

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**ANÁLISE ESTRATIGRÁFICA DOS DEPÓSITOS
VULCÂNICOS DA FORMAÇÃO MORRO VERMELHO,
ILHA DA TRINDADE, BRASIL**

FERNANDO RODRIGUES DA LUZ

ORIENTADOR – Dr. Evandro Fernandes de Lima

Porto Alegre – 2019

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**ANÁLISE ESTRATIGRÁFICA DOS DEPÓSITOS
VULCÂNICOS DA FORMAÇÃO MORRO VERMELHO,
ILHA DA TRINDADE, BRASIL**

FERNANDO RODRIGUES DA LUZ

ORIENTADOR - Dr. Evandro Fernandes de Lima (UFRGS)

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Augusto Sommer (Universidade Federal do Rio Grande do Sul)

Prof. Dr. Breno Leitão Waichel (Universidade Federal de Santa Catarina)

Dr. Isabela de Oliveira Carmo (CENPES/PETROBRAS)

Dissertação de Mestrado apresentada
como Requisito parcial para a
obtenção do título de Mestre em
Geociências.

Porto Alegre – 2019

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

Luz, Fernando Rodrigues da

Análise estratigráfica dos depósitos vulcânicos da Formação Morro Vermelho, Ilha da Trindade, Brasil. / Fernando Rodrigues da Luz. - Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2019.
[76 f.] il.

Dissertação (Mestrado).- Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Geociências. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2019.

Orientador(es): Evandro Fernandes De Lima

1. Vulcão Monogenético.
2. Ilha Oceânica.
3. Nefelinitos.
4. Fácies Vulcânicas. I. Título.

CDU 551.21

Catálogo na Publicação

Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS

Renata Cristina Grun

CRB 10/1113

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Campus do Vale Av. Bento Gonçalves, 9500 - Porto Alegre - RS - Brasil

CEP: 91501-970 / Caixa Postal: 15001.

Fone: +55 51 3308-6569

E-mail: bibgeo@ufrgs.br

Aos familiares, amigos e mestres... obrigado.

Agradecimentos

Agradeço, de coração, pelo apoio, compreensão e ajuda de todos meus familiares. Suzana, obrigado por ser esta mulher sempre batalhadora e que me apoiou para que conseguisse atingir meus objetivos. Este trabalho tem toda sua colaboração. Cláudio, pai querido, obrigado por sempre me apoiar quando necessário. Gustavo, meu irmão e sugundo pai... devo muito a ti pela segurança que sempre me passou para enfrentar os desafios. Minha avó, Almerinda, exemplo de presteza e amor aos seus, te amo.

Sempre agradecido pelos grandes amigos que conquistei até aqui nesta trajetória, especialmente aos que estiveram diretamente ligados à este trabalho. Lucas, companheiro de trabalho e irmão de coração, assim como Marcos, meu colega e fiel amigo. Agradeço muito à vocês dois pela amizade, apoio, críticas, correções e tempo despendido para que esta dissertação ficasse a melhor possível. Muito obrigado por tudo Natália, sempre serei agradecido pela amizade, companheirismo, fidelidade e ajuda que deste em todas as etapas do processo. És minha irmã mais nova e tem lugar cativo aqui comigo. Aos demais... saibam que todos, de alguma forma, contribuíram para que eu tivesse a coragem e capacidade para apresentar este trabalho.

Um agradecimento especial a meu grande amigo, mestre e orientador, Evandro. Chinês, és meu pai geológico e eu sou muito agradecido por ter sido assim. Sempre disposto a ajudar, muito me ensinou sobre a geologia e vida. Obrigado de coração.

Obrigado ao projeto 442812/2015-9 do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro e à Marinha do Brasil pela operacionalidade de todos os trabalhos realizados.

RESUMO

Os depósitos vulcânicos da Formação Morro Vermelho, terceira unidade geológica formada de um total de cinco, foram escolhidos para detalhamento estratigráfico no presente estudo. Esta unidade representa a atividade Pleistocênica na Ilha da Trindade, Brasil, onde é possível identificar a intercalação entre lavas nefelíticas e depósitos piroclásticos gerados pela manifestação de um vulcanismo monogenético. Seus depósitos afloram de porção da costa leste até cerca de 600 metros de altitude em zona central da ilha. As atividades eruptivas desta unidade estão relacionadas a dois estilos eruptivos principais: Havaiano (efusivo) e Estromboliano (explosivo). Foi descrita uma sucessão com aproximadamente 240 metros de espessura formada por lavas do morfotipo 'A'a, que compõem a base da formação. Estes derrames são recobertos por depósitos piroclásticos com aproximadamente 360 metros de espessura. Lateralmente aos derrames presentes na base, ainda, foram descritas brechas, lapilitos mal e bem selecionados, com ou sem gradação inversa, sendo relacionados à eventos de retrabalhamento (sin-eruptivo) do material vulcânico. A identificação dos dois estilos eruptivos, com raras intercalações entre os produtos gerados, demonstra que estes estilos eruptivos podem ocorrer concomitantemente. Com um total de sete litofácies descritas agrupadas em três associações de fácies, a análise estratigráfica desta unidade permitiu explicar os eventos relacionados à evolução deste vulcanismo desde sua origem, apresentando um panorama completo da evolução deste vulcanismo.

ABSTRACT

The volcanic deposits of the Morro Vermelho Formation, third geological unit formed of a total of five, were chosen for stratigraphic detail in the present study. This unit represents the Pleistocene activity on the Island of Trindade, Brazil, where it is possible to identify the intercalation between nephelinitic lavas and pyroclastic deposits generated by the manifestation of a monogenetic volcanism. Its deposits rise from the east coast to about 600 meters in the central zone of the island. The eruptive activities of this unit are related to two main eruptive styles: Hawaiian (effusive) and Strombolian (explosive). A succession with approximately 240 meters of thickness formed by lavas of the morphotype *A'a'*, that compose the base of the formation was described. These lava flows are covered by pyroclastic deposits approximately 360 meters thick. Laterally to the lavas present in the base, there were also breccias, poor and well sorted lapillistones, with or without inverse gradation, being related to the mass movement events (syn-eruptive) of the volcanic material. The identification of the two eruptive styles, with rare intercalations between the generated products, demonstrates that these eruptive styles can occur concomitantly. With a total of seven lithofacies described and grouped in three facies associations, the stratigraphic analysis of this unit allowed to explain the events related to this volcanism from its origin, presenting a complete panorama of the evolution of this.

Lista de Figuras

- Figura 1:** Alinhamento das ilhas vulcânicas do arquipélago do Havaí, gerado pela passagem da crosta sobre um ponto quente e destaque para modelo geológico simplificado do arquipélago. (imagem de satélite Landsat - Google Earth Pro)..... 4
- Figura 2:** Classificação genética dos depósitos vulcânicos (Modificado de McPhie et al. 1993)..... 6
- Figura 3:** A - Destaque (pontilhado em vermelho) dos prováveis corpos vulcânicos e provável “caminho” deixado pelo *hotspot* de Trindade (modificado de Fodor, 2000); B – Detalhamento da Cadeia Vitória – Trindade inserida na Zona de Fratura Vitória Trindade (linha preta) (modificado de Almeida, 2006). 8
- Figura 4:** As principais feições geológicas das unidades que compõem a Ilha da Trindade. A – Complexo Trindade com destaque para necks fonolíticos vistos na Praia das Tartarugas; B – Sequência Desejado e suas camadas subhorizontais em planalto no centro da ilha; C – Formação Morro Vermelho e seus depósitos piroclásticos e porção do cone de escórias ao fundo; D – Formação Valado e seus derrames nefeliníticos com morfologia dominante *A'a*; E – Formação Vulcão do Paredão e porção do seu cone de escórias ainda preservado no sul da ilha..... 10
- Figura 5:** Vista NW da ilha da trindade. Destaque para o grande neck do Monumento, à direita. 12
- Figura 6:** Seções colunares confeccionadas em depósitos relacionadas à movimentos de massa da Formação Morro Vermelho, sem nenhuma forma de tratamento em programa de vetorização. 17
- Figura 7:** Mapa geológico base da ilha da Trindade com separação das unidades geológicas. (Extraído e modificado de Almeida, 1961). 19
- Figura 8:** Composição de fotos de detalhe formando uma lâmina inteira (4.5x2.5 cm). Na foto detalha-se o núcleo de um derrame de nefelinito composta por fenocristais de olivina emersos em uma matriz fanerítica fina e presença de vesículas. Nota-se orientação dos fenocristais e estiramento das vesículas segundo o fluxo do derrame. 20
- Figura 9:** Página de consulta ao artigo submetido no site da Evise, ferramenta criada pela empresa Elsevier para normatizar a submissão de artigos para revistas científicas. 24

Lista de Anexos

Anexo I: Modelo geológico da FMV. 1) Início do vulcanismo com geração de derrames e atividade explosiva no mesmo centro eruptivo; 2) Formação de cone de escórias por atividade estromboliana nas porções mais elevadas da unidade com fluxos de lava nefelinítica (estilo Havaiano) sendo formados nas porções basais do cone. 63

Anexo II: Modelo geológico da FMV. 3) Crescimento do cone de escórias por deposição de mais e mais material fragmentado (lápili) próximo à cratera e preenchimento de grande vale previamente escavado pela erosão nas rochas do Complexo Trindade (verde) por fluxos de lava nefelinítica com morfologia final A'a'; 4) Movimentos de massa na forma de grandes escorremantos de porções do cone e fluxos de escória são gerados durante a atividade explosiva no cone de escórias da unidade..... 64

Anexo III: Modelo geológico da FMV. 5) Fragmentos do cone de escórias e fluxos de escória fluem em direção às porções de menor altitude da ilha, enquanto que o vale já se encontra quase completamente preenchido pelos derrames nefeliníticos; 6) Deposição de parte do material referente aos movimentos de massa (lapilitos, lápili-tufos e brechas) em posição lateral aos derrames que preencheram o vale, ocorrendo interdigitação destes depósitos em alguns pontos. A continuada manifestação explosiva no topo da unidade gera novos pacotes de material piroclástico, que sobrepõem as antigas camadas que sofreram desmoronamento, deixando marcada a superfície de deslizamento onde este ocorreu com diferentes orientações das camadas. 65

Anexo IV: Modelo geológico da FMV. Provável configuração final da Formação Morro Vermelho, com o vale totalmente preenchido por derrames nefeliníticos com depósitos referentes à movimentos de massa posicionadas lateralmente, e depósitos piroclásticos relacionadas à vulcanismo estromboliano dominando nas porções de maior altitude (cone de escória com porção onde é reconhecida zona de deslizamento – cores amarela e marrom). 66

Anexo V: Detalhe de erupção ocorrida no vulcão Stromboli (Italia), mostrando atividade explosiva na cratera do cone de escórias (estilo Estromboliano), atividade efusiva na base (estilo Havaiano) e fraturas que podem vir a gerar movimentos de massa como escorregamentos, fluxos de escória e PDC's. Este seria o provável cenário durante as atividades eruptivas da FMV. 67

Anexo VI: Mapa Geológico de Trindade atualizado com áreas recobertas por depósitos da FMV e referenciadas anteriormente à outra unidade geológica da Ilha (modificado de Almeida, 1961)..... 68

Anexo VII: Tabela de fácies e associação de fácies gerada para os depósitos que compõem a pilha vulcânica da FMV..... 69

Sumário

Parte I	1
1. Introdução	2
1.1 Estrutura da Dissertação	2
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Estado da Arte.....	3
1.4 Contexto Geológico da Área de estudo.....	7
1.5 Generalidades.....	11
Parte II	13
2. Materiais e Métodos	14
2.1 Etapa pré-campo.....	14
2.1.1 Revisão bibliográfica.....	14
2.1.2 Sensoriamento Remoto.....	14
2.2 Etapa de Campo	15
2.2.1 Dimensionamento da área.....	15
2.2.2 Descrição detalhada das litofácies.....	16
2.2.3 Confecção de croquis e perfis colunares.....	16
2.2.4 Amostragem.....	17
2.3 Etapa de Laboratório	18
2.3.1 Geoprocessamento.....	18
2.3.2 Descrições Petrográficas.....	19
Referências	20

Parte III	23
3. Artigo Científico submetido	24
Parte IV	57
4.1 Publicações, resumos e histórico do curso	58
4.2 Anexos	64

PARTE I

1. Introdução

O primeiro passo da pesquisa científica é a busca pelo conhecimento acerca de todos os aspectos geológicos da área estudada. Saber como as pesquisas iniciaram e, principalmente como evoluíram, é uma premissa necessária para que o trabalho seja realizado de forma plena. Neste capítulo serão expostas a estrutura da dissertação, breve descrição do contexto geológico em que a ilha está inserida, algumas generalidades, os principais objetivos do presente trabalho e o atual estado da arte das pesquisas realizadas até aqui.

1.1 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação foi baseada principalmente em um artigo submetido sobre o tema, nos dados obtidos pelo grupo de pesquisas em trabalhos na ilha da Trindade e também através da análise de estudos publicados tanto sobre a ilha quanto áreas análogas. Para tanto, o texto foi subdividido em quatro partes principais: I - Introdução (Estrutura da dissertação, Objetivos; Estado da Arte; Contexto geológico da área de estudo e Generalidades); II – Materiais e métodos; III – Artigo científico submetido e IV – Anexos.

1.2 Objetivos

O principal objetivo do presente trabalho foi a elaboração do modelo geológico (Anexo I, II, III e IV) mais fidedigno à evolução do vulcanismo na FMV com base em um metodologia de trabalho que pudesse ser utilizada para todas as outras quatro unidades geológicas da ilha. Priorizou-se a construção de um arcabouço estratigráfico com base nas diversas litologias descritas para a unidade (depósitos efusivos, explosivos e ressedimentados sin-vulcânicos) e como estas estão organizados dentro da pilha vulcânica. Para tanto, foram confeccionadas seções colunares em afloramentos-chave da formação, onde as diferentes litofácies puderem ser detalhadamente descritas e interpretadas quanto suas geometrias, composições, interações com o paleorelevo, rochas de outras unidades e produtos gerados na própria FMV. A utilização de análogos e modelos amplamente discutidos, e aceitos, na comunidade científica com intuito de interpretar as formas de *emplacement*, estilos eruptivos e modelos de evolução dos depósitos da FMV foi realizado e trouxe grande luz às conclusões do presente trabalho. A análise

petrográfica foi utilizada com objetivo de corroborar e esclarecer dados de campo, como por exemplo o grau de explosividade do sistema, separação de depósitos com base em seus constituintes, entre outros. Com o uso destas técnicas foi possível elaborar um modelo plausível de gênese para a Formação Morro Vermelho.

1.3 Estado da Arte

A teoria dos pontos quentes (*hotspots*) foi proposta utilizando o conjunto de ilhas do Havaí como base (Figura 1; Wilson, 1963), ligando sua origem a passagem da crosta sobre uma zona de temperaturas mantélicas anômalas. Estas zonas teriam atividade persistente (o que explicaria o vulcanismo em áreas distantes do limites de placas) e por longos períodos de tempo. Com a passagem da placa litosférica por sobre este ponto quente, um alinhamento de corpos vulcânicos seria gerado, deixando marcado o caminho percorrido pela placa.

