagem de MEV; a seta branca indica a borda côncava da vesícula. II – Nicóis paralelos; Ol – Olivina; Ne – nefelina; V- vesícula.





A porosidade na fácies piroclástica descrita é de 41%, sendo predominantemente do tipo interpartícula (Figs. 52B e 52D), decorrente do alto grau de seleção e não soldagem dos fragmentos. Subordinadamente, ocorrem porosidades de fratura (Fig. 52A) e intrapartícula (Figs. 52B e 52C) nos fragmentos escória, que podem estar parcial ou totalmente preenchidos de zeolita (Figs. 52B e 52C).

**Figura 52:** Tipos de porosidade nas fácies piroclásticas. A) Porosidade de fratura; B) Porosidade interpartícula e intrapartícula parcialmente preenchida por zeolita. C) Fragmento de escória (tracejado) com poros intrapartícula arredondados preservados (cinza médio) e zeolitizados (cinza escuro). D) Porosidade interpartícula em imagem de MEV (cinza médio). O cinza claro representa os *shards*. II – Nicóis paralelos; P – porosidade; Zeo – zeolita.



Em suma, a porosidade primária dos derrames é representada pelos tipos vesicular e intracristalina, gerada pela desgaseificação magmática e cristalização da olivina esqueletal e a secundária pelos tipos intercristalina, móldica e de fratura, geradas respectivamente pela dissolução da matriz, de cristais de olivina e tectônica. A porosidade primária nas rochas piroclásticas é representada pelos tipos intra e



interpartícula, originadas respectivamente da vesiculação dos fragmentos escória e pelo arranjo das partículas durante o processo deposicional e a secundária por fraturas.

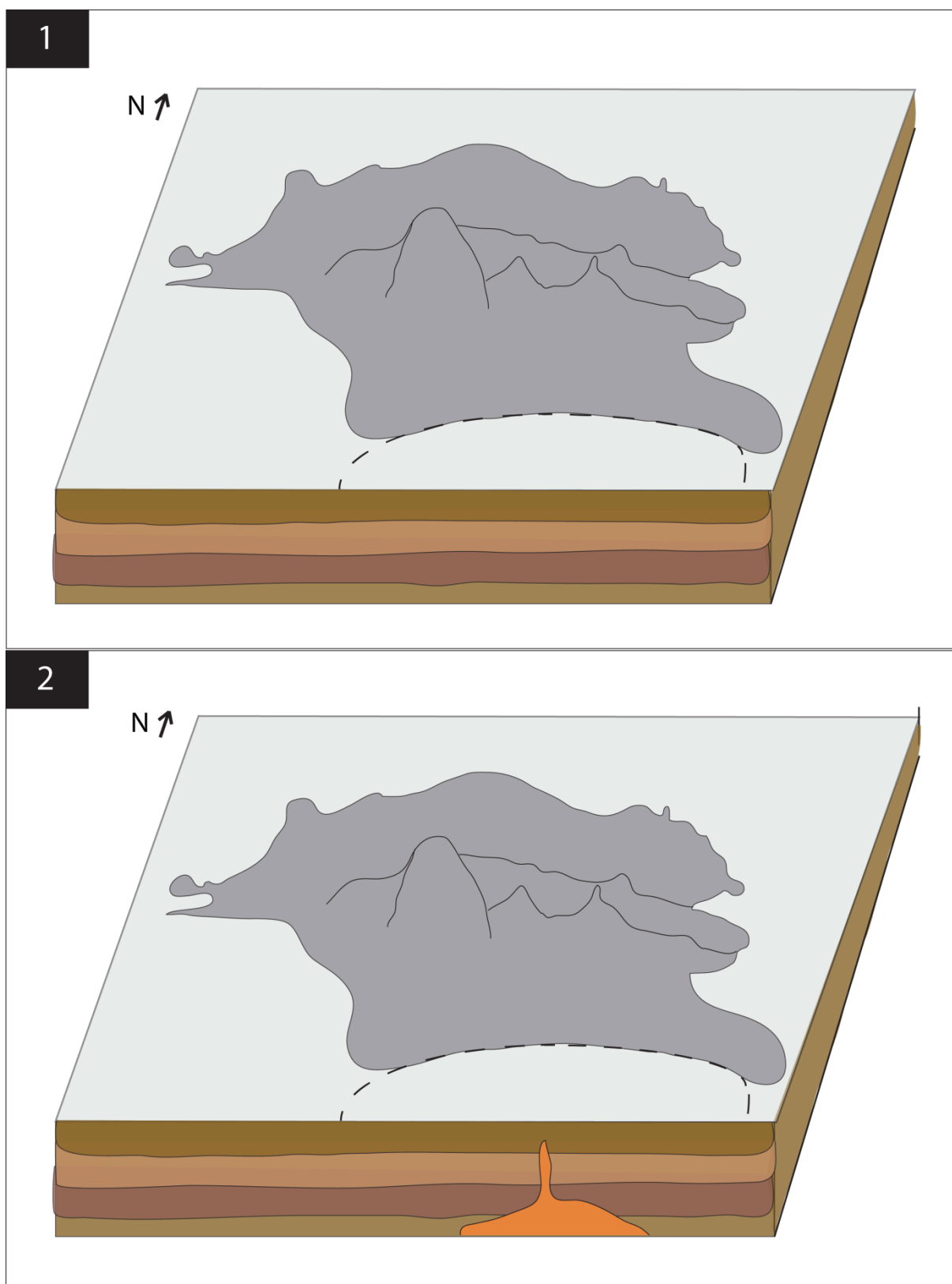
Desta forma, pode-se concluir que a porosidade dos depósitos do Vulcão do Paredão é predominantemente primária, independentemente da faciologia. No entanto, a variação faciológica influencia na porcentagem da porosidade absoluta, sendo maior nas fácies piroclásticas do que nas fácies coerentes. Em termos de reservatório, as fácies coerentes apresentam valores de porosidade absoluta considerados de razoável a excelente de acordo com Hyne (2012). Porém, a porosidade só é efetiva nestas fácies quando as vesículas ou poros intercrystalinos são conectados por microfraturas. As fácies piroclásticas tem uma porosidade absoluta excelente, sendo a maior parte interconectada, o que poderia caracterizá-las como rocha reservatório em bacias vulcanossedimentares.

## 8.5 INTEGRAÇÃO DOS DADOS

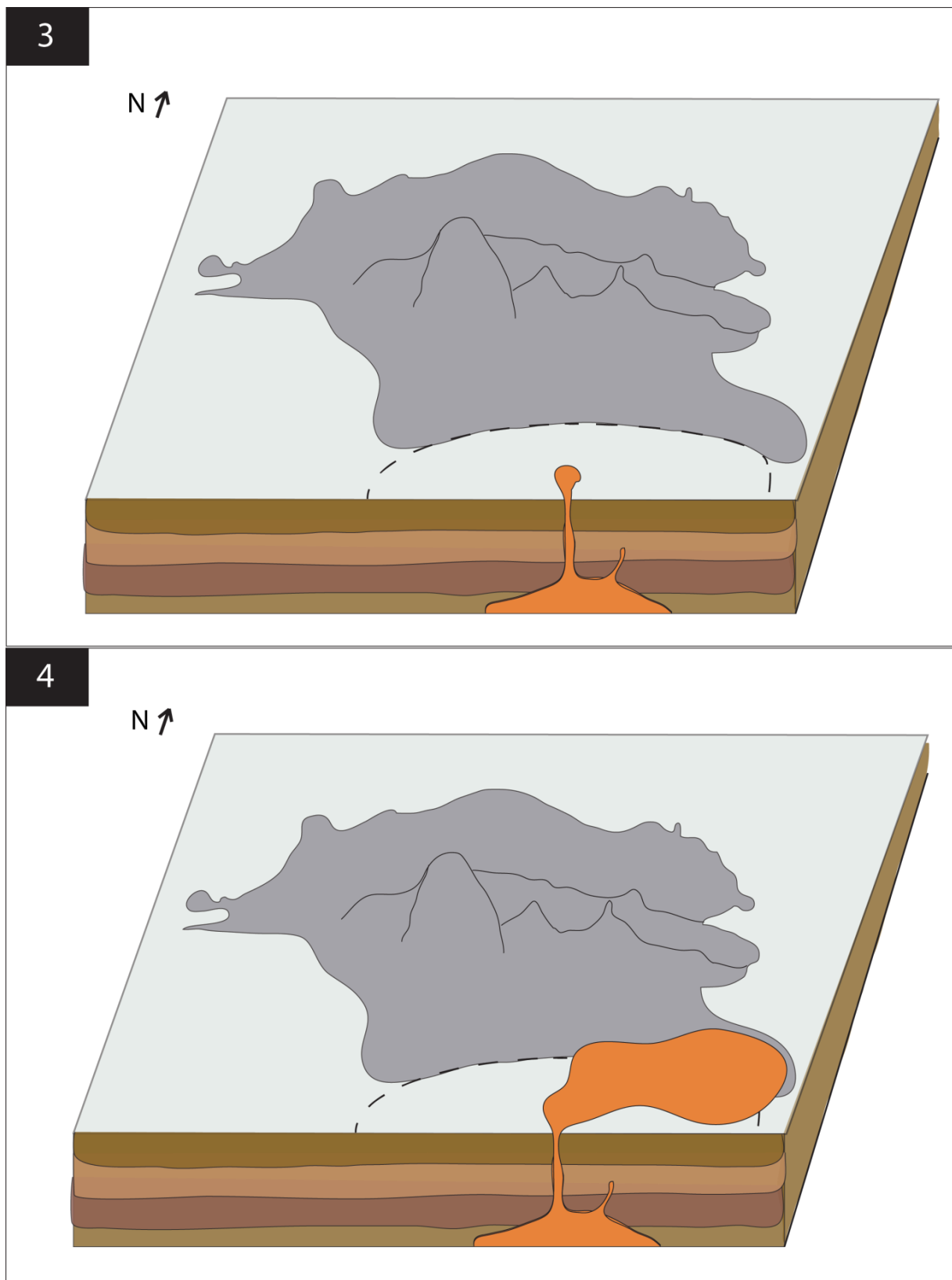
A partir da integração do arcabouço estratigráfico com os padrões de porosidade e caracterização petrológica foi possível desenvolver um modelo evolutivo para o Vulcão do Paredão representado pelos estágios 1-7 (figuras 53 a 57):

- 1) Estágio anterior ao início da atividade vulcânica que gerou os depósitos do Vulcão do Paredão;
- 2) Início da atividade magmática de composição alcalina sódica e subsaturada em  $\text{SiO}_2$  em profundidade;
- 3) Rápida ascensão magmática, dando início ao vulcanismo havaiano; (possivelmente o início da atividade vulcânica foi do tipo freatomagmática, resultado da interação do magma-água. No entanto, não foram observadas estruturas que comprovem tal hipótese).
- 4) Fase de vulcanismo havaiano, caracterizada por fluxos de lava e jatos de lava incandescentes lançados no ar (*fire fountaining*), com a colocação de derrames de morfologia 'A'a intercalados com eventuais depósitos de queda;
- 5) Final da fase havaiana, com a colocação de derrames do tipo *pahoehoe* e *rubby pahoehoe*. Os derrames de olivina nefelinito com alto teor de voláteis sofreram desgaseificação durante o resfriamento, gerando a porosidade vesicular que predomina nestes depósitos.
- 6) Diminuição da velocidade de ascensão magmática, favorecendo a estagnação e o rompimento de bolhas no topo do conduto vulcânico e dando início à fase de vulcanismo estromboliano.
- 7) Fase de vulcanismo estromboliano, com a construção do cone de escórias a partir da queda de fragmentos juvenis ejetados do conduto e de cinzas vulcânicas.
- 8) Término da fase estromboliana; os depósitos piroclásticos gerados têm grau de seleção alto a moderado, com a predominância da porosidade interpartícula gerada no processo deposicional. Provável desabamento de parte do cone de escórias a partir de um plano de falha NNE-SSW, deixando o cone com a morfologia atual.

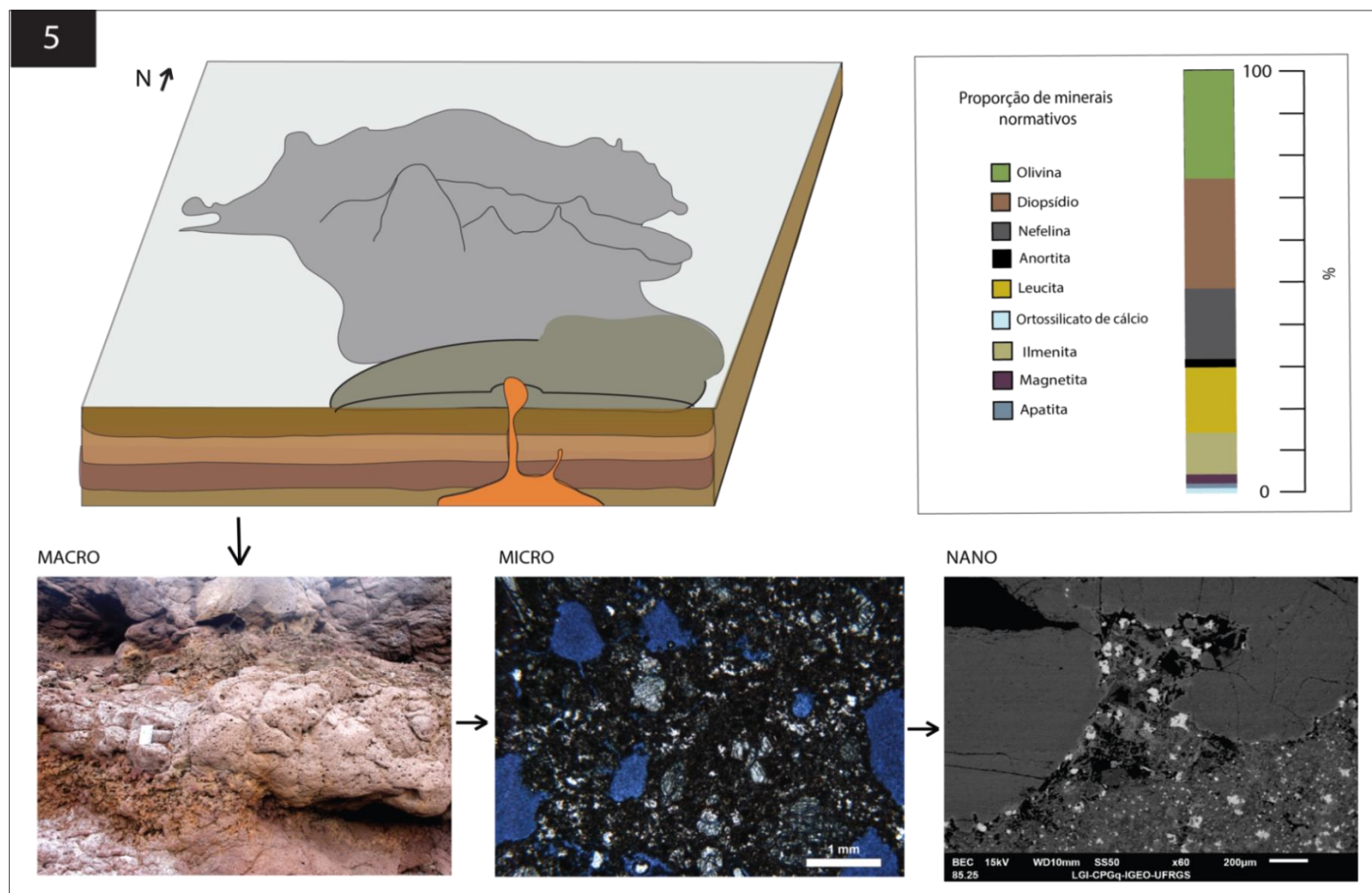
**Figura 53:** Estágios 1 e 2 na evolução do Vulcão do Paredão. Representação da morfologia da ilha antes do vulcanismo. O tracejado indica a posição atual dos depósitos.