O origem da ilha da Trindade tem sido relacionada à eventos semelhantes aos descritos acima. Trindade, e o arquipélago de Martim Vaz (~50 km à leste da ilha), são descritas como a extremidade leste de um alinhamento de montes submarinos e *guyots* conhecido como Cadeia Vitória Trindade (CVT). Interpretações químicas e radiométricas nas rochas alto-K e alto-Mg das províncias ígneas alcalinas do Poxoréu (GO) e do Alto Paranaíba (MG), bem como análise dos dados de movimentação dos antigos supercontinentes, indicam provável ligação com a fonte que originou a CVT e a Ilha da Trindade (Gibson et al, 1995 e 1997). O *hotspot* teria impactado a litosfera continental durante sua deriva para oeste, quando da abertura do oceano Atlântico (ruptura do supercontinente Gondwana) há cerca de 85 Ma. Datações obtidas através do método K-Ar demonstraram que aproximadamente quarenta milhões de anos após estes eventos, este ponto de temperatura anômala teria começado a atuar na crosta oceânica, provavelmente onde hoje se localiza a plataforma e as ilhas de Abrolhos (Cordani e Blazekovic, 1970). Portanto, a CVT propriamente dita, teria sua origem entre 40 e 50 Ma atrás.

Outra teoria de formação relaciona as províncias alcalinas do sudoeste (Cretáceo) e da CVT, ao final do vulcanismo dos basaltos em platô (*flood basalts*) da província do Paraná (entre 130 e 135 Ma) (VanDecar, 1995). O vulcanismo nesta porção norte da província teria sido gerado durante a extinção da fonte de calor, a cerca de 85 Ma. Segundo VanDecar, o alinhamento de elevações na crosta oceânica teria sido gerado pela ativação de falhas transformantes nesta área, e não

pela atividade de um *hotspot*. Vale destacar que a teoria formacional utilizada neste trabalho é a dos pontos quentes, descrita no parágrafo anterior.

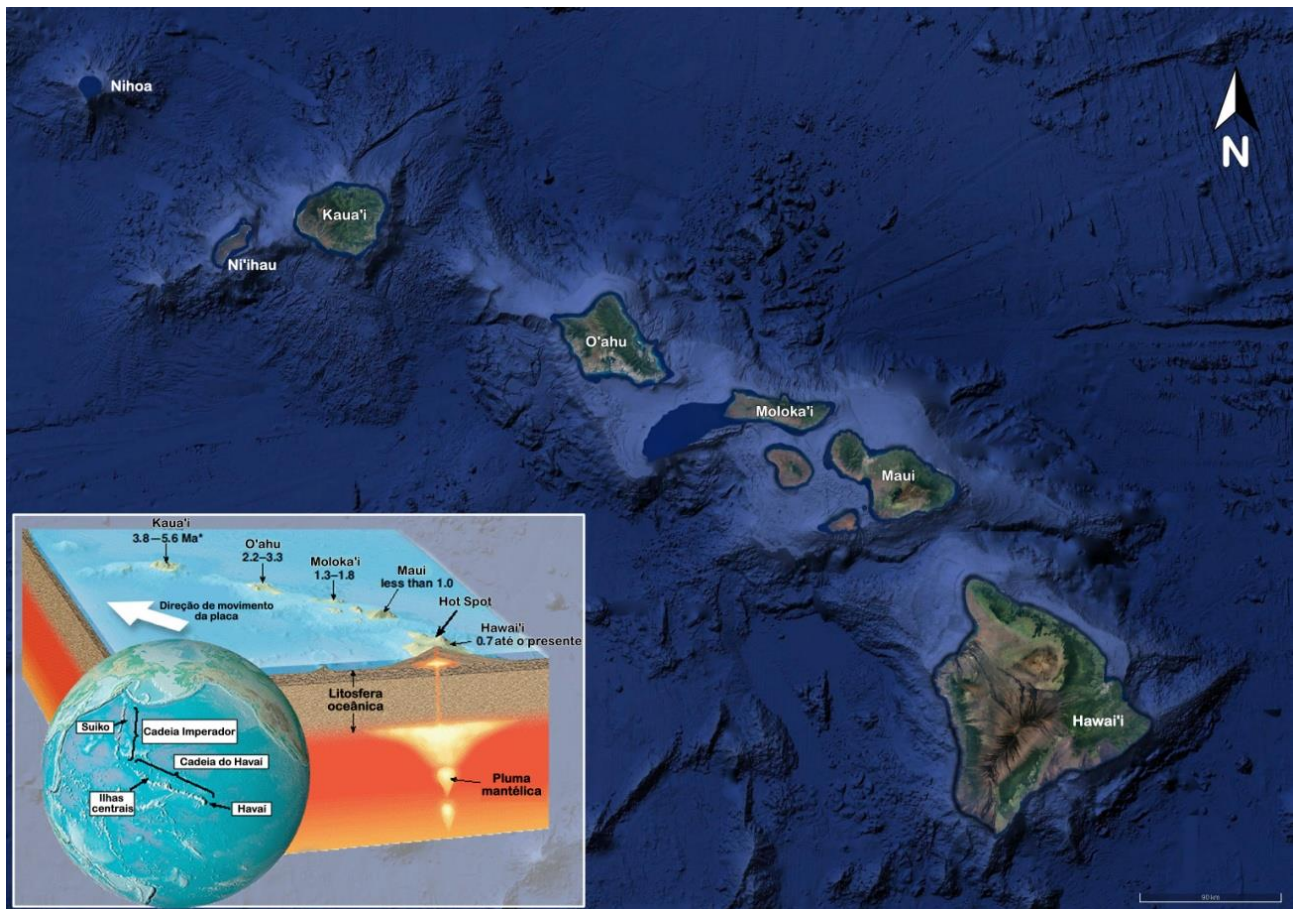


Figura 1: Alinhamento das ilhas vulcânicas do arquipélago do Havaí, gerado pela passagem da crosta sobre um ponto quente e destaque para modelo geológico simplificado do arquipélago. (imagem de satélite Landsat - Google Earth Pro)

O primeiro trabalho inteiramente de cunho geológico realizado na ilha foi baseado em dados geomorfológicos, geoquímicos, petrográficos e análises de campo, trazendo luz aos estudos das rochas neste ponto isolado do país (Almeida, 1961). Justamente neste trabalho a ilha foi subdividida em cinco unidades geológicas, dado este utilizado até hoje como base dos estudos em Trindade. Estudos geocronológicos foram realizados nestas rochas na década de setenta através do método K-Ar (Cordani, 1970), sendo posteriormente revisado, em trabalho onde novos dados também foram obtidos através do método Ar-Ar (Pires et al., 2016). Diversos trabalhos foram publicados ao longo dos últimos anos abordando principalmente as características geoquímicas das rochas de Trindade (Santos et al., 2002; Santos & Marques, 2007; Bongioiolo et al., 2015). Outro assunto discutido na bibliografia sobre a ilha é a origem deste vulcanismo e descrição do

hotspot que o originou, abordando dados isotópicos e geoquímicos para corroborar as teorias (Gibson et al., 1995 e 1997; Marques et al., 1999; Fodor et al., 2000). Apesar de algumas proposições estratigráficas com base, principalmente, em aspectos de campos e morfológicos (Almeida, 1961), uma organização e descrição detalhada das sucessões e associações de fácies das unidades da ilha ainda são parte dos estudos que necessitam de atenção. A estratigrafia de depósitos vulcânicos difere em alguns pontos da clássica empregada para sedimentares; somente em depósitos vulcanoclásticos, exceto piroclásticos, pela semelhança deposicional com partículas sedimentares, utilize-se a descrição de fácies com critérios granulométricos adotados para as rochas sedimentares. No caso de depósitos piroclásticos a terminologia empregada principalmente para descrição do tamanho de partículas difere da usualmente utilizada para sedimentares. Esta abordagem descritiva é aplicada também para rochas coerentes (lavas maciças sem autobrecha). Portanto, dois tipos de depósitos, com fácies e associações de fácies distintas, podem ser descritos: efusivos (fluxos de lavas, domos e corpos intrusivos sin-vulcânicos) e/ou explosivas (depósitos de fluxo, tipo *surge* e de queda). No primeiro tipo de depósitos dominam texturas coerentes ou não-particuladas, embora condições vulcanoclásticas (autoclástica) possam ocorrer, enquanto que no segundo tipo de manifestação ocorre condição particulada (Sommer et al., 2003 modificado de Fisher, 1961 e Schmid, 1981) (Figura 2).

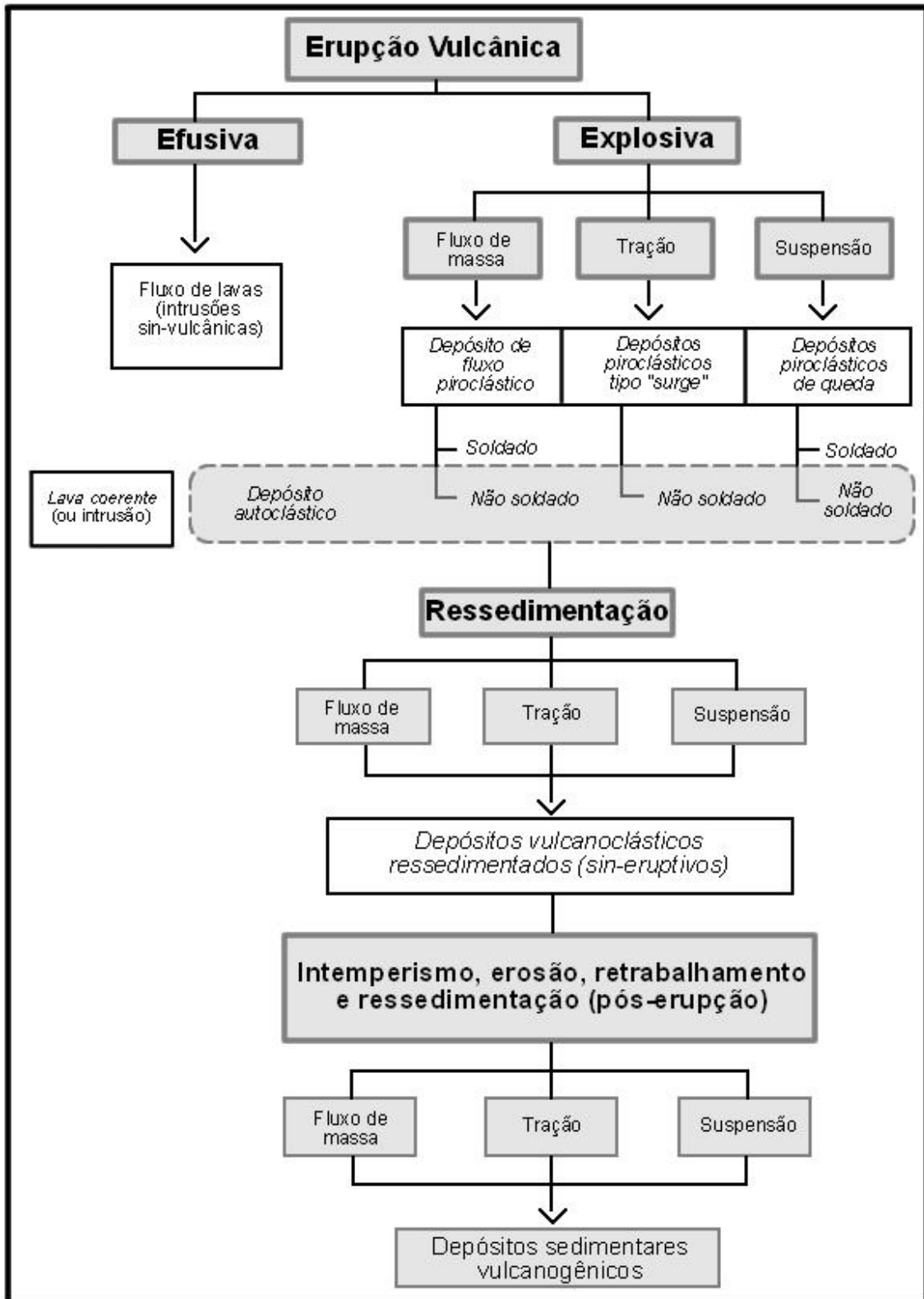


Figura 2: Classificação genética dos depósitos vulcânicos (Modificado de McPhie et al. 1993).

Estudos focados nestes aspectos vêm sendo desenvolvidos por grupo de pesquisadores do Instituto de Geociências (IGEO) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) com coordenação do Prof. Dr. Evandro Fernandes de Lima

e participação de profissionais das mais diversas áreas da Geologia como: estratigrafia, geofísica, vulcanologia e geoquímica. Além do presente trabalho, estudo semelhante foi realizado pelo grupo de pesquisas na última unidade formada na ilha, a Formação Vulcão do Paredão, cujos resultados serão expostos em breve na forma de um artigo e dissertação de mestrado (Pasqualon et al., em prep). Esta forma de abordagem estratigráfica será utilizada para todas as unidades componentes de Trindade, objetivando-se criar uma tabela de fácies e associações de fácies referência para ser utilizada em modelo geológico de formação para toda a ilha.

1.4 Contexto Geológico da área de estudo

A ilha da Trindade localiza-se à cerca de 1260 quilômetros a leste da costa brasileira, entre o paralelo 20° 29' e 20° 32' e o meridiano 29° 17' e 29° 21' W, nas coordenadas UTM 26K 257587 / 7728726, possuindo em torno de 6 quilômetros de comprimento por 2,5 quilômetros de largura (Figura 3). A orientação principal do edifício vulcânico é NW-SE, coincidente com a encontrada em diques e fraturas, fato que demonstra haver controle tectônico no magmatismo da ilha. A direção determinada para σ_1 é paralela ao eixo maior da ilha, sugerindo a vigência deste mesmo controle durante toda sua formação (Ferrari & Riccominni, 1999). Como descrito anteriormente (Seção 1.3), Trindade faz parte de um alinhamento de elevações vulcânicas (CVT) com origem relacionada à passagem da crosta oceânica sobre um *hotspot*. Estas estruturas possuem orientação leste-oeste, similar à zona de fratura que as limitam de ambos os lados, conhecida como Zona de Fratura Vitória-Trindade (ZFVT). Esta zona corresponde a um deslocamento axial em torno de 6 km, como uma descontinuidade de segunda ordem (Ferrari and Riccomini, 1999). A extensão da ZFVT para oeste corresponde justamente à Cadeia Vitória-Trindade, representada por altos topográficos individualizados com mais de 400 m. Esta região encontra-se cortada por inúmeros diques e sills, indicando instabilidade tectônica com a movimentação de falhas e ocorrência de transpressão, o que eleva o assoalho oceânico. Estes dados indicariam reativações recentes da crosta oceânica. Propõem-se, assim, que esta zona de fratura atuou, e atua, como conduto para o *hotspot* de Trindade (Alves, 2005). Com natureza alcalina, esta fonte anômala de temperatura gerou rochas vulcânicas e subvulcânicas, todas subsaturadas em sílica e representando termos alcalinos-sódicos. Trindade é subdividida em cinco

unidades geológicas, como também é citado na seção 1.3, sendo elas: Complexo Trindade (CT), Sequência Desejado (SD), Formação Morro Vermelho (FMV), Formação Valado (FV) e Formação Vulcão do Paredão (FVP) (Figura 7; Almeida, 1961). Datações radiométricas indicaram início de formação da ilha a cerca de 3.9 Ma, com último evento vulcânico possuindo idade inferior à 1 Ma (Cordani, 1970; Pires et al., 2016). O Complexo Trindade indicou idades entre 3.9 e 2.55 Ma, a Sequência Desejado entre 1.98 e 1.54 Ma, a Formação Morro Vermelho e a Formação Valado indicaram idades entre 1.18 e 1.11 Ma e a quinta e última unidade gerada, a Formação Vulcão do Paredão, indicou idades inferiores há 1 Ma.

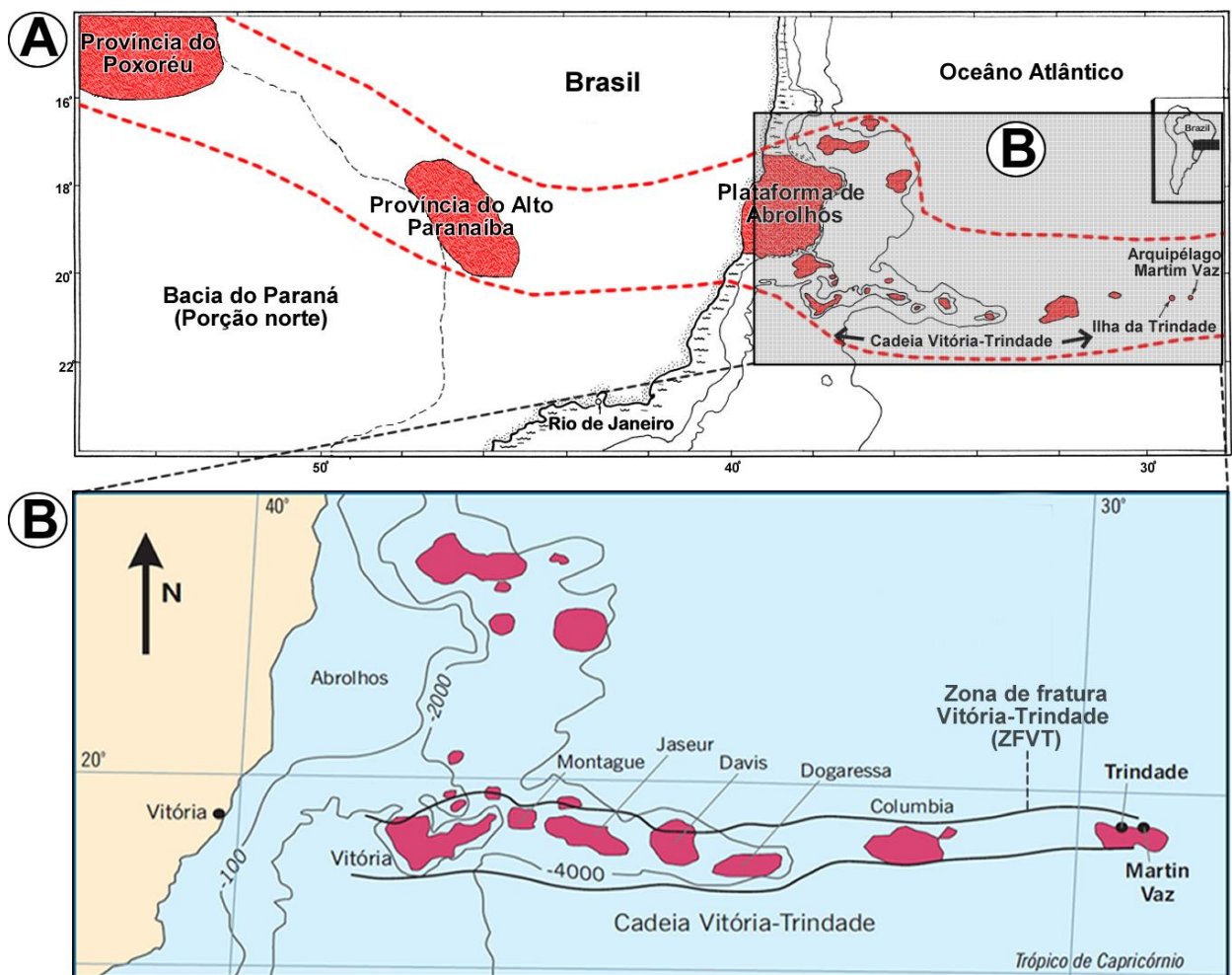


Figura 3: A - Destaque (pontilhado em vermelho) dos prováveis corpos vulcânicos e provável “caminho” deixado pelo *hotspot* de Trindade (modificado de Fodor, 2000); B – Detalhamento da Cadeia Vitória – Trindade inserida na Zona de Fratura Vitória Trindade (ZFT) (modificado de Almeida, 2006).

A primeira unidade, descrita como sendo o embasamento da ilha, foi nomeada como Complexo Trindade, e é a que conta com maior volume de rochas expostas na ilha. São depósitos piroclásticos, estratificados ou não, normalmente de composição tannbuschíticas, manifestações eruptivas e, na maioria, intrusivas,

cortados por inúmeros diques alimentadores desta unidade e provavelmente das mais recentes também. Os necks fonolíticos são as principais feições presentes nesta unidade, alguns chegando a atingir quase 700 metros de altura por 400 metros de diâmetro. Diques de rocha ultrabásica se destacam pela grande concentração em alguns pontos da ilha (NW principalmente). A Sequência Desejado é composta por sucessões de derrames de fonólito, grazinitos e nefelinitos intercalados com piroclastos de composições equivalentes, em sua maioria estratificados. Possui topografia de um planalto estrutural sustentado por camadas pouco inclinadas e pode ser descrito na porção central da ilha. Deste planalto erguem-se os maiores picos da ilha como, por exemplo, o Pico do Desejado. Esta unidade da ilha provavelmente foi formada por um vulcanismo misto, alternando momentos mais explosivos com episódios eruptivos onde dominaram lavas fluídas. Composta pela intercalação de derrames nefeliníticos e depósito piroclásticos gerados por vulcanismo monogenético, a FMV é composta por uma pilha vulcânica com aproximadamente 600 metros de espessura. Uma sequência de derrames aflora desde a base sequência estendendo-se até cerca de 240 metros de altitude. Estes derrames possuem, em média, 2m de espessura, sendo em sua totalidade do morfotipo *A'a'*, sendo caracterizados por textura fanerítica fina com presença de quantidades consideráveis de fenocristais. Acima e lateralmente aos depósitos efusivos afloram sequências piroclásticas que variam de brechas de material sin-vulcânico ressedimentado (relacionadas a deslizamentos) até lapilitos bem selecionados (relacionados a um vulcanismo explosivo) (Anexo V). A penúltima unidade formada, a Formação Valado, teria sido formada isocronicamente à FMV, ou em um curto espaço temporal subsequente. A FV também é composta pela intercalação de derrames com depósitos piroclásticos, porém possuindo composição tannbuschíticas. Ainda é possível reconhecer o cone vulcânico preservado, visto que esta formação é de fato recente, mostrando depósitos vulcânicos ainda inclinados conforme o ângulo inicial de deposição. Os piroclastos são em sua maioria achatados, mostrando que foram ejetados e depositados ainda em estado pastoso em um processo de *fire fountaining*, formando aglutinados. Os derrames, em sua maioria, apresentam morfologia do tipo *A'a'* e foram sendo emitidos em rápida sucessão pelo fato de não haver quantidades apreciáveis de material piroclástico entre eles. E finalmente, representando o final do vulcanismo ativo na ilha da Trindade, têm-se a formação do Vulcão do Paredão, unidade formada por atividade

explosiva com a geração de cone de escórias, e atividade efusiva com a formação de derrames nefeliníticos com morfologia final *A'a'* e termos morfológicos intermediários como é o caso do tipo *rubbly pahoehoe* (Figura 4).

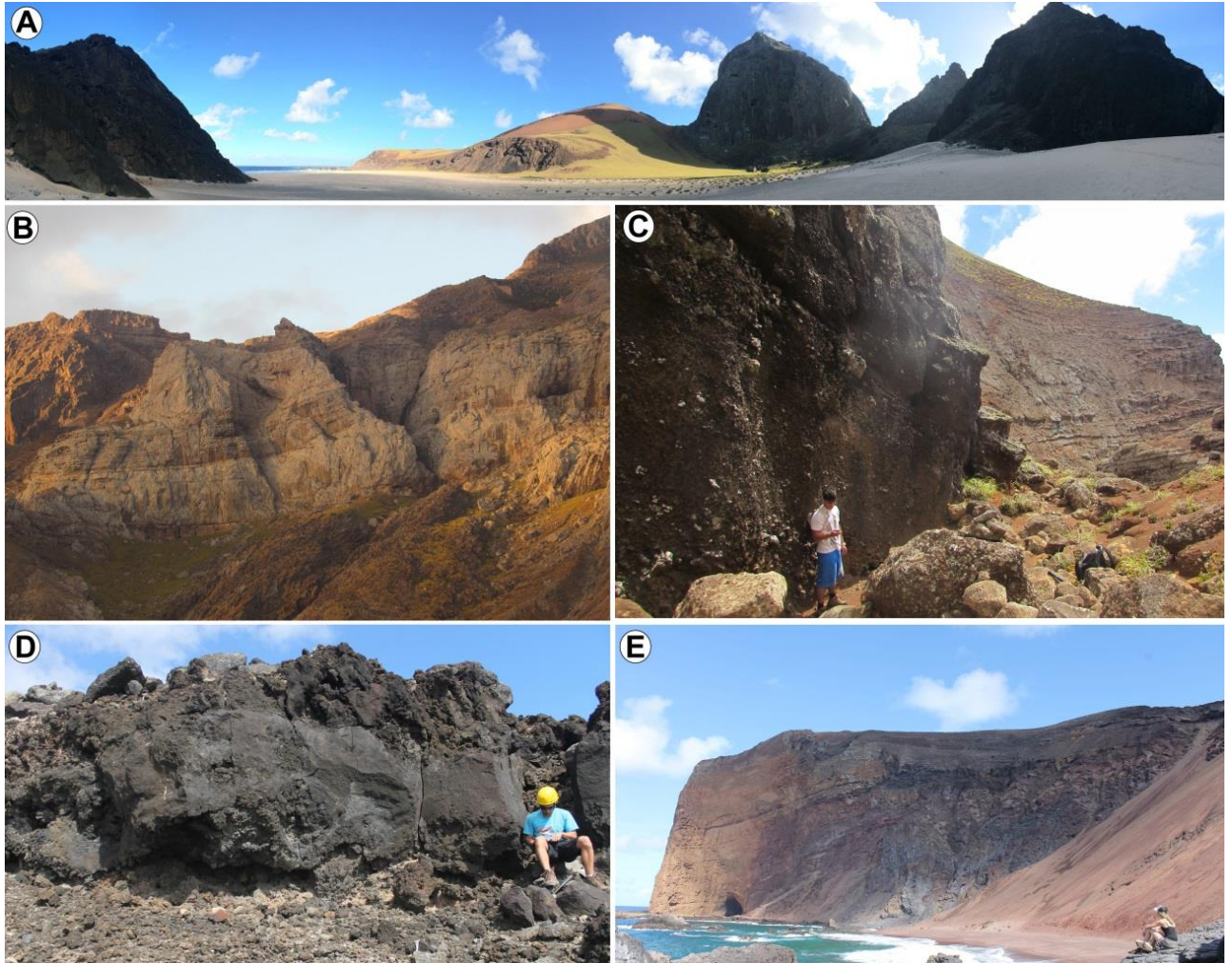


Figura 4: As principais feições geológicas das unidades que compõem a Ilha da Trindade. A – Complexo Trindade com destaque para necks fonolíticos vistos na Praia das Tartarugas; B – Sequência Desejado e suas camadas subhorizontais em planalto no centro da ilha; C – Formação Morro Vermelho e seus depósitos piroclásticos e porção do cone de escórias ao fundo; D – Formação Valado e seus derrames nefeliníticos com morfologia dominante *A'a'*; E – Formação Vulcão do Paredão e porção do seu cone de escórias ainda preservado no sul da ilha.

1.5 Generalidades

A ilha da Trindade (Figura 5) é tutelada, hoje, pela Marinha do Brasil, constituindo território nacional com grande importância estratégica para a organização econômica do Estado. Por estar a quase 1.300 km da costa brasileira, há um grande esforço conjunto entre universidades, entidades, governo e Marinha do Brasil para manter na ilha estudos nas mais diversas áreas bem como um

contingente de soldados e oficiais para garantir a soberania do estado nesta remota localidade com aproximadamente 13,5 km². Com isso, há garantia de exploração das 200 milhas marítimas circundantes a ilha e ao arquipélago. Datações radiométricas indicam idades de aproximadamente 3.69 Ma (Cordani, 1970) para a ilha. Trindade nada mais é do que o cimo erodido de um edifício vulcânico que se ergue do substrato marinho situado a pelo menos 5.500 m de profundidade. A ilha possui relevo bastante acidentado (altitude máxima de aproximadamente 650 m), com muitas ravinas, voçorocas e paredões subverticais. Este relevo é sustentado por inúmeros *plugs* e *necks* fonolíticos que atingem, em alguns casos, 500 m de altura por 400 m de diâmetro, como também alguns cones vulcânicos. A presença de escassa vegetação e predominância de clima seco auxiliam na conservação das unidades aflorantes, colaborando para que o trabalho seja realizado. A maioria dos afloramentos encontra-se com alteração incipiente a moderada, sendo os termos mais intemperizados relacionados às rochas vulcanoclásticas retrabalhadas, com granulação muito fina ou que se encontram à beira-mar, onde são continuamente retrabalhadas.

Além de sua importância do ponto de vista geológico, a ilha é também um laboratório a céu aberto para biólogos, geógrafos, meteorologistas dentre outros profissionais de diversas áreas de pesquisa. O histórico de Trindade mostra a sua importância tanto quando nos referimos à localização, como à diversidade e endemismo de algumas espécies que só lá existem, evidenciada pelas constantes invasões por outras nações:

- descobrimento em 1501 pelo navegador português João da Nova;
- "batizada" como Trindade em 1502 pelo navegador Estevão da Gama, em homenagem à Santíssima Trindade por conta de três elevações que se destacam no relevo;
- frequentemente confundida com Ascensão no século XVI, como visto em cartas e escritos da época, devido ao interesse britânico nas ilhas do Atlântico Sul;
- do século XVI ao XVII foi frequentada por traficantes de escravos e piratas ingleses, servindo como ponto de apoio marítimo;
- entre os séculos XVIII e XIX a ilha foi visitada por inúmeros navegadores, exploradores e naturalistas. Dentre estes, vale destacar o astrônomo Edmond Halley. Nesta mesma expedição foram inseridas cabras na ilha que devastaram cerca de 97% da cobertura de mata-atlântica existente na ilha. Posteriormente os

animais tiveram de ser abatidos para haver condições de fixar uma ocupação humana na ilha;

- em 1882 Trindade passa a fazer parte do território brasileiro;

- 1895: nova invasão britânica com a justificativa de estabelecer uma estação de cabo submarino. Por vias diplomáticas o Brasil retoma a posse da ilha, que é confirmada com a ida de um navio brasileiro e colocação de um marco de soberania com os dizeres: “O direito vence a força”.

- 1916 ocorre ocupação brasileira na ilha para impedir sua utilização por navios do eixo durante a 1ª Guerra Mundial. Durante a 2ª Guerra Mundial, é novamente guarnecida com o mesmo propósito;

- 1950: enviada uma expedição científica para planejar a ocupação permanente da Ilha e em 1957 é criado o POIT – “Posto Oceanográfico da Ilha da Trindade”. (extraído de <https://www.marinha.mil.br/secirm/protrindade>).



Figura 5: Vista NW da ilha da trindade. Destaque para o grande neck do Monumento, à direita.

PARTE II

2. Materiais e Métodos

Os métodos de abordagem foram escolhidos conforme o objetivo proposto para o estudo, com um enfoque nas características físicas dos depósitos para proposição de um modelo evolutivo do vulcanismo. Estas formas de abordagem foram subdivididas em 3 etapas: pré-campo, de campo e de laboratório/interpretação

2.1 Etapa Pré-Campo

Inserem-se nesta etapa a revisão bibliográfica, sensoriamento remoto e organização preliminar das prováveis áreas para estudo com base em dados secundários.