**Figura 54:** Estágios 3 e 4 da evolução do Vulcão do Paredão, de início da atividade Havaiana. O tracejado indica a posição atual dos depósitos.

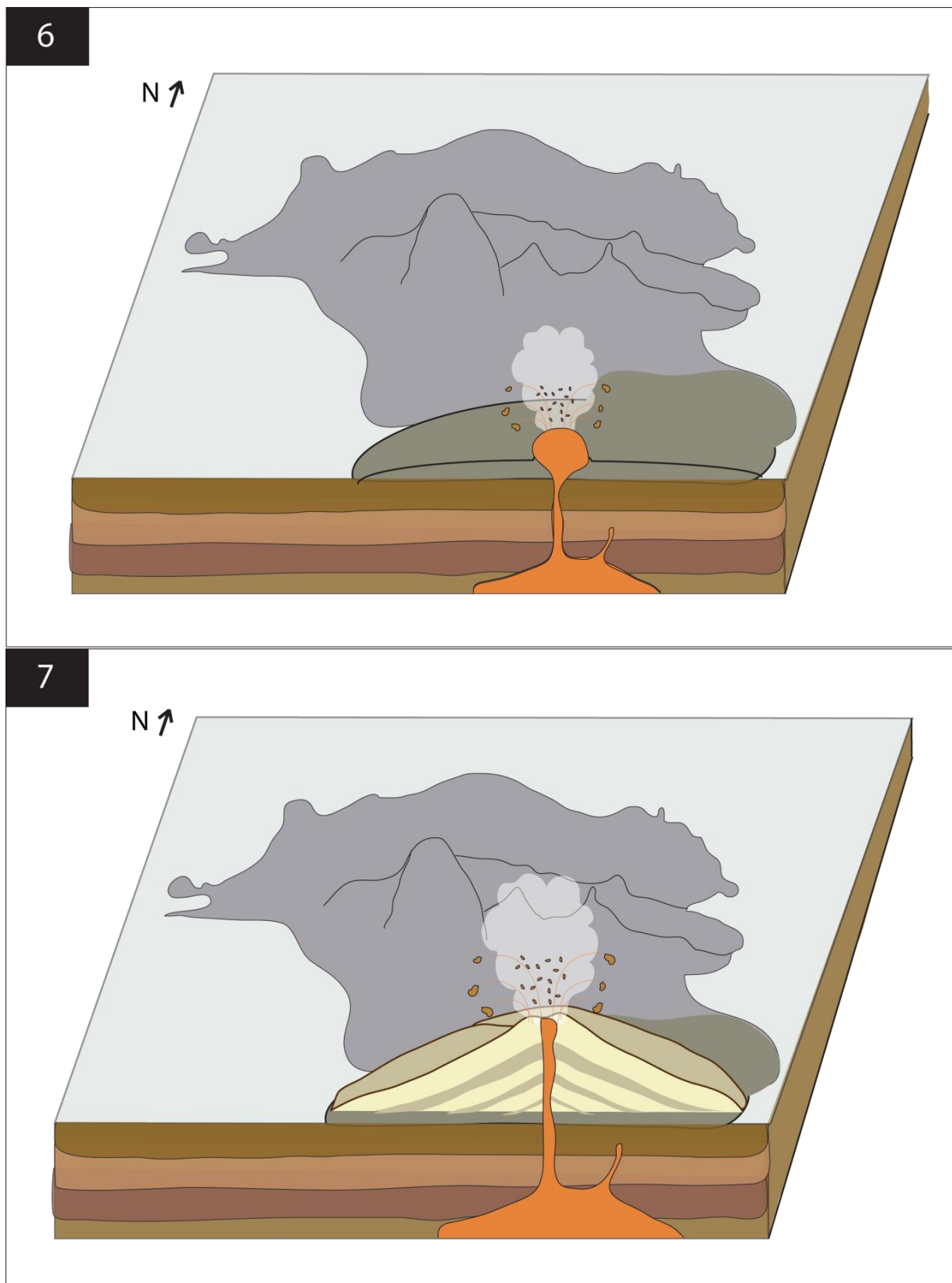


**Figura 55:** Estágio 5 da evolução do Vulcão do Paredão. No modelo geológico são representados os derrames de olivina nefelinito gerados pela atividade havaiana. As setas pretas indicam a porosidade dos derrames em macro, micro e nanoescala. No canto superior direito, observa-se a proporção de minerais normativos.

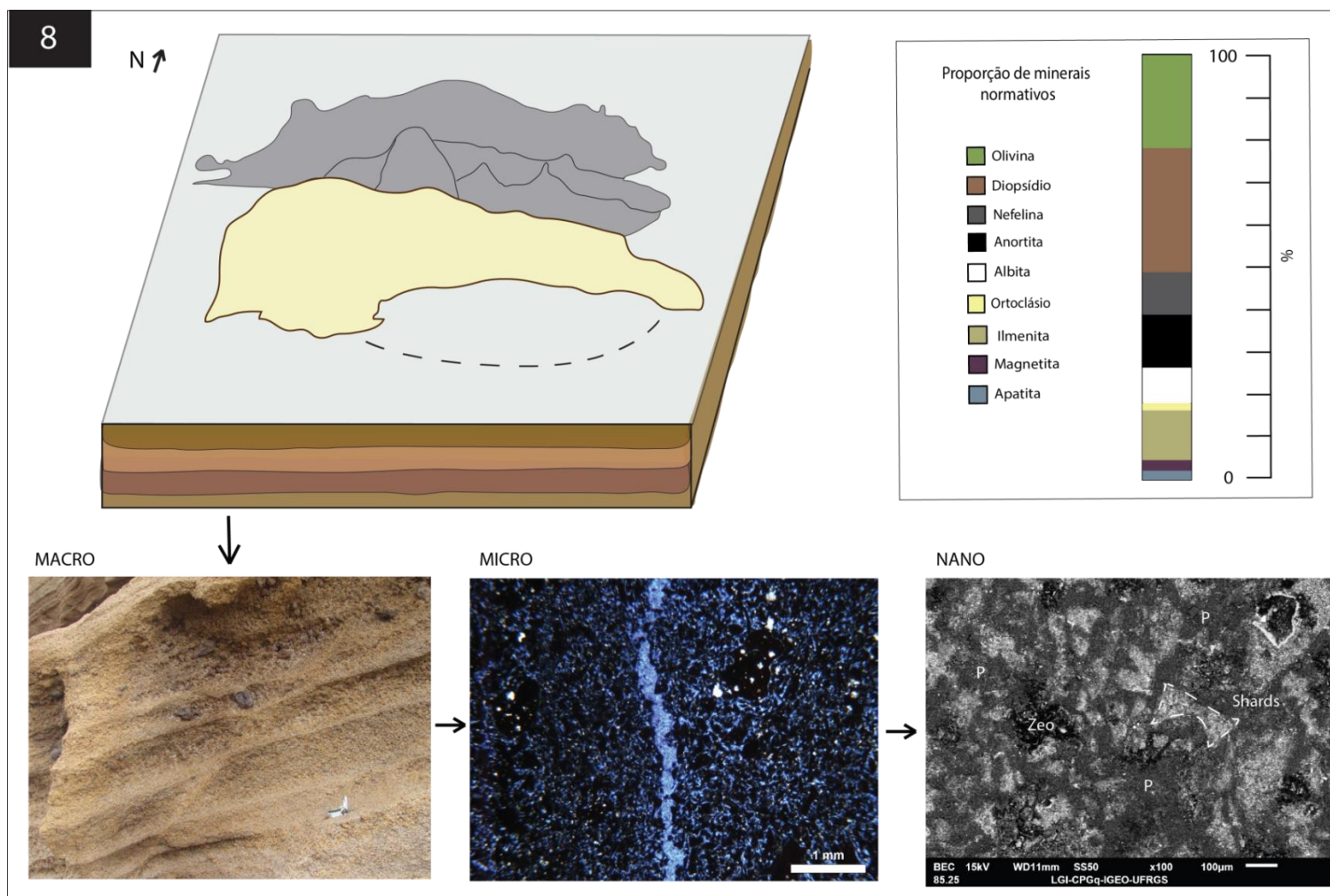




**Figura 56:** Estágios 6 e 7 de vulcanismo estromboliano na evolução do Vulcão do Paredão, com a construção do cone de escórias.



**Figura 57:** Estágio final da evolução do Vulcão do Paredão. No modelo geológico está representada metade do cone de escórias preservado. As setas pretas indicam a porosidade dos depósitos piroclásticos em macro, micro e nanoescala. No canto superior direito, observa-se a proporção de minerais normativos.



## 9 CONCLUSÃO

A análise do arcabouço estratigráfico do Vulcão do Paredão permite concluir que o vulcanismo foi heterogêneo, com uma fase inicial Havaiana, e uma fase final Estromboliana. A fase Havaiana é representada predominantemente por derrames do tipo 'Aa' intercalados com depósitos de queda que afloram na Praia das Tartarugas. O cone de escórias evidencia uma segunda fase de atividade explosiva, resultado de um estilo eruptivo Estromboliano, na qual ocorre a ascensão e rompimento de enormes bolhas de gás na porção superior do conduto vulcânico.

As fácies coerentes (derrames), que representam a fase inicial de vulcanismo havaiano, são petrograficamente olivina nefelinitos porfíricos, holocristalinos e vesiculados, compostos por fenocristais e aglomerados de olivina em uma matriz muito fina/microlítica de clinopiroxênio, nefelina, zeolita e titanomagnetita, podendo conter flogopita. Análises de EDS em MEV corroboram os dados de petrografia e indicam a presença de forsterita, titanomagnetita, nefelina e flogopita. A fácies piroclástica, que representa a fase estromboliana, foi classificada como lúpili-tufo com laminação plano-paralela incipiente marcada pela variação granulométrica, composta predominantemente por *shards* do tipo Y, P e X e fragmentos de escória subangulosos e pouco esféricos com fenocristais de olivina oxidados, de tamanhos que variam de cinza a lúpili.

Quimicamente, as amostras são ultrabásicas (<45% de SiO<sub>2</sub>) e no diagrama de classificação TAS (LE BAS et al. 1986) ocupam o campo dos foiditos, pertencentes à série alcalina sódica. O diagrama MgO vs. elementos maiores (% em peso) evidencia um decréscimo de SiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O e FeO<sub>t</sub> e um aumento relativo de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e TiO<sub>2</sub> com a diferenciação magmática. Todas as amostras contêm nefelina (Ne<sub>n</sub>) e olivina (Ol<sub>n</sub>) normativa, o que também indica subsaturação em sílica. A fácies piroclástica difere das fácies coerentes na composição de minerais normativos por apresentar albita (Ab<sub>n</sub>) e ortoclásio (Or<sub>n</sub>) ao invés de leucita (Lc<sub>n</sub>), explicada pela menor quantidade de álcalis (Na + K) e Mg quando comparada aos derrames.

A partir do estudo dos padrões de porosidade em diferentes escalas, concluiu-se que a porosidade dos depósitos do Vulcão do Paredão é predominantemente primária, controlada principalmente pela variação faciológica. Os dados químicos

demonstram pequenas variações composicionais entre as diferentes fácies, não influenciando de forma significativa na variação dos padrões de porosidade.

Nas fácies coerentes a porosidade é heterogênea, concentrando-se na porção central do núcleo dos derrames menores e nas porções periféricas do núcleo dos derrames mais espessos. Pode variar de 10,66 a 27,67% e é predominantemente do tipo vesicular, com vesículas arredondadas ou estiradas segundo o fluxo de lava, mas também ocorre como intracristalina, intercristalina, móldica e de fraturas. Nas fácies vulcanoclásticas a porosidade é mais homogênea, com o predomínio do tipo interpartícula e subordinadamente intrapartícula e de fraturas. Varia de 30 a 40%, sendo os menores valores na fácies autoclástica, na qual a porosidade é restrita a microvesiculação dos fragmentos de lava, diferentemente das fácies piroclásticas que tem poros entre os fragmentos. As imagens de alta resolução obtidas por MEV permitiram a identificação da porosidade do tipo intercristalina, intrapartícula, interpartícula e de fraturas em micro e nanoescala, além de um detalhamento da geometria dos poros, podendo ser uma ferramenta mais explorada em trabalhos futuros.