2.1.1 Revisão bibliográfica

Compilação de dados disponíveis na literatura (artigos, periódicos, publicações, livros, etc) sobre a área de estudo, análogos e assuntos relacionados ao tema. Tal procedimento possibilita realizar comparações prévias entre feições e estruturas, suprimindo informações sobre quais objetivos necessitam ser alcançados e também métodos que podem ser utilizados para tal. Além disso, ajuda a definir qual a melhor escala de trabalho, visto que métodos utilizados em áreas análogas podem sugerir qual o melhor dimensionamento escolher. A busca por novos métodos e tendências interpretativas e formas de exposição dos dados é parte importante, pois permite a divulgação posterior dos resultados em uma linguagem universal e de fácil entendimento pelo universo acadêmico, por profissionais das mais diversas áreas da geociências, entre outros. O *background* informativo gerado quando este passo da pesquisa é bem feito fornece uma enorme gama de dados e permite que eventuais dúvidas ou proposições possam ser rapidamente acessadas.

2.1.2 Sensoriamento remoto

Foram utilizadas imagens de satélite Landsat TM, cedidas pelo Centro de Estudos e Pesquisa em Sensoriamento Remoto e Meteorologia da UFRGS. Para tal, utilizou-se estereoscópio de espelhos para interpretação de um par de estereogramas. Esta técnica possibilita que o usuário visualize o terreno em uma

perspectiva em três dimensões (3D) do relevo a ser percorrido. Alguns resultados advindos deste tipo de análise inicial permitiram uma melhor organização da etapa de campo, ao passo que possibilitaram identificar prováveis afloramentos, contatos entre diferentes litologias e unidades geológicas, apontar estradas, trilhas ou caminhos. Outras ferramentas de sensoriamento remoto utilizadas foram *softwares* específicos como, por exemplo, o Google Earth Pro e ArcGis. A partir do primeiro foi possível obter acesso gratuito a imagens de satélite atualizadas e com ótima resolução das áreas de interesse. O uso do programa ArcGis (ESRI), da plataforma SIG, além de permitir visualizar e adicionar imagens de satélite georreferenciadas, entrega ferramentas que permitiram a elaboração de mapas temáticos tanto da área de interesse para o presente trabalho, como para toda a ilha. Além disso, o programa permite adicionar imagens, fotos, descrições, e qualquer informação adicional a pontos específicos marcados nos mapas, possibilitando assim uma interação e abordagem dinâmica e bastante ilustrada dos pontos de interesse.

2.2 Etapa de campo

Etapa de aquisição dos dados na área de interesse para o estudo. Procedeu-se o dimensionamento da área, a descrição detalhada dos afloramentos com separação das fácies em uma tabela específica, a confecção de croquis esquemáticos e perfis colunares e coleta de amostras para as várias formas de análise. O presente trabalho foi desenvolvido com a realização de quatro etapas de campo, ao longo de 4 anos de pesquisas.

2.2.1 Dimensionamento da área

A área referente à terceira unidade geológica da ilha (Formação Morro Vermelho) foi o primeiro passo a ser estudado no presente trabalho, definindo-se corretamente seus limites para um estudo bem dirigido. Apesar do estudo ser baseado em mapa geológico muito fidedigno (Figura 7; Almeida, 1961), o detalhamento e fixação dos pontos referentes aos limites da unidade e contatos entre litologias, através do uso de GPS de mão, foi etapa de suma importância para focar o estudo apenas em áreas de real interesse. Após a definição da área recoberta pelos depósitos da Formação Morro Vermelho, foi definida qual seria a mais coerente escala de trabalho para o estudo e conforme a proposição inicial de

objetivo para o estudo. Com o desenvolvimento dos trabalhos, foi possível atualizar o mapa geológico existente (Anexo VI), propondo-se novas áreas em que os produtos gerados na unidade em questão foram depositados.

2.2.2 *Descrição detalhada das litofácies*

Litofácia é a descrição de todas as características litológicas de um determinado corpo rochoso quanto às suas características morfológicas, texturais, estruturais e composição química. Foram analisados os formatos dos diferentes pacotes rochosos (camadas tabulares, lentes, blocos, camadas onduladas, irregulares, etc), descrevendo suas dimensões e formas de contatos com os pacotes adjacentes. Os constituintes destes produtos vulcânicos também foram analisados em detalhe, com uma descrição criteriosa sobre o formatos, mineralogia, características particulares à produtos efusivos e/ou explosivos, etc. O método escolhido para basear as descrições e apresentação das diferentes litofácies encontradas na FMV foi o proposto por Andrew D. Miall em 1977 e amplamente utilizado em estratigrafia de rochas vulcânicas (Jerram, 2002, Farrel, 2010, Waichel et al., 2012, Rossetti et al., 2014), onde utilizam-se letras maiúsculas para referenciar a rocha quanto a sua granulometria e letras minúsculas que indicam as principais estruturas encontrada. Ex: LTm – “LT” significa a granulometria de um Lápili – Tufo, já a letra minúscula “m”, neste exemplo, indica uma estruturação maciça da rocha. Com base nestes preceitos, foram descritas 7 litofácies nos depósitos vulcânicos da Formação Morro Vermelho (Anexo VII)

2.2.3 *Confecção de croquis e perfis colunares*

Croquis esquemáticos possibilitaram uma visualização do aspecto geral dos afloramentos, permitindo a interpretação de suas principais estruturas e proposição de eventuais formas de *emplacement*, interações entre diferentes pacotes de rocha, fraturas, entre outros. Aliado à esta ferramenta de campo e às descrições das litofácies, a confecção de seções colunares (Figura 6) permitiram a análise do conjunto completo, ou quase completo, da pilha vulcânica formada na unidade. O uso desta técnica, amplamente utilizada no estudo de depósitos sedimentares,

possibilitou a interpretação dos depósitos de uma forma mais ampla, dando-nos clareza para apontar formas de deposição, estilos eruptivos (e mudanças nestes) durante a evolução do vulcanismo nesta unidade.

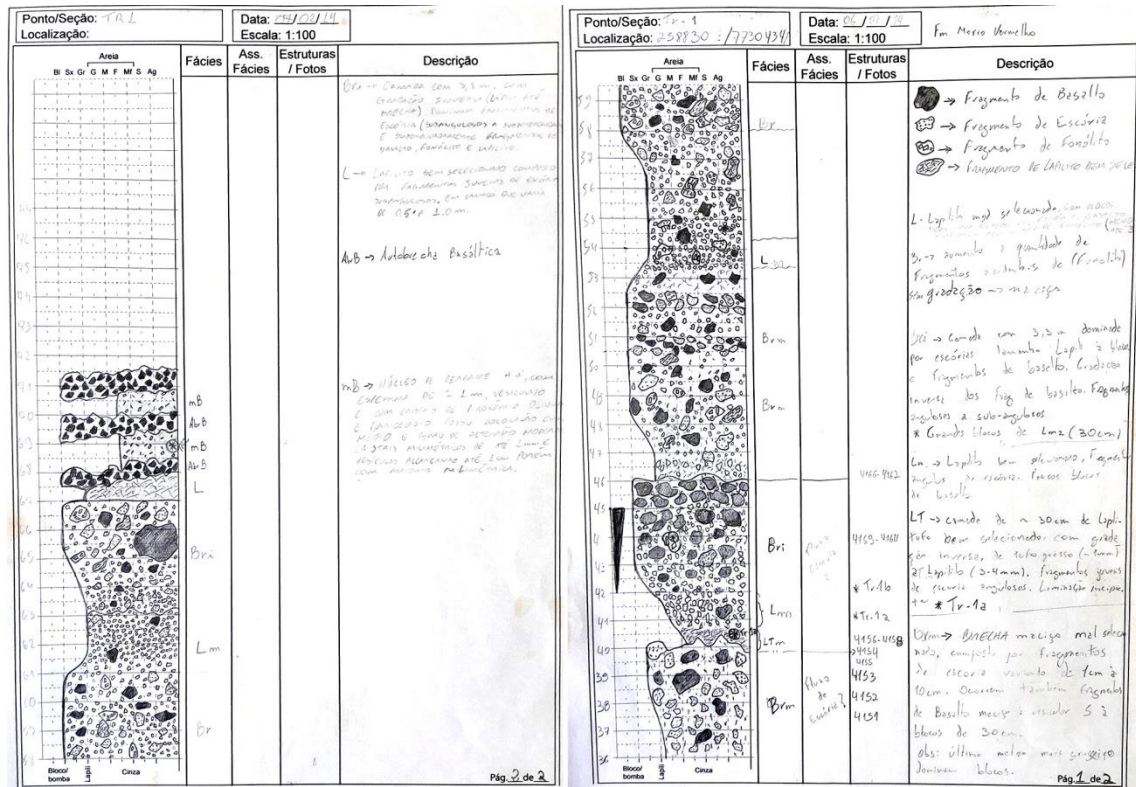


Figura 6: Seções colunares confeccionadas em depósitos relacionadas à movimentos de massa da Formação Morro Vermelho, sem nenhuma forma de tratamento em programa de vetorização.

2.2.4 Amostragem

Neste trabalho objetivou-se coletar amostras para descrições macroscópicas e também para confecção de lâminas delgadas. Procedeu-se aquisição de amostras de rocha de todas as litofácies descritas, gerando assim um banco de dados completo e que permitiu ilustração de todos os detalhes e características reconhecidas e descritas nos 7 diferentes depósitos da unidade.

2.3 Etapa de laboratório

O tratamento e interpretação dos dados obtidos nas etapas anteriores da pesquisa foram realizadas em laboratórios da Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, entre eles o de microscopia

ótica e de sensoriamento remoto. Objetivou-se analisar de forma criteriosa todas as amostras coletadas em campo bem como desenvolver discussões acerca de conclusões e dúvidas surgidas durante as campanhas de coleta e pesquisa na ilha. Nesta etapa os principais resultados foram advindos da análise dos dados de geoprocessamento e descrições macroscópicas e petrográficas completas.

2.3.1 Geoprocessamento

Com as etapas de coleta em campo concluídas, foi possível adicionar ao mapa geológico base (Figura 7) da ilha todos os dados obtidos, como: pontos de descrição de afloramentos e coleta de amostras, localização de diques alimentadores, contato entre diferentes unidades, contatos entre litologias distintas, entre outros. Com isso, foi possível gerar um banco de dados completo e que permitiu atualizar alguns pontos do mapa geológico da ilha.

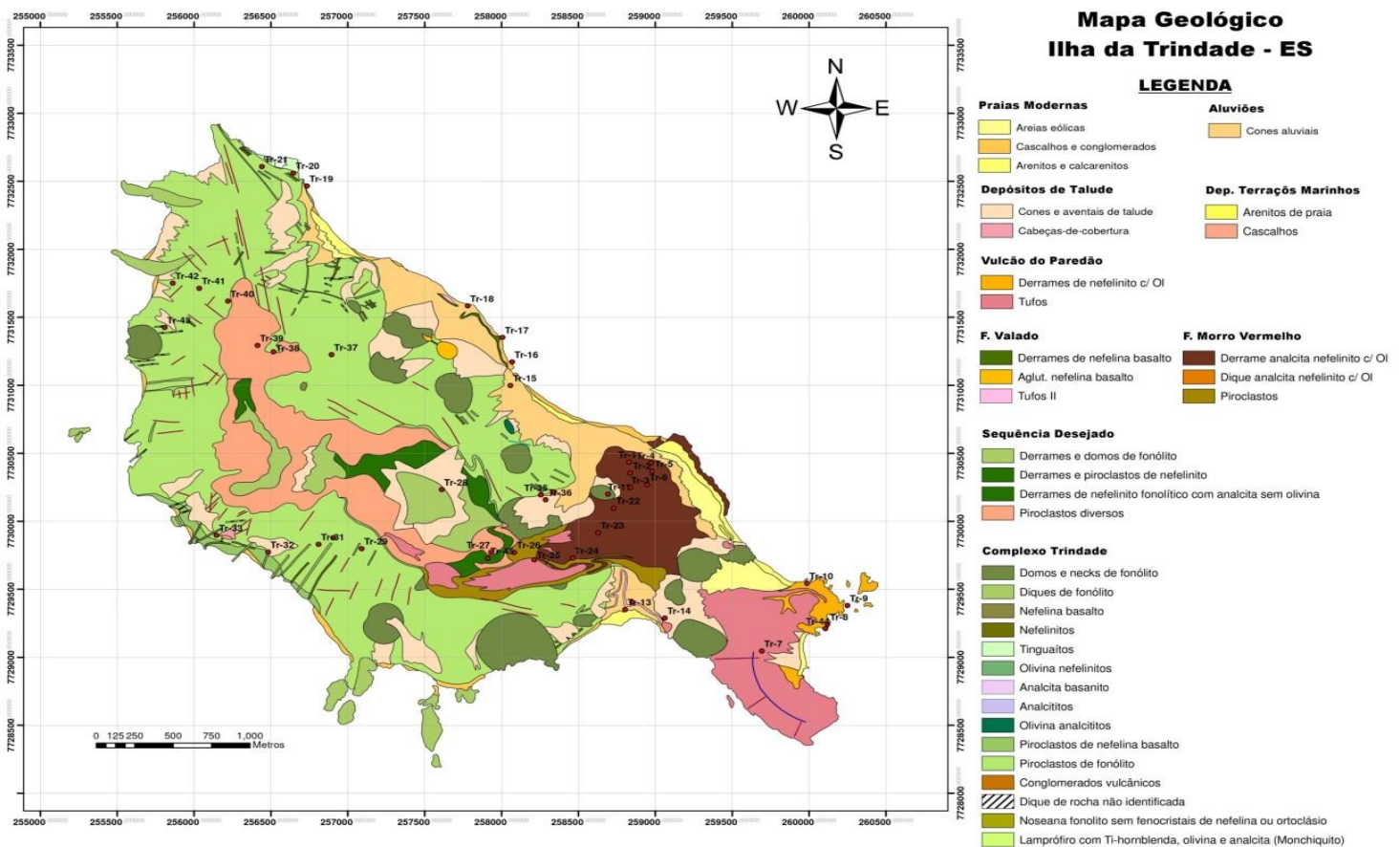


Figura 7: Mapa geológico base da ilha da Trindade com separação das unidades geológicas. (Extraído e modificado de Almeida, 1961).

2.3.2 Descrições petrográficas

Todas as litofácies descritas para unidade foram caracterizadas petrograficamente. Tanto as manifestações efusivas (texturas, estruturas, mineralogia, etc) e vulcanoclásticas (tipos e composição de clastos, esfericidade, arredondamento, seleção granulométrica) forneceram informações preciosas para o entendimento das formas com que o vulcanismo da FMV as gerou. As diferenças entre os produtos gerados em formas eruptivas distintas, como o caso dos estilos Havaiano e Estromboliano, podem ser reconhecidas em lâminas delgadas assim como em amostras macroscópicas. Algumas características, como por exemplo, o grau de fragmentação do sistema são traduzidas no tipo de material depositado e por vezes é de difícil separação em campo. Em análise petrográfica esta característica pode ser analisada de forma mais clara, sendo de grande utilidade para proposição do modelo evolutivo. Para estas análises foi utilizado microscópio de luz transmitida da marca *Leitz*[®] modelo Laborlux de 12 polegadas com uma

câmera de marca *Scion Corporation*[®] modelo cfw-1612c acoplada para aquisição de fotomicrografias (Figura 8). Para uma organização correta das descrições foi utilizado o software *Hardledge*[®], da empresa *ENDEEPER*[®].

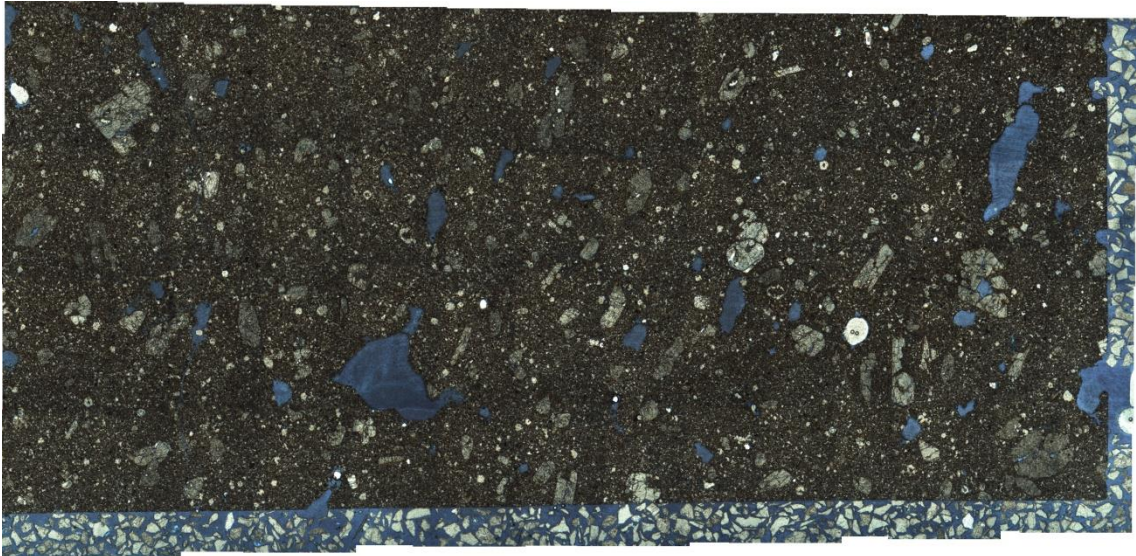


Figura 8: Composição de fotos de detalhe formando uma lâmina inteira (4.5x2.5 cm). Na foto detalha-se o núcleo de um derrame de nefelinito composta por fenocristais de olivina emersos em uma matriz fanerítica fina e presença de vesículas. Nota-se orientação dos fenocristais e estiramento das vesículas segundo o fluxo do derrame.

Referências

- Almeida F. F. M. de. (1961). *Geologia e Petrologia da Ilha da Trindade*. Rio de Janeiro, DGM/DNPM. 206p. (Monografia XVIII).
- Almeida, F. F. M. de. (2006). *Ilhas oceânicas brasileiras e suas relações com a tectônica atlântica*. *Terræ Didactica*, 2(1): 3-18
- Alves E.C., Maia M., Sichel S.E., Campos C.M.P. (2005). *Zona de fratura Vitória-Trindade no oceano Atlântico Sudeste e suas implicações tectônicas*. *Revista Brasileira de Geofísica*, 24(1): 117-127
- Bongiolo, E.M.; Pires, G. L. C.; Geraldies, M. C.; Santos, A. C.; Neumann, R. (2015). *Geochemical Modeling and Nd-Sr data links nephelinite-phonolite successions and xenoliths of Trindade Island (South Atlantic Ocean, Brazil)*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 306: 58-73.
- Cordani, U. G. (1970). *Idade do vulcanismo do Oceano Atlântico Sul*. São Paulo: Instituto de Geociências e Astronomia, Boletim IGA, 1: 9-75
- Cordani, U. G., & Blazekovic, A. (1970). *Idades radiométricas das rochas 682 vulcânicas dos Abrolhos*. *Congresso Brasileiro de Geologia*, 24: 265-270.

- Farrell, R. E. (2010). *Volcanic facies architecture of the Chilcotin Group basalts at Chasm Provincial Park, British Columbia*. Doctoral dissertation, University of British Columbia.
- Ferrari A.L., Riccomini C. (1999). *Campo de esforços Plio-Pleistocênico na Ilha da Trindade (Oceano Atlântico Sul, Brasil) e sua relação com a tectônica regional*. Revista Brasileira de Geociências 29(2): 195-202
- Fisher, R. V. 1961. *Proposed classification of volcanoclastic sediments and rocks*. Geological Society of America Bulletin, 72: 1409-1414.
- Fodor R.V., Hanan B.B. (2000). *Geochemical evidence for the Trindade hotspot trace: Columbia seamount ankaramite*. Lithos 51: 293-304.
- Gibson, S.A., Thompson, R.N., Leonardos, O.H., Dickin, A.P., Mitchell, J.C. 710 (1995). *The Late Cretaceous impact of the Trindade mantle plume: evidence from large-volume, mafic potassic magmatism in SE Brazil*. Journal of Petrology 36: 118-229
- Gibson, S.A., Thompson, R.N., Weska, R.K., Dickin, A.P., Leonardos, O.H. (1997). *Late Cretaceous rift-related upwelling and melting of the Trindade starting mantle plume head beneath western Brazil*. Contributions to Mineralogy and Petrology 126: 303-314.
- Jerram, D. A. (2002). *Volcanology and facies architecture of flood basalts*. Volcanic Rifted Margins, 362, 119.
- Marinha do Brasil – Secretaria da Comissão Interministerial para Recursos do Mar. Programa de Pesquisas na Ilha da Trindade (<https://www.marinha.mil.br/secirm/protrindade>)
- Marques, L. S.; Ulbrich, M. N. C.; Ruberti, E.; Tassinari, C. G. (1999). *Petrology, geochemistry and Sr-Nd isotopes of the Trindade and Martin Vaz volcanic rocks (Southern Atlantic Ocean)*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 93 (3-4): 191-216.
- McPhie, J., Doyle, M., Allen, R. (1993). *Volcanic Textures*. CODES, University of Tasmania, 190 pp.
- Pasqualon, N.G., Lima, E.F, Scherer, C.M.S., Luz, F.R., Rossetti, L.M.M. (in prep.). *Facies architecture and stratigraphic evolution of the Paredão Volcano, Trindade 755 Island, Brazil*.
- Pires, G. L. C., Bongioiolo, E. M., (2016). *The nephelinitic-phonolitic volcanism of the Trindade Island (South Atlantic Ocean): Review of the stratigraphy, and inferences on the volcanic styles and sources of nephelinites*. Journal of South American Earth Sciences. 72: 49-62.

Rossetti, L. M., Lima, E. F., Waichel, B. L., Scherer, C. M., & Barreto, C. J. (2014). *Stratigraphical framework of basaltic lavas in Torres Syncline main valley, southern Parana-Etendeka Volcanic Province*. *Journal of South American Earth Sciences*, 56: 409-421.

Santos, R. N., Marques, L. S., Ribeiro, F. B. (2002). *Determination of uranium concentrations and activity ratios in silicates by alpha spectrometry: application to the volcanic rocks from the Trindade and Martin Vaz Islands (Brazil)*. *Applied Radiation and Isotopes*, 56: 741-750.

Santos, R. N., Marques, L. M. (2007). *Investigation of ^{238}U - ^{230}Th - ^{226}Ra and ^{232}Th - ^{228}Ra - ^{228}Th radioactive disequilibria in volcanic rocks from Trindade and Martin Vaz Islands (Brazil; Southern Atlantic Ocean)*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 161 (3): 215-233.

Schmid, R. (1981). *Descriptive nomenclature and classification of pyroclastic deposits and fragments: Recommendations of the IUGS Subcommision on the Systematics of Igneous Rocks*. *Geology*, 9: 41- 43.

Sommer, C.A., Lima, E.F., Nardi, L.V.S., Liz, J.D., Pierosan, R. (2003). *Depósitos de Fluxo Piroclástico Primários: Caracterização e Estudo de um Caso no Vulcanismo Ácido Neoproterozóico do Escudo Sul-rio-grandense*. Instituto de Geociências, UFRGS. *Pesquisas em Geociências*. 30(1): 3-26

Waichel, B. L., de Lima, E. F., Viana, A. R., Scherer, C. M., Bueno, G. V., & Dutra, G. (2012). *Stratigraphy and volcanic facies architecture of the Torres Syncline, Southern Brazil, and its role in understanding the Paraná–Etendeka Continental Flood Basalt Province*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 215: 74-788 82.

Wilson, J. Tuzo (1963). *"A Possible Origin of the Hawaiian Islands"*. *Canadian Journal of Physics*. 41 (6): 863–870.

VanDecar, J. C. E., James, D. E., Assumpção, M. (1995). *Seismic evidence for a fossil mantle plume beneath South America and implications for plate driving forces*. *Nature* 378: 25-31

Parte III

3. Artigo Científico submetido

Os resultados do presente trabalho também foram apresentados na forma de um artigo científico submetido para a revista científica “Journal of Volcanology and Geothermal Research”. O documento submetido apresenta o título “*Stratigraphic Analysis of the volcanic deposits of the Morro Vermelho Formation, Trindade Island, Brazil*”, contém 7.668 palavras divididas em um total de 32 páginas com 01 tabela e 11 figuras ilustrativas e está anexado nesta seção da dissertação. O manuscrito foi submetido no dia 19-01/2019 através de portal eletrônico e o detalhamento desta submissão encontra-se recortado abaixo:



The screenshot shows a web browser window with the URL https://www.evise.com/evise/faces/pages/mlanding/MsLanding.jspx?_adf.ctrl-state=makwyusy_52. The page is for the 'Journal of volcanology and geothermal research' and features a navigation bar with 'Home' and 'Reports'. The main content area displays the article title 'Stratigraphic Analysis of the volcanic deposits of the Morro Vermelho Formation, Trindade Island, Brazil' by Fernando Rodrigues da Luz, with a status of 'With Editor (0 days)' and a submission date of '19/Jan/2019'. There are links for 'PDF' and 'Zip File'. Below the article information, there is an 'Overview' tab and a 'Files' icon. The 'Other Authors' section lists Lucas Rossetti, EVANDRO LIMA, Marcos de Magalhães May Rossetti, Natália Gauer Pasqualon, and claiton marlon santos scherer. The 'Abstract' section describes the Morro Vermelho Formation and its volcanic activity. The 'Keywords' section lists 'Volcanism; Oceanic island; Strombolian; Hawaiian; Stratigraphy.' There is also a 'Contact Editorial Team' link.

Figura 9: Página de consulta ao artigo submetido no site da Evise, ferramenta criada pela empresa Elsevier para normatizar a submissão de artigos para revistas científicas.

O manuscrito do artigo científico encontra-se inserido neste texto a partir da página seguinte, correspondendo à principal parte do corpo desta dissertação.

Stratigraphic Analysis of the volcanic deposits of the Morro Vermelho Formation, Trindade Island, Brazil

Fernando R. da Luz^{1*}, Lucas M.M. Rossetti¹, Evandro F. de Lima¹, Marcos M. Rossetti², Natália G. Pasqualon¹, Claiton M. Scherer¹

*Corresponding author E-mail: geologofernandodaluz@hotmail.com

¹. Federal University of Rio Grande do Sul, Geosciences institute, Campus do Vale, Av. Bento Gonçalves, 9500, CEP 91501-970, Porto Alegre, RS, Brazil.

². University of Canterbury, Christchurch City, New Zealand.

Abstract

The Morro Vermelho Formation, located in the eastern slope of Trindade Island, Brazil, represents the Pleistocene volcanic activity in the island, in which is possible to identify the intercalation between nephelintic lavas and pyroclastic deposits generated by a single and continuous volcanic manifestation. Its deposits occur from the coast to ~600 meters of altitude, exposing at least two distinct types of products related to different eruptive styles, which were studied based on a detailed stratigraphic analyze. A succession of about ~240 meters thick formed by 'A'a lavas appears at the base of the sequence, covered by pyroclastic deposits. Outcrops composed of breccias grading upwards to well-sorted lapillistones are described and related to the reworking (syn-eruptive) events of volcanic material. The identification of these deposits and the detailed facies analysis allowed the evaluation of the evolution of this unit, revealing Hawaiian and Strombolian activity. The intercalation, even though rare, between effusive and explosive deposits described in this unit demonstrates that there may be an alternation between the two eruptive styles, and the transitions from one to another can happen naturally and rapidly.

Keywords: Volcanism, Oceanic island, Strombolian, Hawaiian, Stratigraphy

1. Introduction

The Trindade Island records the last magmatic pulses associated with the Trindade Hotspot, during the Pliocene – Holocene. The Island preserves alkaline volcanic rocks formed between 3.9 Ma and ~1 Ma. Several studies have already been carried out in Trindade, mainly approaching its geochemical and geochronological characteristics, but also covering the geomorphology and petrographic features of the deposits (Almeida, 1961 and 1992; Cordani and Blazecovic, 1970; Ferrari et al., 1999; Pires et al., 2016). The present work used a geological model including the faciologic characterization, stratigraphic organization and reconstitution of the volcanic processes to explain a monogenetic eruption of Morro Vermelho Formation.

Monogenetic volcanoes are formed during a single eruption (Connor & Conway, 2000), and may present one or more eruptive styles in their evolutionary history (Kshirsagar et al., 2015, Chevrel et al., 2016), being Hawaiian and Strombolian the most common. There are indications that even in the case of a single volcanic event, composition changes may occur in the generated materials, suggesting that magmatic processes occur at the mantle and crustal levels (Németh et al., 2003; McGee and Smith 2016). These eruptions can last for a few days, years and even millions of years, contrary to what was previously believed, and may have their origin in the most diverse geological environments (Cas and Wright 1988; Németh 2010). Therefore, the study of the generated deposits is of paramount importance for understanding the factors and characteristics that guide this type of volcanic event.

The MVF is well exposed from the eastern to the central portion of the island comprising a volcanic pile of approximately 600 m. In this study, the deposits of this unit were analyzed at outcrop scale by the recognition and hierarchy of the different lithofacies and their associations. Applying this methodology it was possible to understand the succession of the deposits and generate an eruptive model for the volcanism (Williams et al., 1979; Fisher and Schmincke, 1984; Martí et al., 1994; Zanon et al., 2009; Palladino et al., 2010; Pasqualon et al., *in prep*). The results provide a correct reading of the ephemeral volcanism of this unit, the eruption behaviour, its physical characteristics, interactions between different volcanic products, and also allowed to analyze the eruptive style. The stratigraphic work together with petrographic analyzes allowed not only to frame the formation of the island within models already widely discussed in the literature but also to rediscover and improve them.

2. Geological Settings

Trindade is located approximately 1260 km from the city of Vitória (20° 29' to 20° 32'S, 29° 17' to 29° 21' W), capital of the state of Espírito Santo, Brazil (Figure 1A). The island covers an area of around 13.5 km², and, together with the archipelago of Martin Vaz, represents the easternmost part of the Brazilian territory and the extreme point of the Vitória – Trindade Ridge (VTR). The VTR is a W-E alignment of at least 11 volcanic elevations, submarine hills and *guyots* (Figure 1B) associated to the Vitória - Trindade Fracture Zone - VTFZ, an axial displacement of ~ 6 km (as a second order discontinuity) cut by dikes and sills, indicating tectonic instability with the movement of faults and occurrence of transpression, which elevates the ocean floor. The genesis of the island is related to the movement of the oceanic crust over the Trindade hotspot and reactivation of this fracture zone (Ferrari and Riccomini, 1999).

The ages for the Vitória-Trindade Ridge vary from ~ 43.5 Ma in the Abrolhos Platform, to the beginning of the formation of the Island, at ~ 3.9 Ma (Cordani and Blazekovic, 1970; Pires et al., 2016). Trindade is today the eroded top of a volcanic edifice rising from the marine substrate at around 5,500 m depth. The island is geologically heterogeneous, has a fairly rugged relief with a maximum altitude of ~ 650 m and occurrence of innumerable gulleys, land slides and subvertical walls. The relief is supported by many phonolithic plugs and necks that reach large dimensions, reaching in some cases 500 m high by 400 m in diameter, as well as by some volcanic cones.