Por fim, a análise estratigráfica aliada à caracterização petrológica e dos padrões de porosidade possibilitou a geração de um modelo da distribuição da porosidade nos depósitos do Vulcão do Paredão, o último episódio de vulcanismo do Brasil, servindo como um análogo para a exploração de hidrocarbonetos em reservatórios não convencionais.

## REFERÊNCIAS

- ALLEN, J. R. L. Studies in fluvial sedimentation: bars, bar-complexes and sandstone sheets (low-sinuosity braided streams) in the Brownstones (L. Devonian), Welsh Borders. **Sedimentary Geology**, v. 33, n. 4, p. 237-293, 1983.
- ALMEIDA, F. F. M. de. Geologia e Petrologia na Ilha de Trindade. Rio de Janeiro, **DNPM/DGM**, 197p. 1961. Monografia XIX.
- ALMEIDA, F. F. M. de. Ilha de Trindade: Registro de vulcanismo cenozóico no Atlântico Sul. Brasília, **DNPM/CPRM/SIGEP**, v.1, n.5, p. 369-377, 2002.
- ALMEIDA, F. F. M. de. Ilhas oceânicas brasileiras e suas relações com a tectônica atlântica. **Terræ Didática**, Campinas, v. 2, n. 1, p. 3-18, 2006. Disponível em: <<http://www.ige.unicamp.br/terraedidatica/>> Acesso em: 10 set. 2016.
- ALVES, E. C. et al. Zona de fratura de Vitória-Trindade no Oceano Atlântico sudeste e suas implicações tectônicas. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24, n. 1, p. 117-127, 2006.
- BALLARD, R. D.; HOLCOMB, R. T.; ANDEL, T. H. The Galapagos Rift at 86 W: 3. Sheet flows, collapse pits, and lava lakes of the rift valley. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 84, n. B10, p. 5407-5422, 1979.
- BARRETO, C. J. S. et al. Lithofacies analysis of basic lava flows of the Paraná igneous province in the south hinge of Torres Syncline, Southern Brazil. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 285, p. 81-99, 2014.
- BARRETO, C. J. S. **Associação de fácies, padrões de vesiculação e petrologia dos derrames básicos da Formação Serra Geral na ombreira sul da Calha de Torres (RS)**. 2016. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- BAS, M. J. LE et al. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. **Journal of petrology**, v. 27, n. 3, p. 745-750, 1986.
- BEAR, J. Dynamics of fluids in porous materials. **Society of Petroleum Engineers**, 1972.
- BECKER, M. **Caracterização petrográfica e petrofísica de litofácies vulcânicas da Formação Serra Geral**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.
- BJØRLYKKE, K.; RAMM, M.; SAIGAL, G. C. Arenito diagênese e modificação da porosidade durante a evolução da bacia. **Revisão Geológica**, v. 78, n. 1, p. 243-268, 1989.
- BROWN JR, L. F.; FISHER, W. L. Seismic-Stratigraphic Interpretation of Depositional Systems: Examples from Brazilian Rift and Pull-Apart Basins: Section 2. Application of Seismic Reflection Configuration to Stratigraphic Interpretation. 1977.
- CAS, R. A. F.; WRIGHT, J. V. Volcanic Successions, Modern and Ancient: A Geological Approach to Processes, Products and Successions, 528 pp. 1987.
- CASHMAN, K. V.; MANGAN, M. T. A century of studying effusive eruptions in Hawai'i. **Characteristics of Hawaiian Volcanoes**, v. 357, 2014.



- CASHMAN, K.; PINKERTON, H.; STEPHENSON, J. Introduction to special section: Long lava flows. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 103, n. B11, p. 27281-27289, 1998.
- CHANG, H. K. et al. Sistemas petrolíferos e modelos de acumulação de hidrocarbonetos na Bacia de Santos. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 38, n. 2 suppl, p. 29-46, 2008.
- CHOQUETTE, P. W.; PRAY, L. C. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. **AAPG bulletin**, v. 54, n. 2, p. 207-250, 1970.
- COLLINSON, J. D. The sedimentology of the Grindslow Shales and the Kinderscout Grit: a deltaic complex in the Namurian of northern England. **Journal of Sedimentary Research**, v. 39, n. 1, 1969.
- CORDANI, U. G.; BLAZEKOVIĆ, A. Idades radiométricas das rochas vulcânicas dos Abrolhos. **Congr. Bras. Geol.**, XXIV, p. 265-270, 1970.
- CORDANI, U. G. Idade do vulcanismo no oceano Atlântico Sul. **Boletim IGA**, v. 1, p. 09-75, 1970.
- DEER, W. A.; HOWIE, R. A.; ZUSSMAN, J. Rock-forming minerals, vols 1–5. **Long mans, London**, 1962.
- DEMAISON, G.; HUIZINGA, B. J. Genetic Classification of Petroleum Systems Using Three Factors: Charge, Migration, and Entrapment: Chapter 4: Part I. Introduction. 1994.
- DONALDSON, C. H. An experimental investigation of olivine morphology. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, v. 57, n. 2, p. 187-213, 1976.
- DRUITT, T. H. Pyroclastic density currents. **Geological Society, London, Special Publications**, v. 145, n. 1, p. 145-182, 1998.
- DUARTE, L. C. et al. Aplicações de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e sistema de energia dispersiva (EDS) no estudo de gemas exemplos brasileiros. **Pesquisas em Geociências**. Porto Alegre, RS. Vol. 30, n. 2 (2003), p. 3-15, 2003.
- DURAIWAMI, R. A. et al. 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 of Asian Earth Sciences**, v. 84, p. 146-166, 2014.
- DURAIWAMI, R. A.; BONDRE, N. R.; MANAGAVE, S. Morphology of rubbly pahoehoe (simple) flows from the Deccan Volcanic Province: Implications for style of emplacement. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 177, n. 4, p. 822-836, 2008.
- DURAIWAMI, R. A.; DOLE, G.; BONDRE, N. 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, 2003.
- EIRAS, J. F.; WANDERLEY FILHO, J. R. Sistemas petrolíferos ígneo-sedimentares. In: **ABPG, Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo & Gás**. 2003.
- FAROOQUI, M. Y. et al. Evaluating volcanic reservoirs. **Oilfield Review**, v. 21, n. 1, p. 36-47, 2009.

FERNANDES, P. Evolução da matéria orgânica: Da original aos carvões e Petróleo. **V Encontro dos Professores de Geociências do Algarve Vila real de Santo Antonio, Portugal**, 2004.

FISHER, R. V. Decoupling of pyroclastic currents: hazards assessments. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 66, n. 1, p. 257-263, 1995.

FISHER, R. V. Rocks composed of volcanic fragments and their classification. **Earth-Science Reviews**, v. 1, n. 4, p. 287-298, 1966.

FISHER, R. V.; SCHMINCKE, H. Pyroclastic Rocks and Tectonic Environment. In: **Pyroclastic rocks**. Springer Berlin Heidelberg, 1984. p. 383-409.

FISHER, W. L.; MCGOWEN, J. H. Depositional Systems in the Wilcox Group of Texas and Their Relationship to Occurrence of Oil and Gas (1). 1967.

FODAR, R. V. et al. Ti-rich Eocene basaltic rocks, Abrolhos platform, offshore Brazil, 18 S: petrology with respect to South Atlantic magmatism. **Journal of Petrology**, v. 30, n. 3, p. 763-786, 1989.

FODOR, R. V.; HANAN, B. B. Geochemical evidence for the Trindade hotspot trace: Columbia seamount ankaramite. **Lithos**, v. 51, n. 4, p. 293-304, 2000.

GALEHOUSE, J. S. Point counting. **Procedures in sedimentary petrology**, v. 653, p. 385-407, 1971.

GIBSON, S. A. et al. Late Cretaceous rift-related upwelling and melting of the Trindade starting mantle plume head beneath western Brazil. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, v. 126, n. 3, p. 303-314, 1997.

GIBSON, S. A. et al. The Late Cretaceous impact of the Trindade mantle plume: evidence from large-volume, mafic, potassic magmatism in SE Brazil. **Journal of Petrology**, v. 36, n. 1, p. 189-229, 1995.

GILL, R. **Igneous rocks and processes: a practical guide**. John Wiley & Sons, 2010.

GUAZELLI, W.; CARVALHO, J. C. A extensão da zona de fratura de Vitória-Trindade no oceano e seu possível prolongamento no continente. **Aspectos estruturais da margem continental leste e sudeste do Brasil**. Rio de Janeiro. Petrobrás, p. 31-37, 1978.

GUILBAUD, M. et al. Morphology, surface structures, and emplacement of lavas produced by Laki, AD 1783–1784. **Geological Society of America Special Papers**, v. 396, p. 81-102, 2005.

HANSEN, M. A. F. et al. Nuevas edades para el volcanismo de las islas Trindade y Martin Vaz, Brasil. In: **Sixth International Meeting: Colima Volcano, México**. 1998. p. 1-28.

HARGREAVES, R.; AYRES, L. D. Morphology of Archean metabasalt flows, Utik Lake, Manitoba. **Canadian Journal of Earth Sciences**, v. 16, n. 7, p. 1452-1466, 1979.

HARTE, B. Rock nomenclature with particular relation to deformation and recrystallisation textures in olivine-bearing xenoliths. **The Journal of Geology**, v. 85, n. 3, p. 279-288, 1977.

HEAVISIDE, J.; BLACK, C.J.J. Fundamentals of relative permeability: experimental and theoretical considerations. In: **SPE Annual Technical Conference and Exhibition**. Society of Petroleum Engineers, 1983.

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

JERRAM, D. A. Volcanology and fades architecture of flood basalts. **Volcanic Rifted Margins**, v. 362, p. 119, 2002.

JONES, A. P. et al. Petrography and mineral chemistry of mantle xenoliths in a carbonate-rich melilititic tuff from Mt. Vulture volcano, southern Italy. **Mineralogical Magazine**, v. 64, n. 4, p. 593-613, 2000.

JONES, J. G. Pillow lava and pahoehoe. **The Journal of Geology**, v. 76, n. 4, p. 485-488, 1968.

KELSEY, C. H. Calculation of the CIPW norm. **Mineralogical Magazine**, v. 34, n. 268, p. 276-282, 1965.

KESZTHELYI, L.; SELF, S. Some physical requirements for the emplacement of long basaltic lava flows. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 103, n. B11, p. 27447-27464, 1998.

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.

KLOBES, P.; MEYER, K.; MUNRO, R. G. Porosity and specific surface area measurements for solid materials. 2006.

LACROIX, A. La constitution des roches volcaniques de l'Extrême Nord de Madagascar et de Nosy Bé; les ankaratrites de Madagascar en général. **Comptes Rendus Académie des Sciences, Paris**, v. 163, p. 253-258, 1916.

LIMA, R. A. **Caracterização geoquímica e avaliação do potencial petrolífero do Permo-Carbonífero da Bacia do Chaco-Paraná**. 2004. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

LIU, J. et al. Volcanic Rock-Hosted Natural Hydrocarbon Resources: A review. 2013.

LOOCK, Sébastien; DE VRIES, Benjamin van Wyk; HÉNOT, Jean-Marc. Clinker formation in basaltic and trachybasaltic lava flows. **Bulletin of volcanology**, v. 72, n. 7, p. 859-870, 2010.

LUZ, F.R. da. **Estudo do vulcanismo da Ilha da Trindade: estratigrafia e petrologia da Formação Morro Vermelho**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

MACDONALD, Gordon Andrew. Pahoehoe, aa, and block lava. **American Journal of Science**, v. 251, n. 3, p. 169-191, 1953.

MAO, Z. et al. Reservoir characteristics, formation mechanisms and petroleum exploration potential of volcanic rocks in China. **Petroleum Science**, v. 12, n. 1, p. 54-66, 2015.

MARQUES, L. S. et al. Petrology, geochemistry and Sr–Nd isotopes of the Trindade and Martin Vaz volcanic rocks (southern Atlantic Ocean). **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 93, n. 3, p. 191-216, 1999.

MARTIN, U.; NÉMETH, K. How Strombolian is a “Strombolian” scoria cone? Some irregularities in scoria cone architecture from the Transmexican Volcanic Belt, near Volcán Ceboruco, (Mexico) and Al Haruj (Libya). **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 155, n. 1, p. 104-118, 2006.

MCCARTHY, K. et al. Basic petroleum geochemistry for source rock evaluation. **Oilfield Review**, v. 23, n. 2, p. 32-43, 2011.

MCGETCHIN, T. R.; SETTLE, M.; CHOUET, B. A. Cinder cone growth modeled after northeast crater, Mount Etna, Sicily. **Journal of Geophysical Research**, v. 79, n. 23, p. 3257-3272, 1974.

MCPHIE, J. **Volcanic textures: a guide to the interpretation of textures in volcanic rocks**. 1993.

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

MIDDLETON, G. V. Facies. **Encyclopedia of sedimentology: Hutchinson & Ross**, p. 323-325, 1978.

MINSTER, J. B. et al. Numerical modelling of instantaneous plate tectonics. **Geophysical Journal International**, v. 36, n. 3, p. 541-576, 1974.

MITCHUM JR, R. M. Seismic stratigraphy and global changes of sea level: Part 11. Glossary of terms used in seismic stratigraphy: Section 2. Application of seismic reflection configuration to stratigraphic interpretation. 1977.

MOREIRA, J. L. P. et al. Magmatismo, sedimentação e estratigrafia da porção norte da Bacia de Santos. **Boletim de Geociências da PETROBRAS**, v. 14, n. 1, p. 161-170, 2006.

PARFITT, E. A.; WILSON, L. Explosive volcanic eruptions—IX. The transition between Hawaiian-style lava fountaining and Strombolian explosive activity. **Geophysical Journal International**, v. 121, n. 1, p. 226-232, 1995.

PETERSON, D. W.; TILLING, R. I. Transition of basaltic lava from pahoehoe to aa, Kilauea Volcano, Hawaii: field observations and key factors. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 7, n. 3-4, p. 271-293, 1980

PINKERTON, H.; SPARKS, R. S. J. The 1975 sub-terminal lavas, Mount Etna: a case history of the formation of a compound lava field. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 1, n. 2, p. 167-182, 1976.