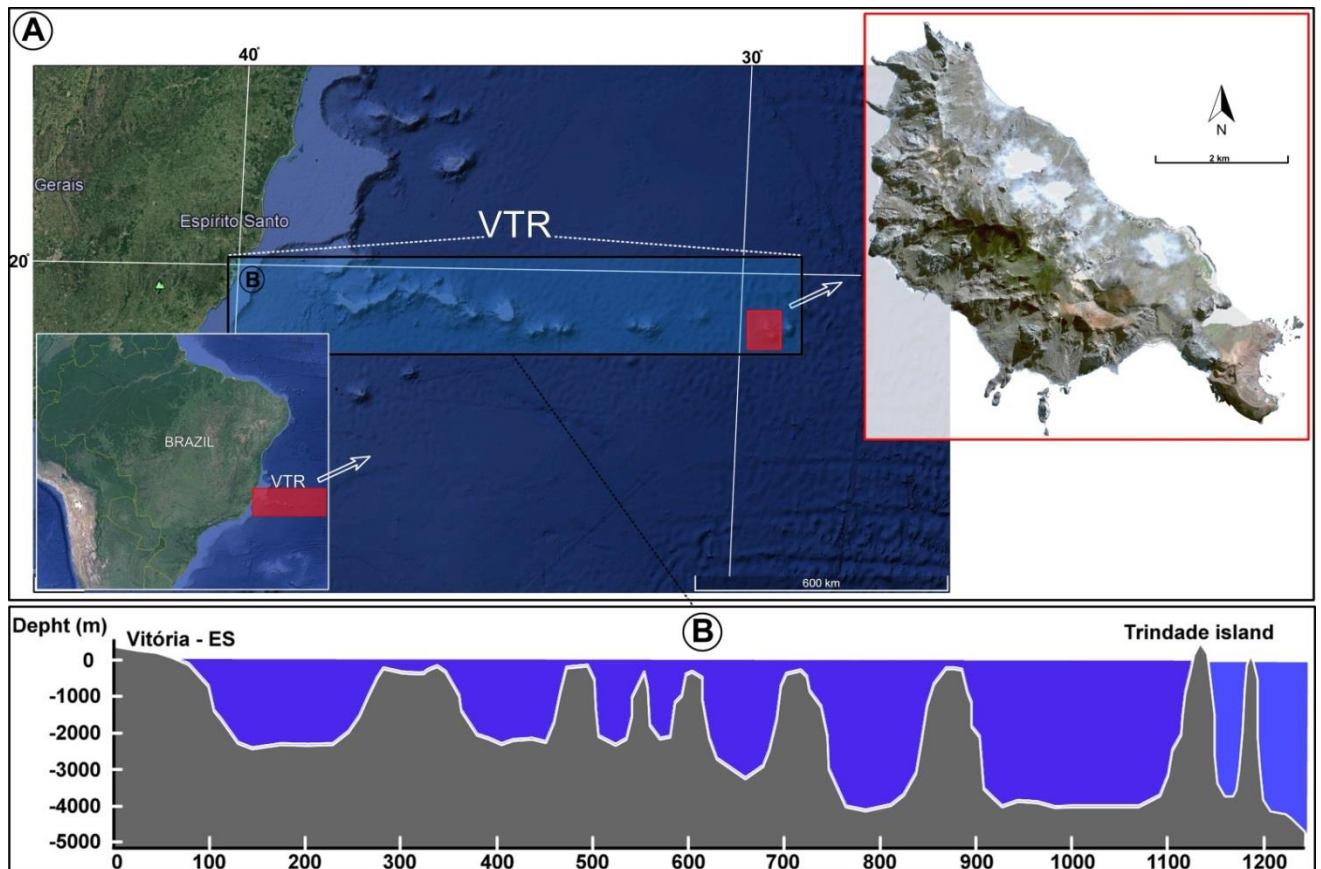


FIGURE 1 - Trindade Island location (A) and detail of the VTR with its volcanic elevations (B) (modified from Alves et al., 1998 and Almeida, 2006)

The hotspots theory was first disclosed by Wilson (1963), who used the Hawaiian Islands to exemplify his theory postulating that the passage of the crust over a zone of a very high anomalous mantle temperature could generate an alignment of volcanic bodies, leaving the path travelled by the plate marked. Herz (1977) suggested that the alkaline and carbonate provinces of southeastern Brazil would have been developed during the westward drift of the South American plate over the hotspot known as the Trindade hotspot. Gibson et al., (1995 and 1997) interpreted the mafic potassic rocks of the igneous province of Poxoréu (estate of Goiás - Brazil) and the igneous province of Alto Paranaíba (estate of Minas Gerais - Brazil) as related to the impact of the hotspot in the continental areas in the Upper Cretaceous (Figure 2).

The onset of the Vitória-Trindade ridge is associated to the genesis of the Abrolhos platform, in the state of Bahia, through the impact of the same hotspot in the oceanic crust at 50 – 40 Ma (Cordani and Blazekovic, 1970). There is a linkage of the magmatism present in the VTFZ and in the emerged portion of the Brazilian territory (provinces of Poxoréu and Alto Paranaíba), proposing that this fracture zone acted as a kind of conduit for the Trindade hotspot, facilitating the generation of subsurface and volcanic processes

(Alves, 2005). This hotspot would have extinguished its activity just where today is the island of Trindade and the Archipelago of Martim Vaz, in the eastern end of the volcanic ridge, dated to approximately 3.9 Ma.

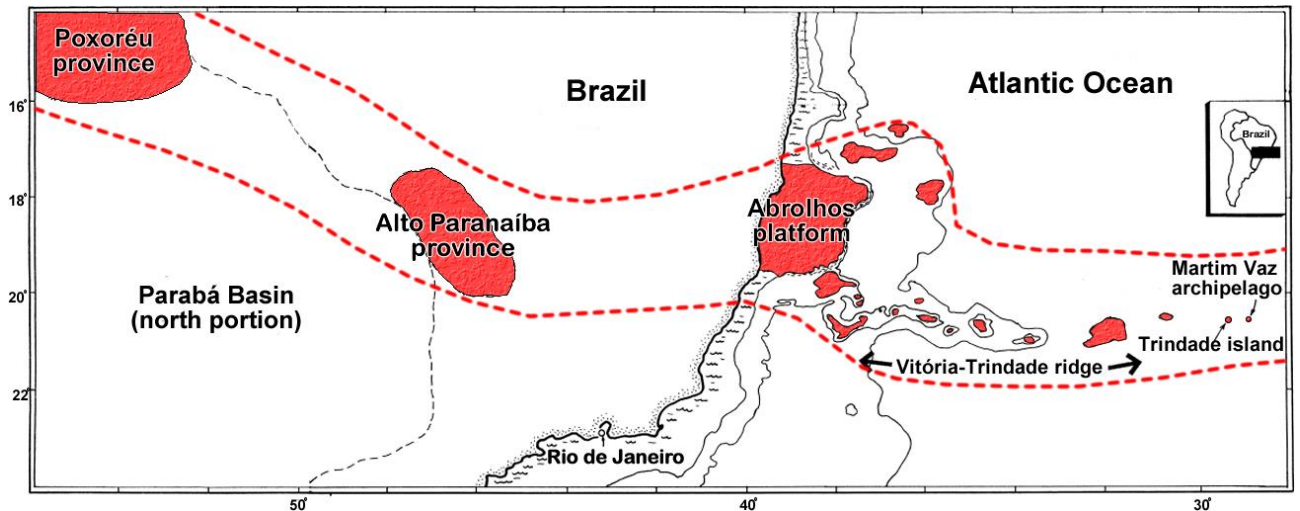


FIGURE 2 - Highlight (red) the volcanic manifestations related to the “Trindade Hotspot” (modified from Fodor, 1999).

Trindade Island is about 6 km long and 2.5 km wide. It has NW-SE orientation, coinciding with dykes and fractures, evidencing tectonic control in the island magmatism. Representing sodic-alkaline terms, Trindade comprises 5 distinct units (Almeida, 1961; Figure 3): Trindade Complex (TC), Desejado Sequence (DS), Morro Vermelho Formation (MVF), Valado Formation (VF), and Paredão Volcano Formation (PVF).

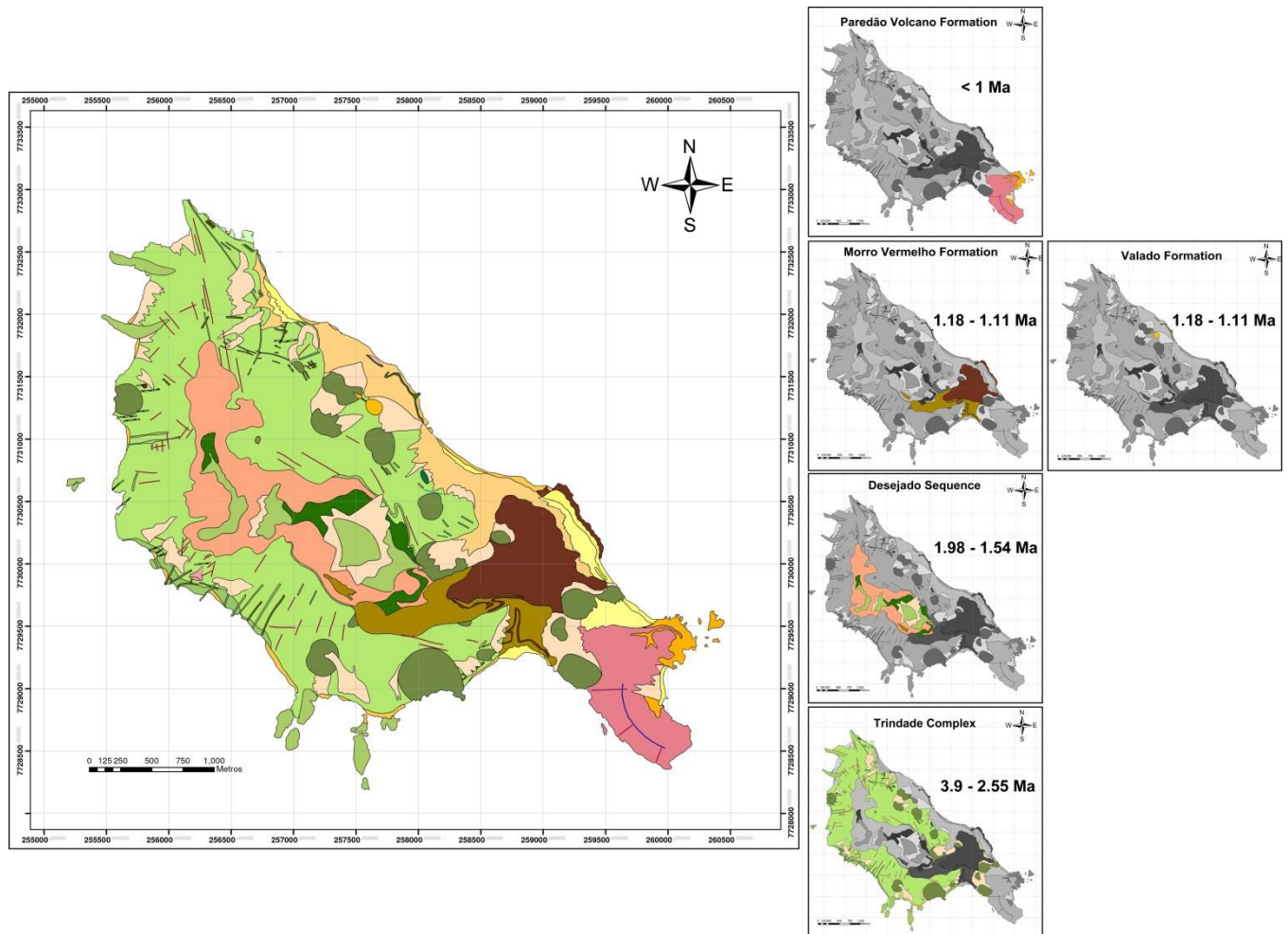


FIGURE 3 - Detail of the five geological units that make up the island with their respective radiometric dating (modified from Almeida, 1961)

Absolute ages were firstly obtained by Cordani (1970) through the K-Ar method and recently reviewed by Pires (2016) using Ar-Ar, indicating that the island was formed between 3.9 Ma to <1 Ma. The first unit formed, the Trindade Complex - TC (Figure 4A) (3.9 – 2.55 Ma), is composed of pyroclasts, eruptive products and heterogeneous subvolcanic material (tannbuschite, phonolithic, nephelinitic) that make up the most significant volume of rocks generated in the island. This unit is accessible in almost the entire island, exposed from E-W and N-S. The most striking features of the are the large necks and phonolitic plugs that stand out in the relief of the island and have large columnar joints. In the rocks of this unit it is possible to identify numerous intrusions with different compositions, many of them related to younger units. The TC material is often reworked and intruded by numerous dykes with its outcrops exposed in inaccessible slopes, making the understanding of your stratigraphy a point to be explored. The second unit formed, the Desejado Sequence - DS (Figure 4B) (1.98 – 1.54 Ma), is a structural plateau located in the central portion of Trindade having thicknesses ranging from

approximately 200 to 400 meters. This unit is composed of a succession of lava flows interspersed with pyroclast rocks of phonolitic, grazinitic and nephelinitic compositions. Its most striking feature, and perhaps the most visited point on the island is the Desejado Peak, a large mound formed by the erosion of thick nephelinitic lava (~100 meters). The Valado Formation - VF (1.18 – 1.11 Ma) (Figure 4D), formed concomitantly with the Morro Vermelho Formation (Figure 4C) had its products limited to the small stretch of the eastern portion of the island with approximately 400 meters of the coast and 200 meters of altitude. It is constituted of thick nephelinite lavas (tannbuschite) and pyroclastic deposits composed of clusters that occur in proximal portions of its eruptive centre. The lavas are all of the morphotype *A'a'*, having first resting angles and similar to those found in the relief formed by the rocks of the TC. The Morro Vermelho - MVF formation occupies an area in the center-south portion of the island, with deposits facing east. The volcanic pile of this unit is composed of a thick packet of nephelinitic lava of the morphotype *A'a'* covered by pyroclastic deposits, being the result of a monogenetic eruption. The last unit formed, the Paredao Volcano Formation - PVF (<1Ma) (Figure 4E), is located in the southeast of the island and constitutes one of the best preserved volcanic buildings in the Brazilian territory. It is also monogenetic volcanism, as mentioned for the MVF and VF, of Strombolian and Hawaiian nature, which generated nephelinitic lava flows of dominant *A'a'* morphology and constructed a scoria cone of more than 200 meters height. The nephelinitic lava flows are restricted to the east, forming a lava plateau where some natural pools were formed (Parcel das Tartarugas). Intercalated to the lavas, some rare levels of well-sorted lapillistone and lapilli-tuffs can be identified, demonstrating that the explosive and effusive events occurred concomitantly.