PIRES, G. L. C. et al. New  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages and revised  $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}^*$  data from nephelinitic–phonolitic volcanic successions of the Trindade Island (South Atlantic Ocean). **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 327, p. 531-538, 2016.

- REIS, G. S. **A Formação Serra Geral (Cretáceo, Bacia do Paraná)-como análogo para os reservatórios ígneo-básicos da margem continental brasileira.** 2013. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.
- RICCOMINI, C. et al. Pré-sal: geologia e exploração. **Revista USP**, n. 95, p. 33-42, 2012.
- RIEDEL, C.; ERNST, G. G. J.; RILEY, M. Controls on the growth and geometry of pyroclastic constructs. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 127, n. 1, p. 121-152, 2003.
- ROSSETTI, L. M. M. et al. Lithostratigraphy and volcanology of the Serra Geral Group, Paraná-Etendeka Igneous Province in Southern Brazil: Towards a formal stratigraphical framework. 2017.
- ROSSETTI, L. M. M. et al. Stratigraphical framework of basaltic lavas in Torres Syncline main valley, southern Parana-Etendeka Volcanic Province. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 56, p. 409-421, 2014.
- ROWLAND, S. K.; WALKER, G. P. L. Toothpaste lava: characteristics and origin of a lava structural type transitional between pahoehoe and aa. **Bulletin of Volcanology**, v. 49, n. 4, p. 631-641, 1987.
- SCHMID, R. Descriptive nomenclature and classification of pyroclastic deposits and fragments. **Geologische Rundschau**, v. 70, n. 2, p. 794-799, 1981.
- SCHMIDT, V.; MCDONALD, D. A. The role of secondary porosity in the course of sandstone diagenesis. 1979.
- SCHMINCKE, H. **Volcanism.** Springer Science & Business Media, 2004.
- SCHUTTER, S. R. Hydrocarbon occurrence and exploration in and around igneous rocks. **Geological Society, London, Special Publications**, v. 214, n. 1, p. 7-33, 2003.
- SELF, S. The recent volcanology of Terceira, Azores. **Journal of the Geological Society**, v. 132, n. 6, p. 645-666, 1976.
- SELF, S.; KESZTHELYI, L.; THORDARSON, T. The importance of pāhoehoe. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 26, n. 1, p. 81-110, 1998.
- SELLEY, R. C. Concepts and methods of subsurface facies analysis. Short course and methods of subsurfaces facies analysis. Short course lecture note series, No. 6. **Am. Assoc. Petro. Geo**, p. 80, 1978.
- SEUBERT, B. W. **Volcaniclastic Petroleum Systems—Theory and Examples from Indonesia.** 2015.
- SIEBEL, W. et al. Trindade and Martín Vaz Islands, South Atlantic: Isotopic (Sr, Nd, Pb) and trace element constraints on plume related magmatism. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 13, n. 1, p. 79-103, 2000.
- SINGLE, R. T. **The facies architecture of large igneous provinces: an integrated geological and geophysical approach to the characterisation of volcanic successions in 3-D.** 2004. Tese de Doutorado - Durham University, Durham, 2004.



- SOMMER, C. A. et al. Depósitos de fluxo piroclástico primários: caracterização e estudo de um caso no vulcanismo ácido neoproterozóico do Escudo Sul-Rio-grandense. **Pesquisas em Geociências**. Porto Alegre, RS. Vol. 30, n. 1 (2003), p. 3-26, 2003.
- SPARKS, R. S. J.; WALKER, G. P. L. The ground surge deposit: a third type of pyroclastic rock. **Nature**, v. 241, n. 107, p. 62-64, 1973.
- SRUOGA, P.; RUBINSTEIN, Nora. Processes controlling porosity and permeability in volcanic reservoirs from the Austral and Neuquén basins, Argentina. **AAPG bulletin**, v. 91, n. 1, p. 115-129, 2007.
- SURDAM, R. C. et al. Organic-inorganic interactions and sandstone diagenesis. **AAPG Bulletin**, v. 73, n. 1, p. 1-23, 1989.
- TAIOLI, F. Recursos Energéticos. In: TEIXEIRA, Wilson et al. org. **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. 568p. il. p. 475-480.
- TALBOT, J. L. et al. Xenoliths and xenocrysts from lavas of Kerguelen Archipelago. **American Mineralogist**, v. 48, n. 1-2, p. 159, 1963.
- TERRA, G.J.S. Manual de Subsuperfície; roteiro básico para o acompanhamento geológico de poços. 2 ed. Rio de Janeiro, IBP, il.p. 41, 1984.
- VALENCIO, D. A.; MENDÍA, J. A. Paleomagnetism and K/Ar ages of some igneous rocks of the Trindade Complex and the Valado Formation, from Trindade Island, Brazil. **Brazilian Journal of Geology**, v. 4, n. 2, p. 124-132, 1974.
- VAN WAGONER, J. C. et al. Seismic stratigraphy interpretation using sequence stratigraphy: Part 2: Key definitions of sequence stratigraphy, 1987.
- VOLCANISM. The major types of volcanic eruptions. Encyclopædia Britannica, 2011. Disponível em: <https://www.britannica.com/science/volcanism/images-videos> . Acesso em: 06 jul. 2017.
- WAICHEL, B. L. et al. Stratigraphy and volcanic facies architecture of the Torres Syncline, Southern Brazil, and its role in understanding the Paraná–Etendeka Continental Flood Basalt Province. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, v. 215, p. 74-82, 2012.
- WALKER, G. P. L. Ignimbrite types and ignimbrite problems. **Journal of volcanology and geothermal research**, v. 17, n. 1-4, p. 65-88, 1983.
- WALKER, G. P. L. Pipe vesicles in Hawaiian basaltic lavas: their origin and potential as paleoslope indicators. **Geology**, v. 15, n. 1, p. 84-87, 1987.
- WALKER, G. P.L. Grain-size characteristics of pyroclastic deposits. **The Journal of Geology**, v. 79, n. 6, p. 696-714, 1971.
- WALKER, R. G. General Introduction: facies, facies sequences and facies models. In: Walker, R.G. (Ed) **Facies Models**. Canada: Geological Association of Canada, Geoscience Canada Reprint. Series 1, p.1-9, 1984.
- WALKER, R. G.; JAMES, Noel P. Facies models: Response to sea level change. **St. John's, Newfoundland, Geological Association of Canada**, 1992.

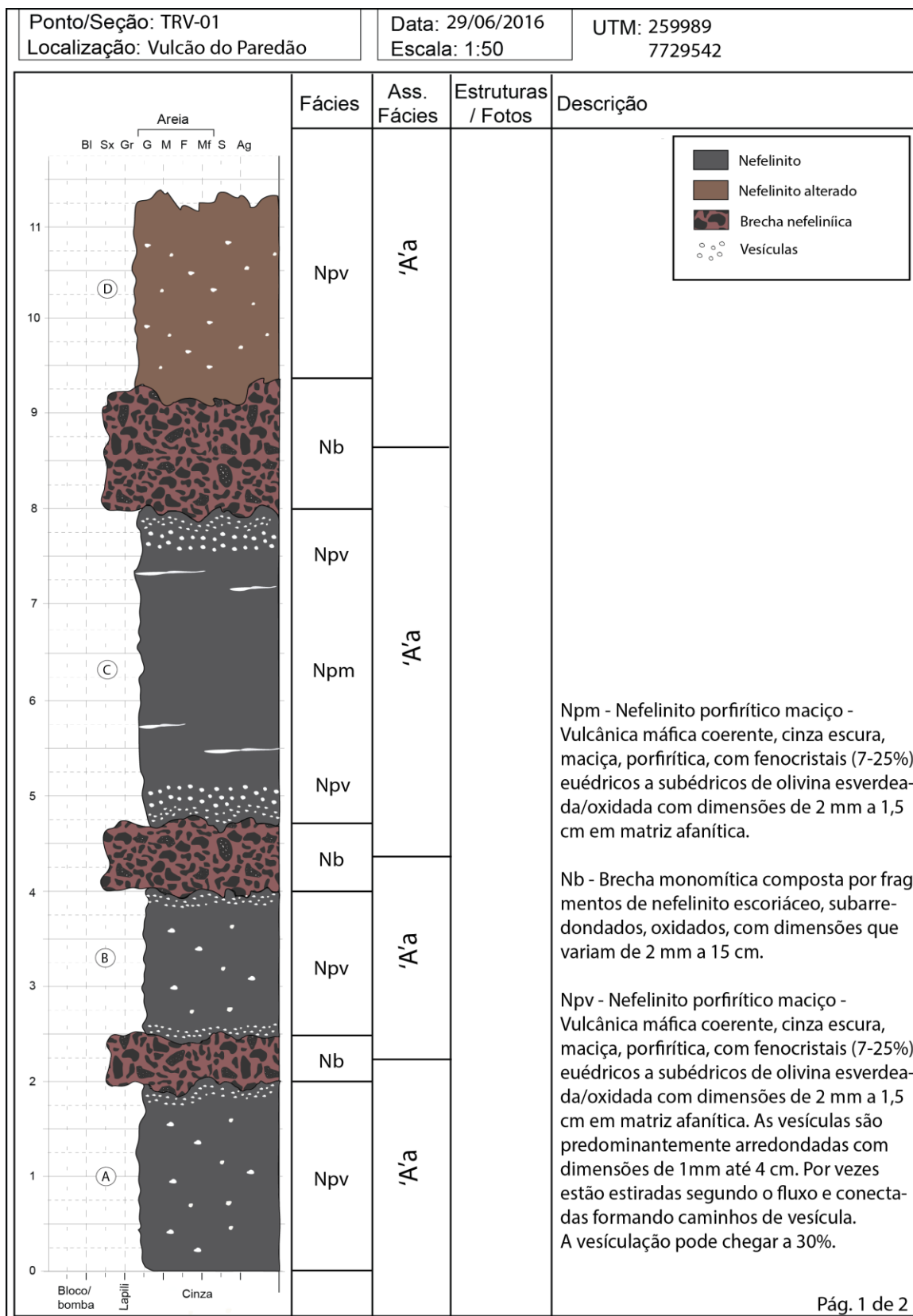
WANG, P.; CHEN, S. Cretaceous volcanic reservoirs and their exploration in the Songliao Basin, northeast China. **AAPG Bulletin**, v. 99, n. 3, p. 499-523, 2015.

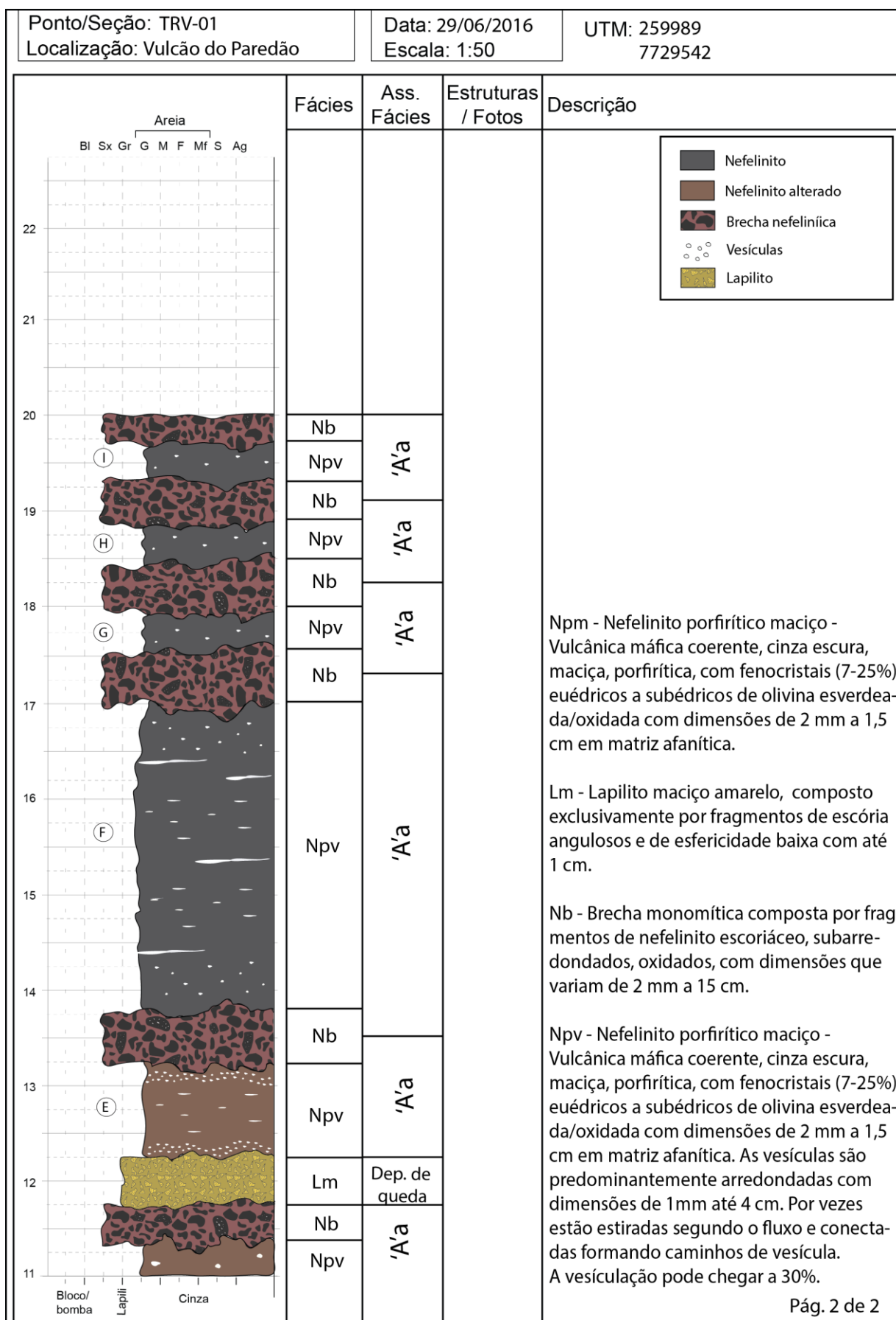
WATTON, T. J. et al. The petrophysical and petrographical properties of hyaloclastite deposits: Implications for petroleum exploration. **AAPG bulletin**, v. 98, n. 3, p. 449-463, 2014.

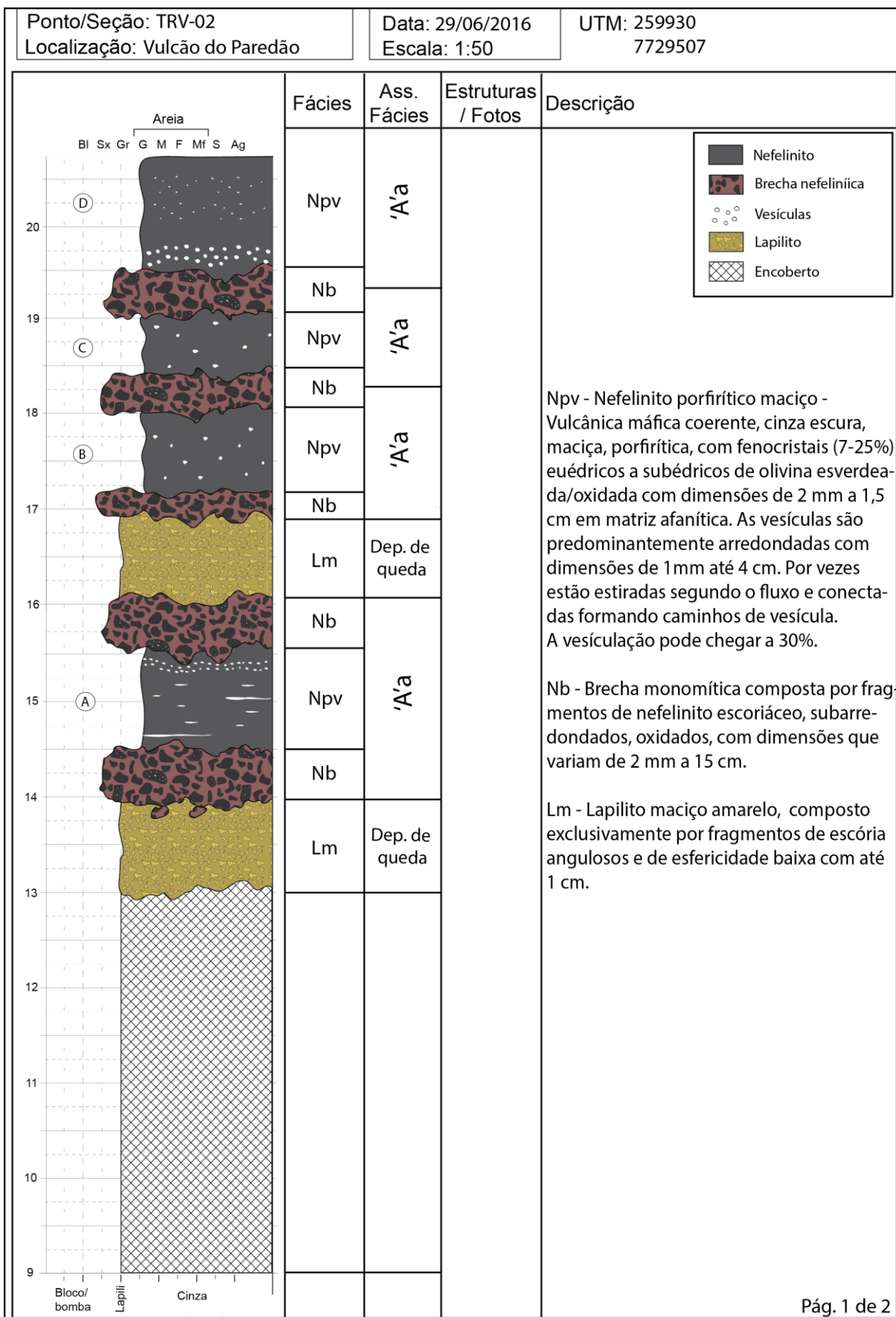
WILSON, J. Tuzo. A new class of faults and their bearing on continental drift. **Nature**, v. 207, n. 4995, p. 343-347, 1965.

## APÊNDICES

### APÊNDICE A: Seções colunares









Ponto/Seção: TRV-02 Localização: Vulcão do Paredão		Data: 29/06/2016 Escala: 1:50	UTM: 259930 7729507		
		Fácies	Ass. Fácies	Estruturas / Fotos	Descrição
<p>Areia</p> <p>Bl Sx Gr G M F Mf S Ag</p> <p>24</p> <p>23 (F)</p> <p>22 (E)</p> <p>21</p> <p>20</p> <p>Bloco/bomba Lapilli Cinza</p>		Nb	'A'a		<p>Nb - Brecha monomítica composta por fragmentos de nefelinito escoriáceo, subarredondados, oxidados, com dimensões que variam de 2 mm a 15 cm.</p> <p>Npv - Nefelinito porfírico maciço - Vulcânica máfica coerente, cinza escura, maciça, porfírica, com fenocristais (7-25%) euédricos a subédricos de olivina esverdeada/oxidada com dimensões de 2 mm a 1,5 cm em matriz afanítica. As vesículas são predominantemente arredondadas com dimensões de 1 mm até 4 cm. Por vezes estão estiradas segundo o fluxo e conectadas formando caminhos de vesícula. A vesículação pode chegar a 30%.</p>
		Npv			
		Nb	'A'a		
		Npv			
		Nb	'A'a		
		Npv			

Ponto/Seção: TRV-03 Localização: Vulcão do Paredão		Data: 30/06/2016 Escala: 1:50	UTM: 259909 7729503		
		Fácies	Ass. Fácies	Estruturas / Fotos	Descrição
	Nb	'A'a			<ul style="list-style-type: none"> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #444; border: 1px solid black;"></span> Nefelinito</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #800000; border: 1px solid black;"></span> Nefelinito alterado</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #800000; border: 1px solid black; border-radius: 50%;"></span> Brecha nefelinílica</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #FFD700; border: 1px solid black;"></span> Lapilito</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #FFD700; border: 1px solid black; border-radius: 50%;"></span> Lapilito oxidado</li> <li><span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; border: 1px solid black; border-radius: 50%;"></span> Vesículas</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; border: 1px solid black;"></span> Estratificação plano-paralela</li> </ul>
	Npv				
	Nb	Depósitos de queda		(18/052) (14/040) (18/035)	
	Lm				
	Lm				
	Lm				
	Lm				
	Nb	'A'a			<p>LTp - Lápili-tufo oxidado com estratificação plano-paralela, composto por cinzas vulcânicas e fragmentos de escória angulosos e de esfericidade baixa de tamanho lúpili de até 1 cm.</p>
	Npv				
	Nb	'A'a			<p>Npm - Nefelinito porfírico maciço - Vulcânica máfica coerente, cinza escura, maciça, porfírica, com fenocristais (7-25%) euédricos a subédricos de olivina esverdeada/oxidada com dimensões de 2 mm a 1,5 cm em matriz afanítica.</p>
	Npv				
	Npm				
Nb	Dep. de queda				
Lm					
Nb	'A'a			<p>Npv - Nefelinito porfírico maciço - Vulcânica máfica coerente, cinza escura, maciça, porfírica, com fenocristais (7-25%) euédricos a subédricos de olivina esverdeada/oxidada com dimensões de 2 mm a 1,5 cm em matriz afanítica. As vesículas são predominantemente arredondadas com dimensões de 1 mm até 4 cm. Por vezes estão estiradas segundo o fluxo e conectadas formando caminhos de vesícula. A vesículação pode chegar a 30%.</p>	
Nb					
Npv	'A'a			<p>Nb - Brecha monomítica composta por fragmentos de nefelinito escoriáceo, subarredondados, oxidados, com dimensões que variam de 2 mm a 15 cm.</p>	
Nb					
Lm	Dep. de queda			<p>Lm - Lapilito maciço amarelo/oxidado, composto exclusivamente por fragmentos de escória angulosos e de esfericidade baixa com até 1 cm.</p>	
Nb					

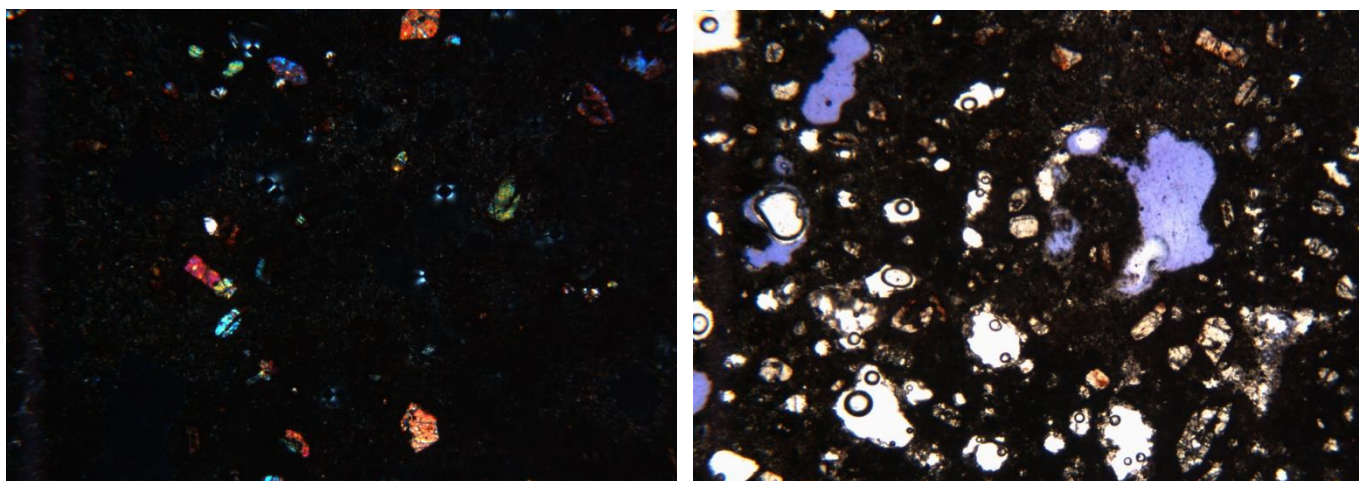
Ponto/Seção: TRV-03 Localização: Vulcão do Paredão		Data: 30/06/2016 Escala: 1:50	UTM: 259909 7729503		
		Fácies	Ass. Fácies	Estruturas / Fotos	Descrição
					<p>Lm - Lapilito maciço oxidado, composto exclusivamente por fragmentos de escória angulosos e de esfericidade baixa com até 1 cm.</p> <p>Npm - Nefelinito porfirítico maciço - Vulcânica máfica coerente, cinza escura, maciça, porfirítica, com fenocristais (7-25%) euédricos a subédricos de olivina esverdeada/oxidada com dimensões de 2 mm a 1,5 cm em matriz afanítica.</p> <p>Npv - Nefelinito porfirítico maciço - Vulcânica máfica coerente, cinza escura, maciça, porfirítica, com fenocristais (7-25%) euédricos a subédricos de olivina esverdeada/oxidada com dimensões de 2 mm a 1,5 cm em matriz afanítica. As vesículas são predominantemente arredondadas com dimensões de 1 mm até 4 cm. Por vezes estão estiradas segundo o fluxo e conectadas formando caminhos de vesícula. A vesículação pode chegar a 30%.</p> <p>Nb - Brecha monomítica composta por fragmentos de nefelinito escoriáceo, subarredondados, oxidados, com dimensões que variam de 2 mm a 15 cm.</p>
28					
27		Nb	Rubby		
26	G	Npv			
25		Lm			
24	F	Npv	Pahoehoe		
23		Npm			
22	E	Nb	'A'a		
		Npv			
		Nb			

Ponto/Seção: TRV-04 Localização: Vulcão do Paredão		Data: 28/06/2017 Escala: 1:50		UTM: 260106 7728675	
<p>Areia Bl Sx Gr G M F Mf S Ag</p> <p>7 6 (C) 5 4 3 (B) 2 1 (A) 0</p> <p>Bloco/bomba Lapilli Cinza</p>	Fácies	Ass. Fácies	Estruturas / Fotos	Descrição	
	LBm	Cone de escórias	(21/275) (27/230)	<p>Fragmento de lava</p> <p>Fragmento de escória</p> <p>Cristaloclastos</p> <p>Lgi - Lapilito com gradação inversa, marrom, composto por fragmentos de escória oxidados (0,2-2 cm), angulosos e de esfericidade baixa e cristaloclastos de olivina alterados, com ~ 3 mm. Contém ~5% de bombas (7cm) de escória e de lava nefelinítica subordinada subangulosas e de esfericidade baixa, por vezes imbricadas.</p> <p>LBm - Lapili-brecha maciça, marrom, composta por fragmentos de escória (0,3 - 6 cm), angulosos e de esfericidade baixa e subordinados cristaloclastos de olivina e flogopita milimétricos a centimétricos. A fração brecha contém de 5-30 % de bombas nefeliníticas e de escória (10 - 80 cm), subangulosas e de esfericidade moderada.</p>	
	Lgi		(24/185) (16/140)		
	LBm		(22/120) (26/143)		
Pág. 1 de 1					

## APÊNDICE B: Descrições petrográficas

## Descrição Petrográfica

## TRV-01A



## Identificação

Identificação da descrição:	TRV-01A
Tipo da rocha:	Ígnea
Nome do projeto:	TRINDADE
Unidade/Idade:	Vulcão do Paredão
Bloco/Província:	TRINDADE
País:	Brasil
Estado:	RS
Lugar:	Ilha da Trindade
Instituição:	UFRGS
Petrógrafo:	Natália Gauer
Data da primeira edição:	02/05/2017
Data da última edição:	26/05/2017
Usos:	Ensino/treinamento

## Sumário

Núcleo de derrame AA - Base da estratigrafia.