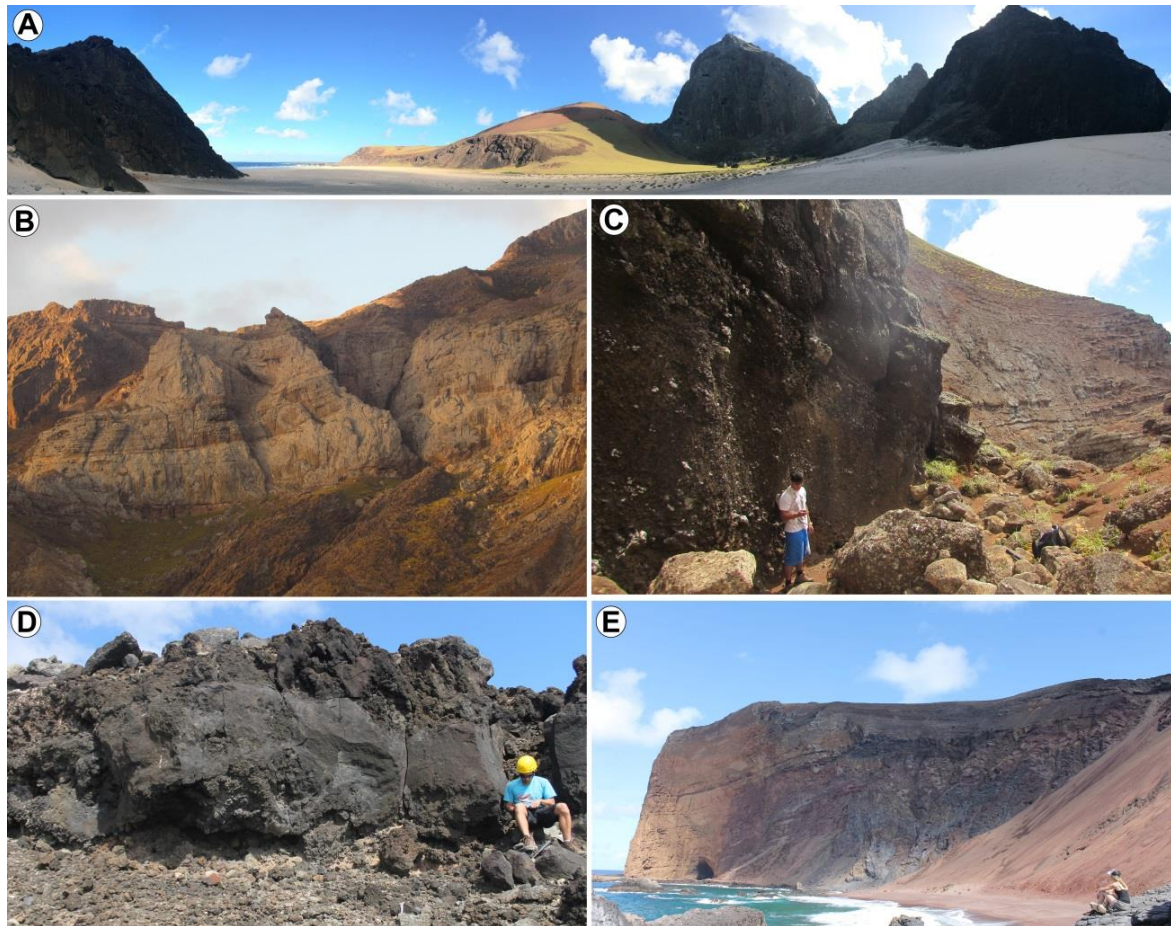


FIGURE 4 - Geological units have characteristics that distinguish them from each other: A - large phonolithic necks of the Trindade Complex seen at Praia das Tartarugas (from left to right in the photo: Tartarugas Hill, Pão de Açúcar, Vigia Peak and Nossa Senhora de Lourdes peak); B - large structural plateau formed in the central portion of the island by almost horizontal layers of the Desejado Sequence; C - large syn-eruptive volcanic deposits (close to the geologist) and layers belonging to the scoria cone of Morro Vermelho Formation (in the background); D – A’á lavas belonging to the Valado Formation and; E – center portion of scoria cone outcropping in the south of the island of Paredão Volcano formation

3. Methodology

3.1 Terminology

The volcanic particles in the MVF deposits were described, according to Sommer et al. (2003, modified from Fisher, 1961 and Schmid, 1981), in 5 different types considering the size of the fragments: fine ash (0.003 – 0.005mm), coarse ash (<2mm), lapilli (< 64mm), blocks and volcanic bombs (> 64mm). The deposits were interpreted based on the subdivision proposed by McPhie (1993), with volcanic deposits in general (lavas, pyroclasts, subvolcanic products) and autoclastic deposits (autobreccias, breccias) that could be separated within the volcanic pile of the unit.

3.2 Stratigraphic analysis

The descriptive approach to volcanic sequences, with the description of geometry, constituents, emplacement forms and probable mode of generation, is applied for both coherent rocks (massive lavas) and volcanoclastic rocks (autoclastic, pyroclastic, reworked pyroclastics and sedimentary rocks rich in volcanic constituents). In volcanoclastic deposits, except pyroclastic, by the depositional similarity with sedimentary particles, facies description is used following the criteria adopted for sedimentary rocks. For pyroclastic deposits, the terminology used to describe the particle sizes differs from that usually used for sedimentary rocks.

Based on the facies code proposed by Miall (1977) for sedimentary rocks, Cas & Wright (1987) described a class of grain size for volcanoclastic rocks, their diagnostic characteristics and possible origin process. Other similar works have proposed terminologies for the architecture of facies in continental lavas (Jerram, 2002, Farrel, 2010, Waichel et al., 2012, Rossetti et al., 2014). In this work, we created a specific table for the different lithofacies and their associations identified in the MVF deposits.

Lithofacies were represented in two columnar sections of scale 1:100 constructed in key outcrops of the unit, chosen considering best expositions, less weathering and access facilities. Columnar sections allow a better visualization and understanding of the succession of events, stacking patterns and relationships between different layers, besides illustrating the changes that occurred in volcanism during its evolution, and allowing a more careful interpretation of the volcanic pile.

3.3 Petrography

From ten MVF samples collected for macroscopic analysis, six of them were used for petrographic analysis. Effusive and volcanoclastic rocks were selected for a complete understanding of the volcanic events and products generated in this unit. The petrographic characteristics directly reflect the eruptive style, supporting the stratigraphic interpretation of the deposits. For the thin sections description the microscope Leitz® Laborlux of 12 inches was used with a camera Scion Corporation®, model cfw-1612c, attached for the photomicrography acquisition. The software Hardledge® from ENDEEPPER® was used for standardization and organization of the descriptions.

4. Results

Located in the eastern portion and extending to the central part of the island (Figure 5), the Morro Vermelho Formation (MVF) reaches its highest altitude in contact with the Desejado Sequence (DS), at up to 600 m of altitude. The MVF deposits were built up on the steep walls of the DS plateau, directing the material generated to the eastern and southern portions of the island covering talus deposits and bypassing large phonolitic necks and plugs of the Trindade Complex (TC), until the Calheta, Andradas and Príncipe beaches. A continuous volcanism built the formation during a short living period. The basal deposits are composed by nephelinitic lava flows with 200 m of thickness, filling the old valleys. The activity continued with the scoria cone building, a sequence of lapillistones and lapilli-tuffs deposits formed at higher altitudes than the lavas.

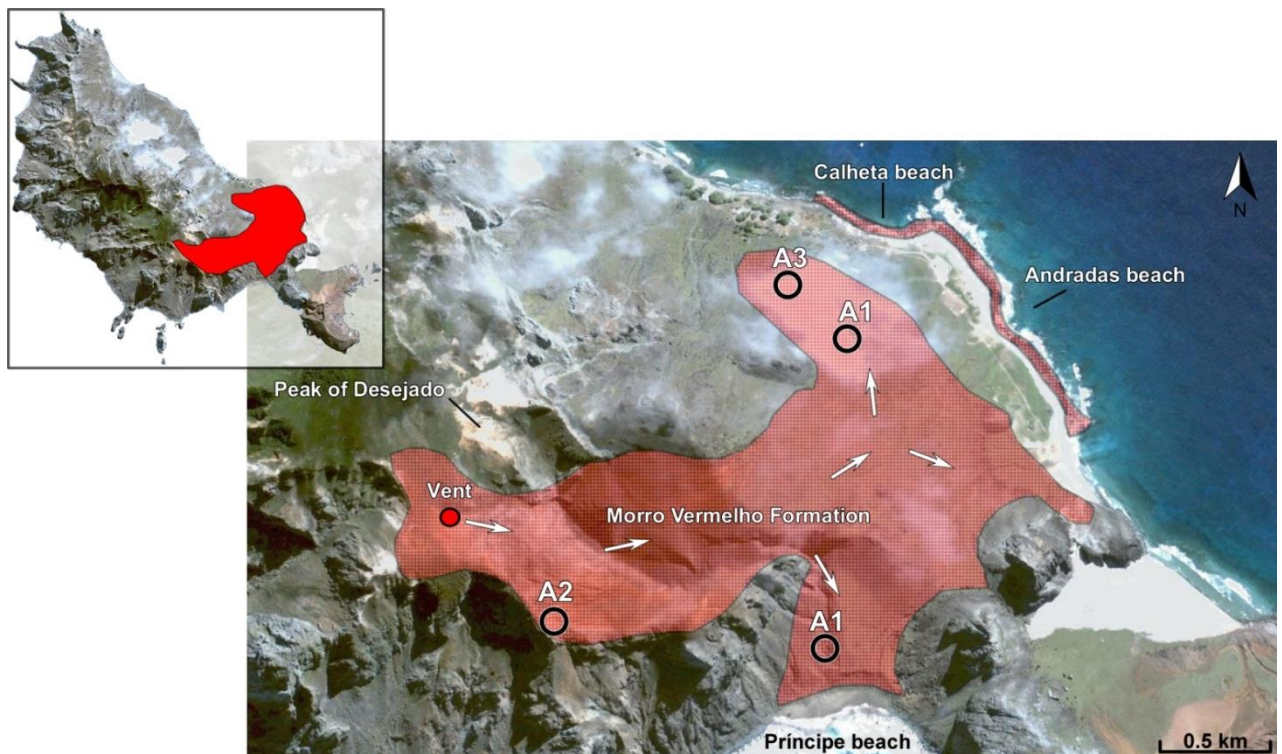


FIGURE 5 - Area covered by the MVF deposits (red hatched). The white arrows indicate the likely directions of the material generated in the vent. The black circles represent facies associations described (A1, A2 and A3), and where the analyzes were carried out.

5. Lithofacies Analysis, Petrography and interpretations

5.1 Facies

In the MVF seven different lithofacies and three facies associations were identified (Table 1), allowing to interpret better and explain the generation of this unit.

Lithofacies	Description	Interpretation	Facies Association
Nefelinitic lavas (core) "Nc"	Tabular (irregular in some points) and coherent core of nephelinite lavas, usually ranging from 1 to 2 meters in thickness, rich in phenocrysts and agglomerates of olivine (millimetric and maximum 1 cm) that are oriented in a thin matrix, dark gray in color, where they are not recognized the components with a hand magnifier. The lavas present at high rate of vesiculation, these voids being stretched and oriented by the flow (E).	Central portion of nephelinite effusion cooled by direct contact with the air generating fine texture in the matrix with phenocrysts emerge	A1
Nefelinitic lavas (autobreccia) "Nab"	Granular monolithic auto-breccias (2 - 64 mm), constitute irregular packages on the surfaces of the lavas. The scoriaceous fragments belonging to the breccia, both base and top, are composed of very thin vitreous material, with millimetric to decimetric dimensions and the common presence of subhedral phenocrysts and olivine agglomerates.	Surface of the fragmented effluent due to the cooling which causes the increase in apparent viscosity. The fragments are also transported to basal portions of the spills through a treadmill movement ("caterpillar")	A1
Lapillistone (massive) "Lm"	Levels composed of angular and juvenile fragments of scoria (1cm average) with sometimes imperceptible boundaries which occur mainly as lenses at the base of the column and as tabular layers within the profile of the scoria cone	Fall deposits from a ballistic trajectory	A2
Lapilli-tuff "LTI"	Tabular layers with inverse gradation of lapilli-tuff to lapillistone well sorted, composed of juvenile scoria fragments, dark coloration, very well preserved and average thicknesses of 30 cm	Fall deposits from a ballistic trajectory and ash cloud	A2
Tuff "Tm"	Thin (maximum 4 cm) tabular layers of massive tuff composed of fine to medium ash particles, well selected and light gray in color	Fall deposits from an ash cloud	A2
Massive breccia "Bm"	Tabular layers or even on lenses, consisting mainly of juvenile lapilli-sized fragments that support blocks and scoria bombs, lapillistone, nephelinite and phonolite. These blocks have very low roundness and little sphericity. Some levels where these blocks are concentrated and/or with well-marked inverse gradation	Syn-eruptive volcanoclastic deposits rich in pyroclasts comprising talus and volcanic cone fragments	A3
Lapillistone (with clasts) "Lmf"	Lens levels with sometimes imperceptible boundaries of massive lapillistone composed of juvenile fragments of centimetric (1cm average) scoria it may contain centimetric - decimetric fragments of phonolite, nefelinitic lava and scoria.	Syn-eruptive volcanoclastic deposits rich in pyroclasts comprising talus and volcanic cone fragments	A3

TABLE 1 - Table of facies generated for the volcanic deposits of MVF

5.2 Lithofacies Association and Petrography

The MVF facies association can be separated into: I) **A1** - Effusive lithofacies association; II) **A2** - Explosive lithofacies association and III) **A3** – Lithofacies association related to mass movements.

I) **A1**: Effusive lithofacies Association (**Nc** + **Nab**)

Characterized by the association of nephelinitic autobreccias (**Nab**) 0.3 - 0.5 m thick, at the base and top of nephelinitic cores (**Nc**) 1 – 1.4 m, this facies association represents *A'a'* lava flows. These flows present, in general, a constant thickness of in average 2 meters and extend for about 1 km, from their source at 240 meters until the sea level. The contact of this association with the overlaying one (**A2**) is abrupt and irregular, in which the pyroclastic deposits cover and fill the irregularities generated in the autobreccia zones. However, the contact between **A1** and the lateral association (**A3**) is interdigitated, if some intercalations between the resedimented material and the lavas.

Petrographically, the portion of the core directly in contact with the breccia zone has a very fine holocrystalline groundmass, much altered and fragmented. The constituents of the matrix of these fragments are not recognizable. Fragments probably from the autobreccia zone were embedded in the core portion of the lava flow. Phenocrysts of altered subhedral olivine (0.8 – 2mm) and nosean (0.1 – 0.3mm) and vesicles present incipient flow texture (Figure 6 – A, B, D, E). The central zone of the lava core is formed by subhedral phenocrysts of olivine (2.8 mm average) with a medium degree of oxidation and microphenocrysts of olivine and pyroxene in a fine to medium holocrystalline groundmass, composed by small crystals (<1 mm) and crystallites of olivine, pyroxene, feldspathoid and opaques. Some phenocrysts of olivine are partial to completely replaced by opaque minerals (oxides). The glomereroporphyritic texture among olivines is typical, with the occurrence of skeletal texture in larger grains. Diopside is present in the groundmass (< 0.1mm) and also like subhedral microphenocrysts. Vesicles are usually stretched with approximately 2 mm (0.4 to 9 mm).