## Características Microscópicas

## Texturais

Estrutura(s):	Vesicular (0.0-0.0)
Cristalinidade:	Holocrystalina
Granularidade:	Afano-fanerítica



Tamanho relativo dos cristais:	Inequigranular Muito fino (0.0 mm) ao Médio (3.2 mm)
Intervalo de tamanho de cristal:	
Forma dos cristais / fragmentos	
Perfeição do formato cristalino:	Hipidiomórfica
Forma tridimensional dos cristais ou fragmentos:	Poligonal, Acicular
Textura(s):	Vesicular, Porfirítica, Microlítica

#### Composição:

16.33% Olivina, Romboedro grande, Como fenocristal, Alterado, Euédricos a subédricos, com dissolução intracristalina OU feição de resfriamento rápido, fraturados. Tamanho: 0,18-3,2 mm.;

14.0% Clinopiroxênio indiferenciado, Acicular, Na matriz, Micrólitos, por vezes circundando/ preenchendo cavidade.;

13.67% Vesícula, Sendo coberto por <Constituinte>, Clinopiroxênio indiferenciado, Piroxênios-Piroxenóides, Arredondadas e alongadas, por vezes formando caminhos de vesícula. Vesículas com tamanhos de 0,24 mm - 2,4 mm. Caminhos de vesícula centimétricos. Amígdalas de material semelhante a matriz ???;

13.0% Constituinte indiferenciado, Sujando a matriz e preenchendo cavidades - provavelmente argilização.;

10.33% Opaco indiferenciado, Cúbica, Como constituinte da petrotrama secundária, Por vezes circundando cavidades.;

9.33% Nefelina, Anédrico, Na matriz, Por vezes circundando cavidade.;

9.0% Feldspatóide indiferenciado, Anédrico, Na matriz;

4.0% Poro intracristalino, Dissolução de <Constituinte>, Olivina, Olivinas;

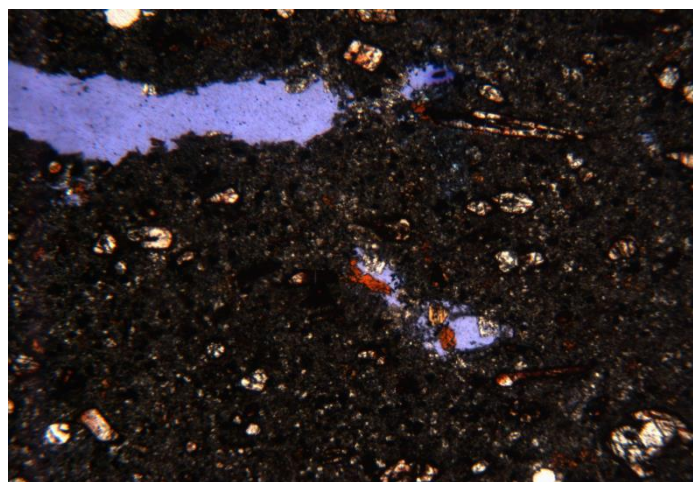
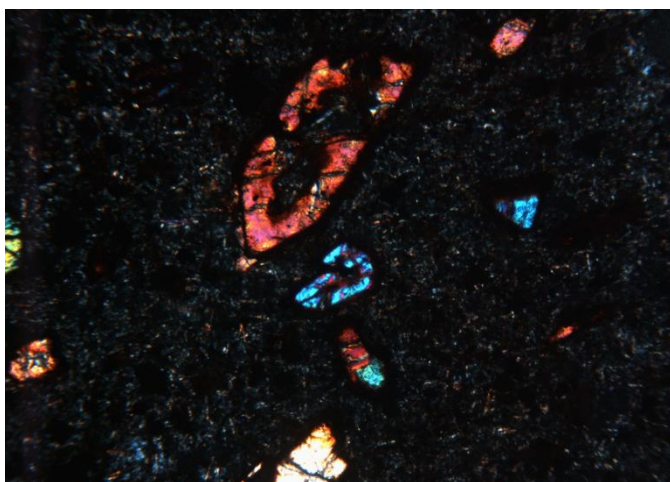
4.0% Fratura, Fratura de <Constituinte>, Olivina, Olivinas;

3.67% Cavidade indiferenciada, Da dissolução do material secundário que preenche vespículas.;

2.67% Poro intercrystalino, De dissolução da matriz.;

## Descrição Petrográfica

### TRV-01B



### Identificação

Identificação da descrição:	TRV-01B
Tipo da rocha:	Ígnea
Nome do projeto:	TRINDADE
Unidade/Idade:	Vulcão do Paredão
Bloco/Província:	TRINDADE
País:	Brasil
Instituição:	UFRGS
Petrógrafo:	Natália Gauer
Data da primeira edição:	30/05/2017
Data da última edição:	30/05/2017
Usos:	Ensino/treinamento

### Características

#### Microscópicas Texturais

Estrutura(s):	Vesicular
Cristalinidade:	Holocristalina
Granularidade:	Afano-fanerítica
Tamanho relativo dos cristais:	Inequigranular
Intervalo de tamanho de cristal:	Muito fino (0.01 mm) ao Médio (2.0 mm)
Tamanho de cristal modal:	Subédrica
Forma dos cristais / fragmentos	Acicular, Esqueletal
Perfeição do formato cristalino:	Vesicular, Porfirítica, Intergranular
Forma tridimensional dos cristais ou fragmentos:	
Textura(s):	

### Composição

20.67% Clinopiroxênio indiferenciado, Acicular, Como matriz;

15.33% Olivina, Esqueletal, Como fenocristal, Alterado, Tamanho: 0,4mm-2mm. Subédricas/euédricas, parcialmente alteradas para iddingsita, fraturadas.;

12.67% Nefelina, Como matriz, Subédrica, por vezes preenchendo cavidades com a flogopita.;

12.67% Opaco indiferenciado, Cúbica, Como constituinte da petrotrama secundária, Magnetita? Sobre a matriz.;

10.67% Constituinte indiferenciado, Anédrico, Como matriz, Mineral incolor e isotrópico, anédrico intergranular. Analcita? Sodalita?;

8.33% Flogopita, Lamelar, Como matriz, subédrica/anédrica, com até 0,4 mm. Por vezes euédrica preenchendo cavidades.;

7.33% Vesícula, Vesículas arredondadas e estiradas segundo o fluxo, com até 0,7mm.;

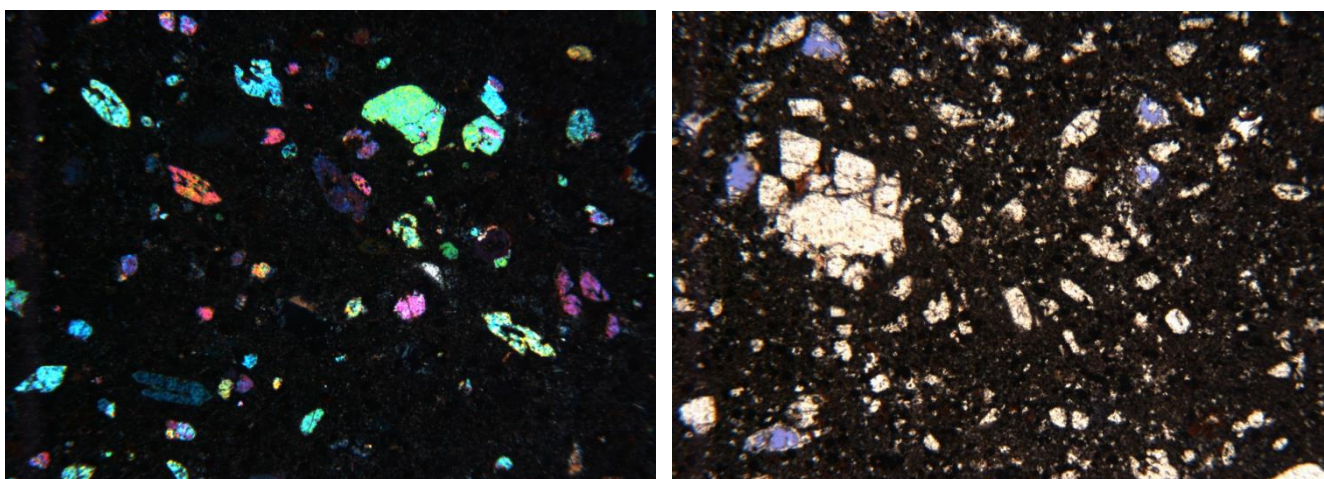
5.0% Poro intercrystalino, Da dissolução da matriz.;

3.67% Fratura, Fratura de <Constituinte>, Olivina, Olivinas;

2.0% Poro intracristalino, Dissolução de <Constituinte>, Olivina, Olivinas;  
 1.0% Poro móldico, Dissolução de <Constituinte>, Nefelina, Feldspatóides;  
 0.67% Analcima, Preenchendo vesícula;

## Descrição Petrográfica

### TRV-01C



#### Identificação

Identificação da descrição:	TRV-01C
Tipo da rocha:	Ígnea
Nome do projeto:	TRINDADE
Unidade/Idade:	Vulcão do Paredão
Bloco/Província:	TRINDADE
País:	Brasil
Lugar:	Ilha da Trindade
Instituição:	UFRGS
Petrógrafo:	Natália Gauer
Data da primeira edição:	02/05/2017
Data da última edição:	26/05/2017
Usos:	Ensino/treinamento
Sumário	
Núcleo de derrame Aa	

#### Características Microscópicas Texturais

Estrutura(s):	Vesicular (0.0-0.0)
Cristalinidade:	Holocristalina
Granularidade:	Fanerítica
Tamanho relativo dos cristais:	Inequigranular
Intervalo de tamanho de cristal:	Muito fino (0.1 mm) ao Médio (5.0 mm)



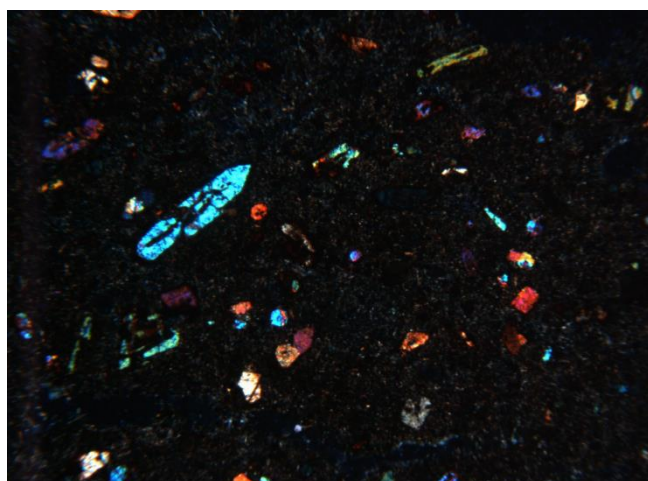
Tamanho de cristal modal: Fino (0.0 mm)  
 Forma dos cristais / fragmentos  
 Perfeição do formato cristalino: Subédrica

#### Composição:

22.0% Olivina, Romboedro grande, Como fenocristal, Pode ser esqueletal, com borda zonada, extinção ondulante. Não estão alteradas. Tamanho: 0,3mm-5mm.;  
 21.67% Clinopiroxênio indiferenciado, Acicular, Como matriz;  
 18.33% Opaco indiferenciado;  
 12.0% Nefelina, Na matriz;  
 10.33% Feldspatóide indiferenciado, Anédrico, Como matriz, Isótrópicos. Analcita? Podem estar bastante oxidados.;  
 4.33% Vesícula, Vesículas arredondadas e esféricas. Com 0,3 mm - 2,4 mm. Por vezes circundadas por nefelina  
 A: clinopiroxênio.;  
 3.33% Flogopita, Como fenocristal, Subédricos. Tamanho: 0,3 mm.;  
 3.33% Poro intercristalino, Dissolução da matriz;  
 2.0% Poro intracristalino, Dissolução de <Constituinte>, Olivina, Olivinas, E da dissolução/fraturamento de cpx.;  
 1.67% Nefelina, Como fenocristal, Esparsos fenocristais subédricos. Tamanho: 0,3 mm.;  
 1.0% Poro móldico, Dissolução de <Constituinte>, Feldspatóide indiferenciado, Feldspatóides, Nefelina?;

## Descrição Petrográfica

### TRV-01F<sub>1</sub>



Identificação		
Identificação da descrição:		TRV-01F1
Tipo da rocha:		Ígnea
Nome do projeto:		TRINDADE
Unidade/Idade:		Vulcão do Paredão
Bloco/Província:		TRINDADE
País:		Brasil
Lugar:		Ilha da Trindade
Instituição:		UFRGS
Petrógrafo:		Natália Gauer
Data da primeira edição:		03/05/2017
Data da última edição:		26/05/2017
Usos:		Ensino/treinamento
Características Microscópicas		
Texturais		
	Vesicular (0.0-0.0)	
Estrutura(s):		
Cristalinidade:		Holocristalina
Granularidade:		Afano-fanerítica
Tamanho relativo dos cristais:		Inequigranular
		Muito fino (0.0 mm) ao Médio (4.8 mm)
Intervalo de tamanho de cristal:		
Tamanho de cristal modal:		Fino (0.0 mm)
Forma dos cristais / fragmentos		
Perfeição do formato cristalino:		Subédrica

#### Composição

27.33% Clinopiroxênio indiferenciado, Acicular, Como matriz;

18.33% Feldspatóide indiferenciado, Como matriz, Intergranulares -subédricos a anédricos-Isotrópicos, com até

0,2 mm. Analcita?;

17.67% Opaco indiferenciado, Cúbica, Como matriz;

16.0% Olivina, Esqueletal, Como fenocristal, Alterado;

9.33% Vesícula, Vesículas alongadas, com até 0,8mm de espessura. Formam caminhos de vesículas.;

5.0% Nefelina, Tabular, Na matriz, Por vezes circundando cavidade;

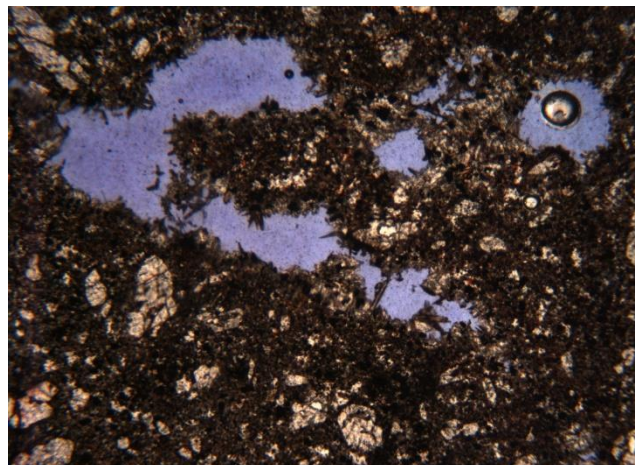
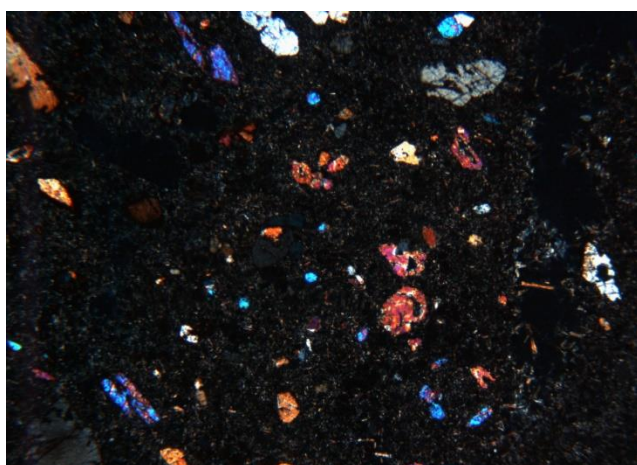
4.33% Poro intercrystalino, Da dissolução da matriz.;

2.0% Poro intracrystalino, Da dissolução de OI? ou do aprisionamento de bolhas???



## Descrição Petrográfica

### TRV-01F<sub>2</sub>



#### Identificação

Identificação da descrição:	TRV-01F2
Tipo da rocha:	Ígnea
Nome do projeto:	TRINDADE
Unidade/Idade:	Vulcão do Paredão
Bloco/Província:	TRINDADE
País:	Brasil
Instituição:	UFRGS
Petrógrafo:	Natália Gauer
Data da primeira edição:	03/05/2017
Data da última edição:	26/05/2017
Usos:	Ensino/treinamento

#### Características Microscópicas Texturais

Estrutura(s):	Vesicular (0.0-0.0)
Cristalinidade:	Holocristalina
Granularidade:	Afano-fanerítica
Tamanho relativo dos cristais:	Inequigranular
Tamanho de cristal modal:	Fino (0.0 mm)
Forma dos cristais / fragmentos	
Perfeição do formato cristalino:	Subédrica

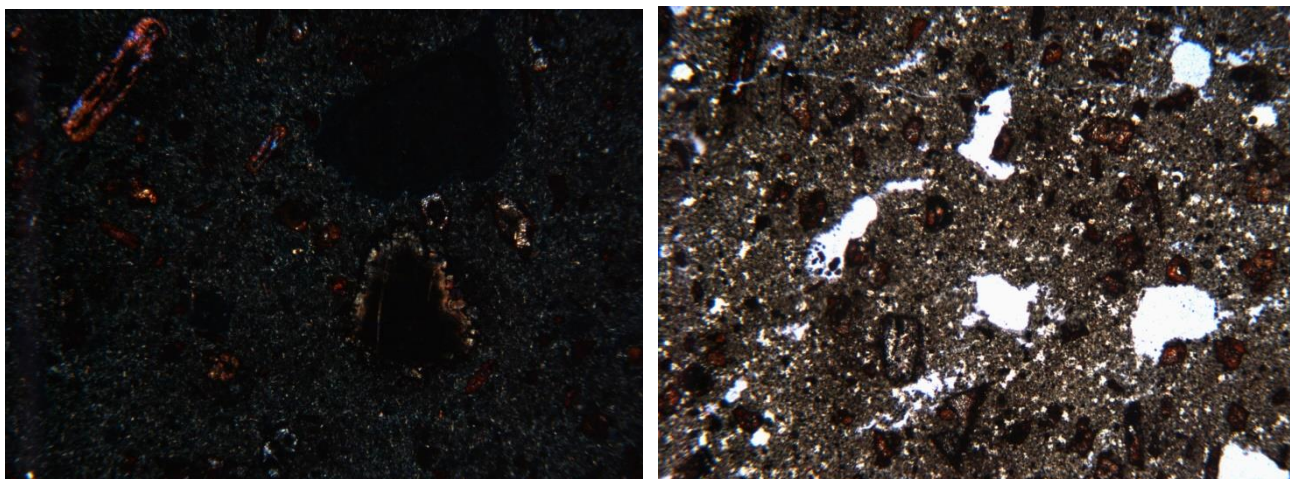
#### Composição

27.67% Clinopiroxênio indiferenciado, Acicular, Como matriz;  
 18.67% Olivina, Esqueletal, Como fenocristal, Fraturado, Tamanho: 0,06mm- 2mm.;  
 15.33% Opaco indiferenciado;  
 14.33% Feldspatóide indiferenciado, Anédrico, Isotrópicos, por vezes com birrefringência baixa. Analcita/Nefelina?;

10.67% Vesícula, Arredondadas e angulosas. Tamanho: 0,4 mm até 4 mm. As vesículas são circundadas por cristais aciculares de cpx, nefelina anédrica e titanomagnetita.;  
 10.0% Nefelina, Na matriz, Anédrica intergranular, ou subédrica circundando cavidade.;  
 2.33% Poro intercrystalino, Dissolução da matriz.;  
 0.67% Fratura;  
 0.33% Poro intracrystalino, Dissolução de Ol e Cpx.;

## Descrição Petrográfica

### TRV-03A



#### Identificação

Identificação da descrição:	TRV-03A
Tipo da rocha:	Ígnea
Nome do projeto:	TRINDADE
Unidade/Idade:	Vulcão do Paredão
Bloco/Província:	TRINDADE
País:	Brasil
Instituição:	UFRGS
Petrógrafo:	Natália Gauer
Data da primeira edição:	03/05/2017
Data da última edição:	26/05/2017
Usos:	Ensino/treinamento

#### Características Microscópicas Texturais

Estrutura(s):	Vesicular (0.0-0.0)
Cristalinidade:	Holocristalina
Granularidade:	Afano-fanerítica
Intervalo de tamanho de cristal:	Muito fino (0.0 mm) ao Médio (3.2 mm)
Forma dos cristais / fragmentos	
Perfeição do formato cristalino:	Subédrica

### Composição

25.0% Clinopiroxênio indiferenciado, Acicular, Como matriz;

15.67% Opaco indiferenciado, Cúbica, Como constituinte da petrotrama secundária;

14.67% Feldspatóide indiferenciado, Anédrico, Como matriz, Isótropo.;

14.33% Olivina, Romboedro grande, Como fenocristal, Alterado, Alguns grão completamente oxidados (iddingsita). Tamanho:0,3mm-3,2mm.;

10.67% Vesícula;

6.0% Nefelina, Na matriz;

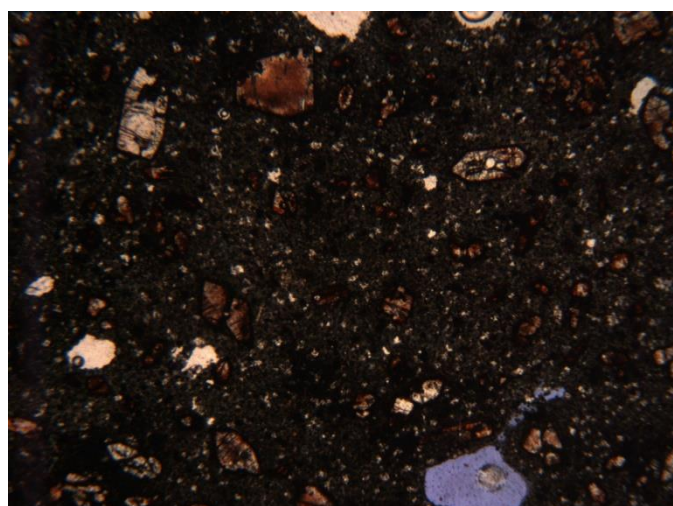
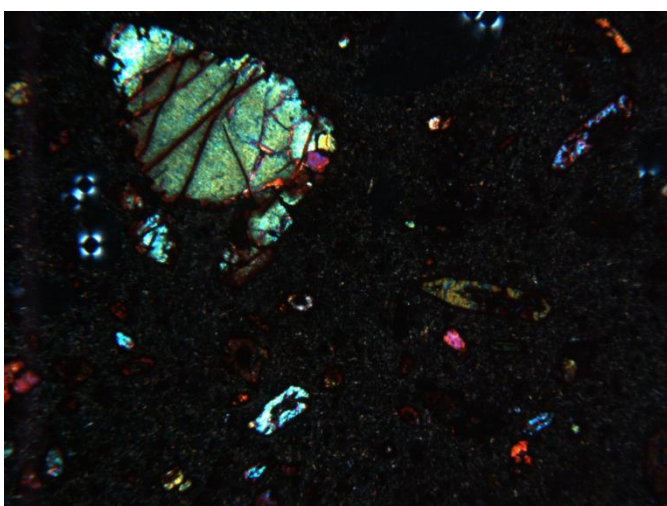
5.0% Poro intercrystalino, Dissolução da matriz.;

4.33% Poro intracrystalino, Da dissolução dos cristais?;

4.33% Fratura;

## Descrição Petrográfica

### TRV-03B



### Identificação

Identificação da descrição:

TRV-03B

Tipo da rocha:

Ígnea

Nome do projeto:

TRINDADE

Unidade/Idade:

Vulcão do Paredão

Bloco/Província:

TRINDADE

País:

Brasil

Data da primeira edição:

30/05/2017

Data da última

edição:

30/05/2017

Usos:

Ensino/treinamento

Características Microscópicas

Texturais

Estrutura(s): Vesicular (0.0-



0.0)

Cristalinidade:	Holocristalina
Granularidade:	Afano-fanerítica
Tamanho relativo dos cristais:	Inequigranular
Intervalo de tamanho de cristal:	Muito fino (0.1 mm) ao Médio (2.0 mm)
Forma dos cristais / fragmentos	
Perfeição do formato cristalino:	Subédrica
Forma tridimensional dos cristais ou fragmentos:	Acicular, Esqueletal
Textura(s):	Vesicular, Porfírica, Glomeroporfírica, Intergranular

### Composição

26.0% Clinopiroxênio indiferenciado, Acicular, Na matriz;

18.67% Olivina, Esqueletal, Como fenocristal, Alterado, Tamanho: 0.4mm-2mm. Subédricas, zonadas, oxidadas (iddingsita?), fraturadas.;

14.0% Opaco indiferenciado, Cúbica, Como constituinte da petrotrama secundária, Magnetita? Sobre a matriz.;

13.0% Vesícula;

12.67% Nefelina, Na matriz, Subédricos.;

8.0% Constituinte indiferenciado, Na matriz, Mineral anédrico incolor, com baixa birrefringência/isotrópico. Analcima?;

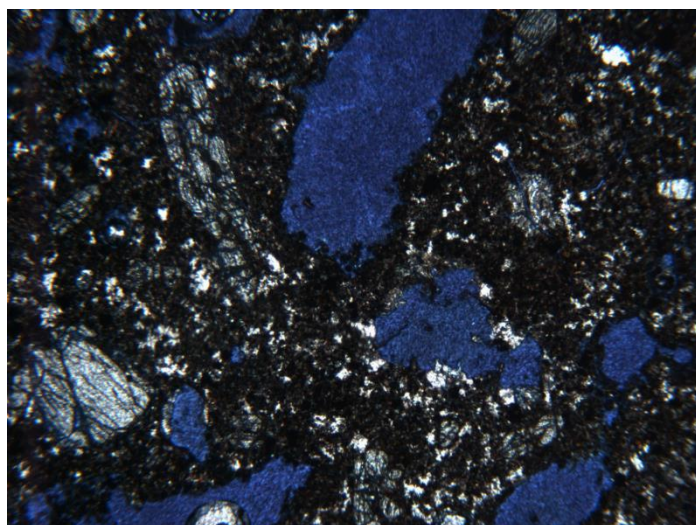
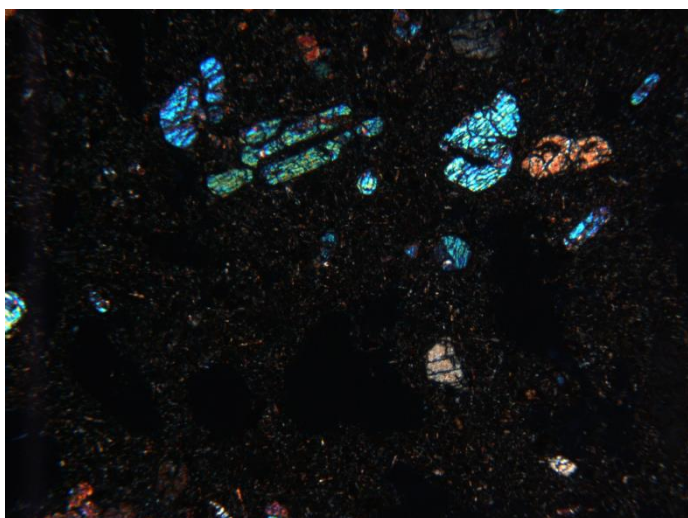
3.33% Poro intercrystalino;

2.33% Fratura, Intracrystalino, Fratura de <Constituinte>, Olivina, Olivinas, Intra e intercrystalinas.;

2.0% Poro intracrystalino, Em <Constituinte>, Olivina, Olivinas, Em olivina esqueletal.;

## Descrição Petrográfica

### Tr-08



### Identificação

Identificação da descrição: Tr-08  
 Tipo da rocha: Ígnea  
 Unidade/Idade: Vulcão do Paredão  
 Bloco/Província: TRINDADE  
 País: Brasil  
 Lugar: Ilha da Trindade  
 Instituição: UFRGS

### Características Macroscópicas:

Estruturas: Vesicular(0.0-1.0 cm), Maciça(0.0-0.0 )  
 Cristalinidade: Hipocristalina  
 Tamanho de cristal modal: Fino, Médio  
 Cor(es): Cinza médio N 5  
 Granularidade: Afanítica  
 Forma dos cristais / fragmentos  
 Perfeição do formato cristalino: Alotriomórfica  
 Textura(s): Vesicular, Porfirítica

### Características Microscópicas

#### Texturais

Estrutura(s): Vesicular (0.0-10.0mm)  
 Cristalinidade: Holocristalina  
 Granularidade: Fanerítica  
 Tamanho relativo dos cristais: Inequigranular  
 Tamanho de cristal modal: Fino (0.0 mm)  
 Forma dos cristais / fragmentos  
 Perfeição do formato cristalino: Subédrica  
 Forma tridimensional dos cristais  
 ou Prismática  
 fragmentos: Vesicular, Glomeroporfirítica, Intercrescimento  
 Textura(s): lamelar, Vitroclástica

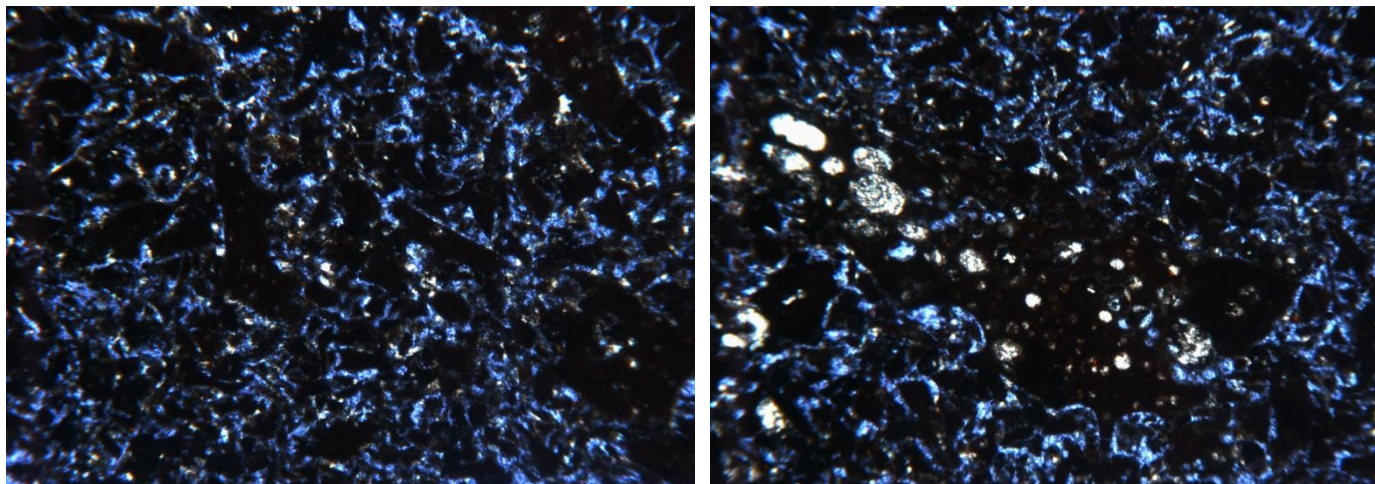
### Composição

21.0% Clinopiroxênio indiferenciado, Acicular, Como matriz;  
 18.67% Constituinte indiferenciado, Como matriz, Mineral incolor e isotrópico, intergranular.  
 Analcita?;  
 17.67% Vesícula, Predominantemente arredondadas.;  
 15.33% Olivina, Esqueletal, Como fenocristal, Tamanho: 0.3-3.2mm. Por vezes em  
 aglomerados, com extinção ondulante.;  
 15.0% Opaco indiferenciado, Cúbica, Magnetita? Sobre a matriz e na borda de fenocristais e  
 vesículas.;  
 6.67% Fratura, Inter cristalino, Fratura de <Constituinte>, Olivina, Olivinas, Fraturas ao  
 longo da lâmina que cortam os fenocristais.;  
 3.33% Poro inter cristalino, Dissolução da matriz.;  
 2.33% Nefelina, Como matriz;



## Descrição Petrográfica

### Tr-07



#### Identificação

Identificação da descrição:	Tr-7
Tipo da rocha:	Ígnea
Nome do projeto:	TRINDADE
Unidade/Idade:	Vulcão do Paredão
Bloco/Província:	TRINDADE
País:	Brasil
Lugar:	Ilha da Trindade
Instituição:	UFRGS
Petrógrafo:	Natália Gauer Pasqualon
Digitador:	Natália Gauer Pasqualon
Data da primeira edição:	17/12/2014
Data da última edição:	08/09/2017

#### Sumário

Lapili-tufo do topo do Vulcão do Paredão.

#### Características Macroscópicas:

Estruturas:	Laminação plano-paralela (0.0-0.0)
Tamanho de grão modal:	Lapilli: partículas, Cinza grossa: partículas
Cor(es):	Marrom claro 5 YR 5/6
Granularidade:	Afanítica
Tamanho relativo dos cristais:	Inequigranular
Forma dos cristais / fragmentos	
Perfeição do formato cristalino:	Alotriomórfica

## Características Microscópicas

## Texturais

	Brechado (0.0-7.0mm), Vesicular (0.0-3.0mm), Amigdaloidal (0.0-1.0mm)
Estrutura(s):	
Cristalinidade:	Hipohialina
Granularidade:	Afanítica
Tamanho relativo dos cristais:	Inequigranular
Intervalo de tamanho de grão:	Cinza fina: partículas (0.0 mm) ao Lapilli: partículas (7.0 mm)
Tamanho de grão modal:	Cinza fina: partículas (0.0 mm)
Intervalo de tamanho de cristal:	Muito fino (0.03 mm) ao Médio (4.0 mm)
Tamanho de cristal modal:	Fino (0.0 mm)
Forma dos cristais / fragmentos	
Perfeição do formato cristalino:	Alotriomórfica
Forma tridimensional dos cristais ou fragmentos:	Irregular, Prismática
Textura(s):	Escoriácea, Vitroclástica, Vesicular, Amigdaloidal

## Composição

36.0% Poro interpartícula, Porosidade dos fragmentos de escória.;

28.0% Shard vulcânico, Lascas de vidro vulcânico com formato cúspide e planar.;

12.0% Fragmento de escória vulcânica, Fragmentos angulosos de tamanho lúpili, com cristais completamente oxidados (olivina?).;

11.67% Zeolita indiferenciada, Isotrópica/ baixa birrefringência, Incolor a LN. Preenchendo poros dos fragmentos de escória e interpartícula.

5.67% Olivina, Alterado, Completamente oxidada, como parte dos fragmentos escoriáceos.;

3.33% Poro intrapartícula, Vesículas dos fragmentos de escória.;

1.67% Constituinte indiferenciado, Tabular, Preenchendo cavidade, Mineral com extinção paralela, cor laranja, relevo alto e extremamente pequeno. Geralmente ocorre associado às zeolitas preenchendo cavidades.;

1.67% Fratura, Porosidade de fratura ao longo da lâmina.;

## APÊNDICE C: Análises químicas em % de peso obtidas por EDS.

Espectros 1 ao 16 (% em peso).

Espectro	C	N	O	Cl	Au	SiO <sub>2</sub>
1	0	10,80694	8,988241	1,568168	12,60832	
2	0	14,39338	0	1,686055	13,27593	0,928092
3	0	9,620505	0,103973		8,609842	34,7319
4	0	9,425951	0,062463		8,839208	34,44915
5	0		0		7,49486	35,00244
6	0		0		5,597265	20,63353
7	0		0,190009		7,667819	
8	0		0,147921		8,108588	
9	0		0,079325		10,58787	32,29242
11	0	10,52653	10,52653		7,813782	34,39889
12	0		0,341623		8,835409	35,2031
13	0		0		8,102728	32,16933
14	0		0,127839		9,20636	30,17392
15	0		0,072352		9,884252	36,02451
16	0	9,83747	0,071941		8,122529	34,21712
Espectro	MgO	FeO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	BaO
1						
2						
3	38,01569	12,77632				
4	39,06329	11,97737				
5	40,27734	12,9463				
6	8,452701	7,209952	7,022215	4,552579	7,454753	1,821127
7	3,392082	57,40872	1,664928		24,86828	
8	1,316712	55,13171	2,252069		15,98687	
9	35,52055	14,22612				
11	39,13025	13,3647				
12	37,51202	13,63914				
13	35,7351	14,07387				
14	32,69288	15,18543				
15	37,73446	14,93515				
16	38,04235	13,51946				

Espectros 35 ao 51 (% em peso).

Espectro	C	N	O	Cl	Au	MgO	TiO2	FeO
35	0		0,734		6,43	3,35	34,124	49,02
36	0		0		3,63	8,32	7,3892	7,535
37	0		0		4,79	9,05	7,4154	7,826
38		10,45	0		5,36			
39	0	9,559	0		5,44			
40	0	13,26	0		6,64			
41	0	11,38	0		5,87			
42	0		0		5,49	12,8	9,7679	8,057
43	0		0		4,32	10,1	8,6225	8,904
44	0		0		6,48	44,3		13,46
45	0	12,37	0,134		7,37	45,4		11,3
46		13,06	0		5,86			
47			0	0,74	6,84			
48	0	10,01	0,13		6,33			
49	0	7,792	0		5,63			
50	0		0		6,3	39,3		13,23
51	0		0		6,05	41		13,83
Espectro	Al2O3	SiO2	K2O	BaO	Na2O	CaO	P2O5	ZrO2
35								
36	7,855	20,25	3,574	2,88				
37	8,9424	21,18	3,823	4,47				
38	27,875	35,71	2,789		13,7	1,01		
39	26,413	33,64	2,678		12,5	1,07		
40	28,849	36,74	2,615		15,8	1,04		
41	29,657	37,4	2,938		14,8	1,12		
42	9,9999	29,16	6,141		0,78			
43	9,8682	24,12	4,539	4,87				
44		37,85						
45		38,16						
46	30,225	38,66	2,63		15,6	1,22		
47		2,151				27,3	18,138	1,473
48	25,819	33,03	2,587		12,7	1,01		
49	25,514	36,5	4,543		9,76	1,05		
50		35,54						
51		35,43						

APÊNDICE D: Medidas das fraturas dos depósitos do Vulcão do Paredão em notação trama.

<b>Atitude</b>
85/259
90/264
72/071
76/074
90/259
84/250
90/255
86/231
70/092
77/130
90/314
80/165
86/318
83/270
58/220
79/224
89/050



## APÊNDICE E: Tabela de cálculo dos minerais normativos.

Name	TRV-01B	TRV-01C	TRB-01F1	TRB-03A	TRV-03B	TRV-03F
SiO <sub>2</sub>	39,82	40,18	40,06	40,03	40,09	40,20
TiO <sub>2</sub>	5,05	4,84	5,02	4,97	4,95	6,10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,68	9,49	9,82	9,49	9,57	9,92
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,11	2,12	2,10	2,19	2,14	2,50
FeO	12,06	12,11	12,02	12,51	12,26	14,26
MnO	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,17
MgO	12,94	13,25	12,98	13,48	13,47	12,39
CaO	11,08	10,54	10,68	10,72	10,61	10,40
Na <sub>2</sub> O	5,59	3,47	3,81	5,00	3,64	3,31
K <sub>2</sub> O	0,81	3,08	2,72	0,83	2,46	0,20
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,68	0,75	0,64	0,62	0,63	0,56
CO <sub>2</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Total</b>						
Quartz (Q)						
Corundum(C)						
Orthoclase(Or)						1,17
Albite(Ab)						8,17
Anorthite(An)		1,25	1,65	1,00	2,50	11,64
Nepheline(Ne)	24,53	15,89	17,47	22,91	16,70	10,72
Diopside(Di)	31,29	27,17	27,77	35,54	28,87	29,38
Hypersthene(Hy)						
Olivine(Ol)	21,70	23,62	22,59	21,47	23,46	22,45
Magnetite(Mt)	2,15	3,07	3,05	3,17	3,11	3,62
Ilmenite(Il)	9,59	9,19	9,54	9,44	9,41	11,59
Apatite(Ap)	1,58	1,74	1,47	1,45	1,47	1,30
Acmite(Ac)	1,81					
Leucite(Lc)	3,77	14,27	12,58	3,84	11,38	
K-						
Metasilicate(Ks)						
Na-						
Metasilicate(Ns)						
CaDiSilicate(Cs)	3,63	3,84	3,92	1,24	3,15	
Kaliophilite(Kp)						
Wollastonite(Wo)						
Hematite(Hm)						
Titanite(Tn)						
Rutile(Ru)						
Perovskite(Pf)						
Calcite(Cc)						
<b>Total</b>						
Solidification Index	35,00	33,66	34,09	34,31	34,11	33,93
Differentiation Ind.	28,30	30,16	30,05	26,75	28,09	20,06
Color Index	66,54	63,05	62,94	69,62	64,84	67,04
Agpaitic Index	1,04	0,95	0,94	0,96	0,90	0,57
Mg#	64,78	65,24	64,95	64,89	65,34	59,84
Olivine fo	15,06	16,55	15,90	14,96	16,49	14,84
Olivine fa	6,64	7,07	6,69	6,51	6,96	7,61
Diopside wo	16,21	14,09	14,40	18,42	14,97	15,16
Diopside en	10,74	9,40	9,65	12,24	10,02	9,68
Dioside fs	4,30	3,64	3,68	4,83	3,84	4,50

## ANEXOS

ANEXO A – Tabela do uso do apoio do Instituto de Geociências (IGEO - UFRGS) para execução do projeto temático.

### Laboratórios utilizados:

Núcleo de Preparação de Amostras - (CPGQ)

Laboratório de Geologia Isotópica - (CPGQ)

Núcleo de Litoquímica e Análises Mineraias - (CPGQ)

Modalidade de auxílio	Quantidade cedida pelo IGEO	Quantidade utilizada pelo aluno
Diárias de campo para aluno	R\$ 250,00	R\$ 250,00
Preparação de amostras (moagem)	15	8
Lâminas petrográficas	15	7
XRF	9	7
MEV	1 sessão de 3h	1 sessão de 3h