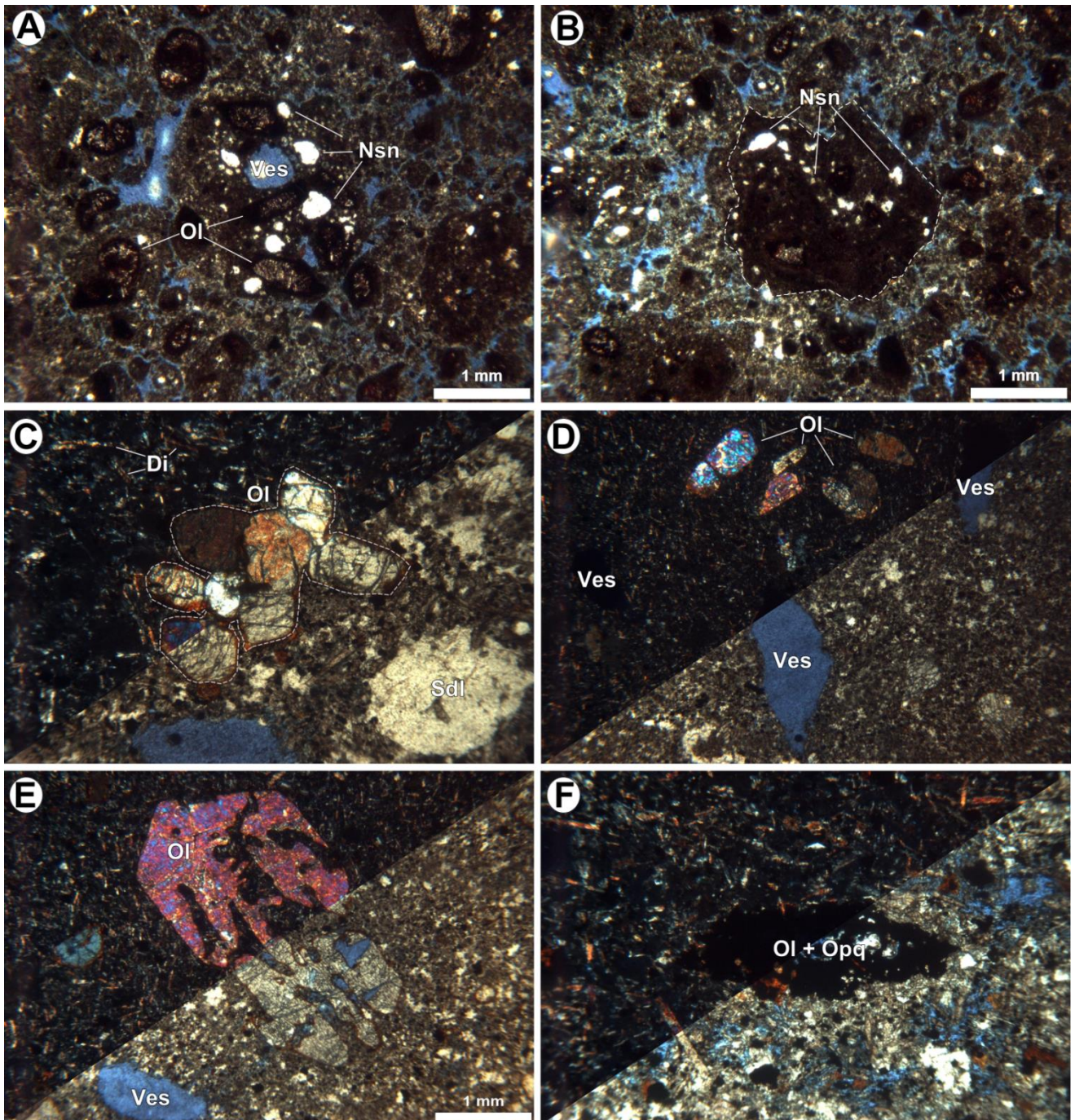


FIGURA 6 - Photomicrographs acquired in thin sections of coherent portions of MVF nephelinitic lavas: A - detail of vesiculated scoria fragment with phenocrysts in an area with fragmented aspect of the lava core in contact with autobreccia; B - same portion of the A photomicrograph detailing scoria fragment with flux structure preserved in nosean microphenocrysts; C - glomeroporphyritic texture in olivines and phenocrystal of sodalite emerge in fine phaneritic groundmass of central portion of the core, with more massive aspect than A and B; D - flow structure marked by the stretching of vesicles and phenocrysts of olivine with a larger dimension aligned according to the flow; E - large olivine phenocrystal with skeletal texture caused by rapid cooling generated by direct contact of the core portions with the atmosphere; F - olivine phenocrystal substituted with opaque mineral

II) **A2**: Explosive lithofacies Association (**Lm** + **LTi** + **Tm**)

Near the eruptive center (approximately 600 meters above the sea level), there are tabular packages of pyroclastic deposits with thicknesses ranging from 0.5 to 50 cm with excellent lateral continuity (100 to 500 m), composed of fragments of juvenile scoria of predominantly lapilli size (**Lm**) and rare lapilli-tuff (**LTi**). At approximately 50 meters of altitude, in Príncipe beach (south portion of island), there are tabular levels with thickness varying from a few centimetres to up to half a meter and lateral extension of approximately 250 meters, of well-sorted and friable lapillistone (**Lm**) composed of juvenile scoria fragments of reddish-brown to black color. Drops, bombs or driblets from nephelinitic lava and scoria also occur in some portions. In these deposits, there are also rare tabular layers of light gray color tuffs (**Tm**) composed of medium to coarse ashes particles with a maximum thickness of 5 centimeters, and the same lateral continuity of the lapillistones. The occurrence of many degassing pipes of up to one meter high and half a meter in diameter was describe in the proximal deposits and the southern portion of the Andradas and Príncipe beaches.

Lapilli-tuffs in thin sections are dominantly composed of juvenile fragments (from 0.05 to 5.0mm) of scoria, angular shards and crystals. The juvenile particles of scoria are mostly vitreous, reddish-brown color (sideromelane), vesiculated and high oxidized. Large and subhedral to euhedral phenocrysts (0.8 to 4.8mm) of olivine emerging from these particles, equally oxidized. Shards have plaque shapes, and are millimetric (< 0.1 to 1mm) and oxidized. Fragments of olivine, feldspars (sanidine), feldspathoids (nepheline and nosean), clinopyroxene (diopside) and phlogopite with a mean of 0.23 mm, are altered. The crystals of nosean are cubic and with dimensions around 0,2 mm, whereas nepheline occurs subedric and hexagonal. Crystaloclasts of phlogopite have a lamellar habit, up to 0,31 mm in size, are subhedral and have some reaction textures, showing zoning. (Figure 7 – A, B, C, D)

III) **A3**: Lithofacies Association related to mass movements (**Bm** + **Lmf**)

This facies association is composed by the intercalation of locally massive, poorly sorted, polymythic breccias (**Bm**), described as tabular layers (irregular in

some points) from 4 to 5m thick composed by a lapilli-sized matrix that supports blocks and scoria bombs, nephelinitic and phonolitic fragments (highly altered and with a fine trachytic texture composed of sanidine, feldspathoids and pyroxenes) (Figure 7 – E and F). Interspersed with these breccias occurs a massive lapillistone (Lmf), at times with tabular geometry, though also in the form of lenses, with an average of 2 meters of thickness, forming a succession of more than 30 m. The contact between these deposits is abrupt and extends for about 100 m. Laterally occurs lava flows interdigitated, originating from the Hawaiian volcanism from the base of the unit (A1).

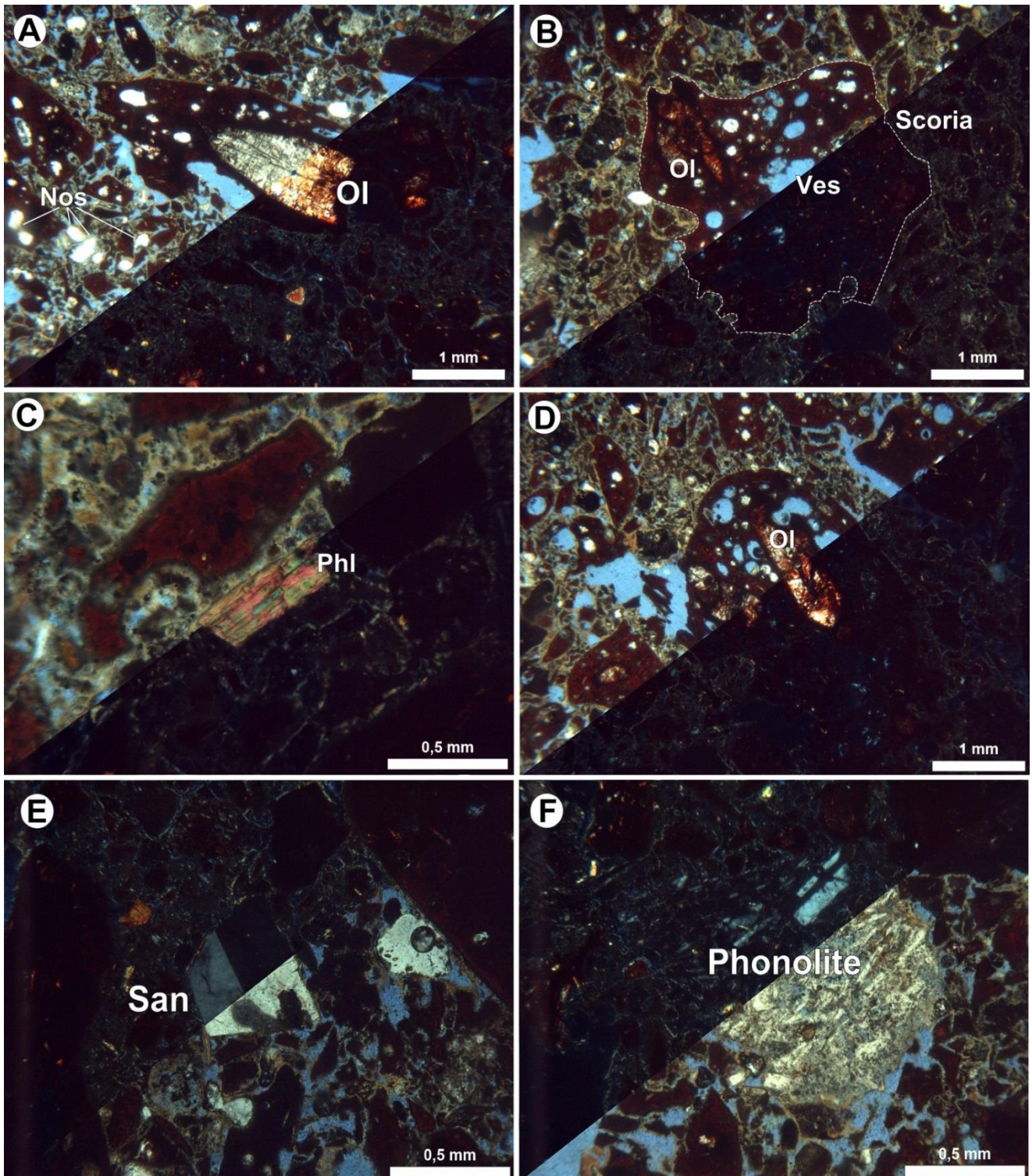


FIGURE 7 - Photomicrographs acquired in thin sections of particulate and resected deposits: A – angular vitreous fragments (sideromelane) with phenocrysts of olivine and nosean; B - large vesiculated angular scoria with olivine phenocrysts, mainly; C - small and angular vitreous fragments with walls of small vesicle preserved and fragment of phlogopite crystal indicating a more hydrated system; D - vesiculated scoria fragment with oxidized phenocrysts of olivine; E and F are photomicrographs of sin-eruptive resected deposits, where the glass fragments and scoria include crystal fragments (sanidine in "E") and rocks probably belonging to the Trindade complex (oxidized phonolite in "F")

5.3 Interpretations

The Morro Vermelho Formation presented an initial Hawaiian eruptive style (effusive deposits) followed by a Strombolian eruptive style (explosive deposits) with syn-eruptive mass deposits.

I) Base Deposits: **Hawaiian volcanism**

A succession of *A'a* lavas of about 240 m filled an existing valley in the units TC and DS, reaching the Calheta and Andradas beach, east of the island, representing a Hawaiian style of volcanism (MacDonald, 1972; Cas & Wright, 1987; Vergnolle & Mangan, 2000). These lavas are well exposed along two large gullies, created by post-volcanic erosive processes. The columnar sections of this unit were made in these deposits (Figure 5 – A1 point near the coast in E side of the island). Before they channeled, these deposits were unconfined within the central valley (main valley), where they spread laterally forming tabular layers with irregular surfaces given by the top and bottom autobreccia deposits. The massive core (coherent portion) and the brecciated surfaces of the lavas are the results of one or more factors added: high eruptive rates, very pronounced relief angle and / or channeling of flows (MacDonald, 1972; Cas & Wright, 1987, Cashman et al., 1998 and 1999, Duraiswami et al., 2014). The porphyritic texture (glomeroporphyritic), as seen in the photomicrograph (Figure 6 – C), is generally interpreted as a result of the cooling and crystallization in two phases of the magma, one in subsurface when the large crystals are slowly formed and another in the surface when the fast cooling crystallizes the groundmass (McPhie et al. 1993). This texture is generated when a greater temperature shock occurs between the liquid and the surroundings, indicating that the mineral was probably crystallizing in deep magmatic chambers, and was quickly transported together with the liquid to shallower depths or even to the surface by eruption. The autofracture of the surface of the *A'a* lavas causes the exposure of the center of these flows, generating a rapid cooling of this part, a fact that agrees with the textures observed in thin sections like a fine groundmass and presence of phenocrysts.

The significant absence of any other material between the *A'a* lavas, suggests a fast and continuous volcanism. The identification of a unique layer of pyroclastic material (lapillistone or lapilli-tuff) with approximately 1,5 m of thickness in the middle of *A'a* lavas may suggest a likely sudden change in the eruptive regime or even being related to the scoria flow of upper portions of the unit. Over this particulate deposit there is thick nephelinite lava of about 4 m, demonstrating that there is a continuity between these two eruptive forms, and both occur at the same time in different areas of the unit. The lava pile follows up to approximately 240 meters of altitude, where an abrupt contact with the pyroclastic material from the upper portions of the MVF is identified (Figure 8 – A, B).

II) Upper Deposits: **Strombolian deposits**

This facies association (Figure 5 – A2 point near the vent) is interpreted as a result of a Strombolian eruption in which magma has more than 70% of the gas content, and great bubbles of gas coalesce, fill the entire conduit and ascend by the eruptive column (“slug flow”), unstabling near the surface and exploding

(Vergnolle & Mangan, 2000). These numerous explosions send small drops of lava through the air, depositing near the vent. With each new arrival of these large gas bubbles, more and more particles are thrown on a ballistic trajectory, depositing themselves on top of each other still hot, generating very well-sealed layers composed of fragments of lapilli size, dominantly (Vergnolle & Mangan, 2000). These particles deposited near the vent can flow downhill in the form of scoria flows where the juvenile solid fraction is composed of scoria fragments, pumice, shards and vitreous fragments, and gaseous by volatiles expelled before and during eruption plus volatiles released by pyroclasts during flow (Sommer et al., 2003). These products remain hot even after deposition with large amounts of gases trapped between the particles. These volatiles ascend between the layers deposited leaving the path of their passage recorded in the form of the degassing pipes described. The great magmatic fragmentation described for this type of eruption is translated into the textures seen in thin sections, where the presence of many angular fragments, crystal fragments and high vesiculation are described. Lapillistone deposits overlap the nephelinitic lavas from the base. This portion of the facies is described in the table of facies as "**LTm**", "**Lti**" and "**Tm**" and at the top of the MVF it is possible to identify a portion of the scoria cone formed during volcanism. A large portion suffered destabilization and collapsed, causing landslides that reached the beaches (Figure 10).

III) Lateral deposits: **Mass movement deposits**

Resedimented syn-eruptive volcanoclastic deposits, of about 30 m of thickness, were emplaced laterally to the lavas at the base (Figure 5 – A2 point near the coast in E side of the island). These deposits are associated with processes of mass movement and resedimentation of the volcanic material deposited in proximal portions, which were displaced by the scoria flows and abatement of blocks, including rocks of other units and several materials generated earlier in the unit itself. The columnar section generated allows interpreting that there is a succession of several flows ranging from massive lapillistones ("**Lmf**"), formed by scoria flows similar to the deposits generated during strombolian eruptions (but present lithoclasts) at the base, to breccias ("**Bm**") at the top (reverse grading). Volcanic processes (earthquakes, thermal weakening, gas percolation) can cause large mass movements, such as landslides in volcanic buildings, even instability and collapse of portions of the building itself (like scoria flows), or PDC's (Andronico et al., 2018). Constant slippage carried not only the MVF pyroclastic products, but also fragments of phonolitic necks from Trindade Complex, ashes and phonolitic lava fragments from the Desejado Sequence, and nepheline lava blocks from the basal deposits of the unit. Among these thick breccia deposits, some levels and packages of pyroclastic material with a few lithoclasts or even well-sorted (lapillistones) occur. Some of these "lapillitic" levels are composed exclusively of lapilli and/or lapillituff ("**Lm**" or "**Lti**") were interpreted as fragments of the volcanic cone that would have collapsed during eruptive activities. In addition to well-marked boundaries, the layers resemble lenses or occur in abrupt contact with the surrounding breccias (Figure 8 – C and Figure 9).

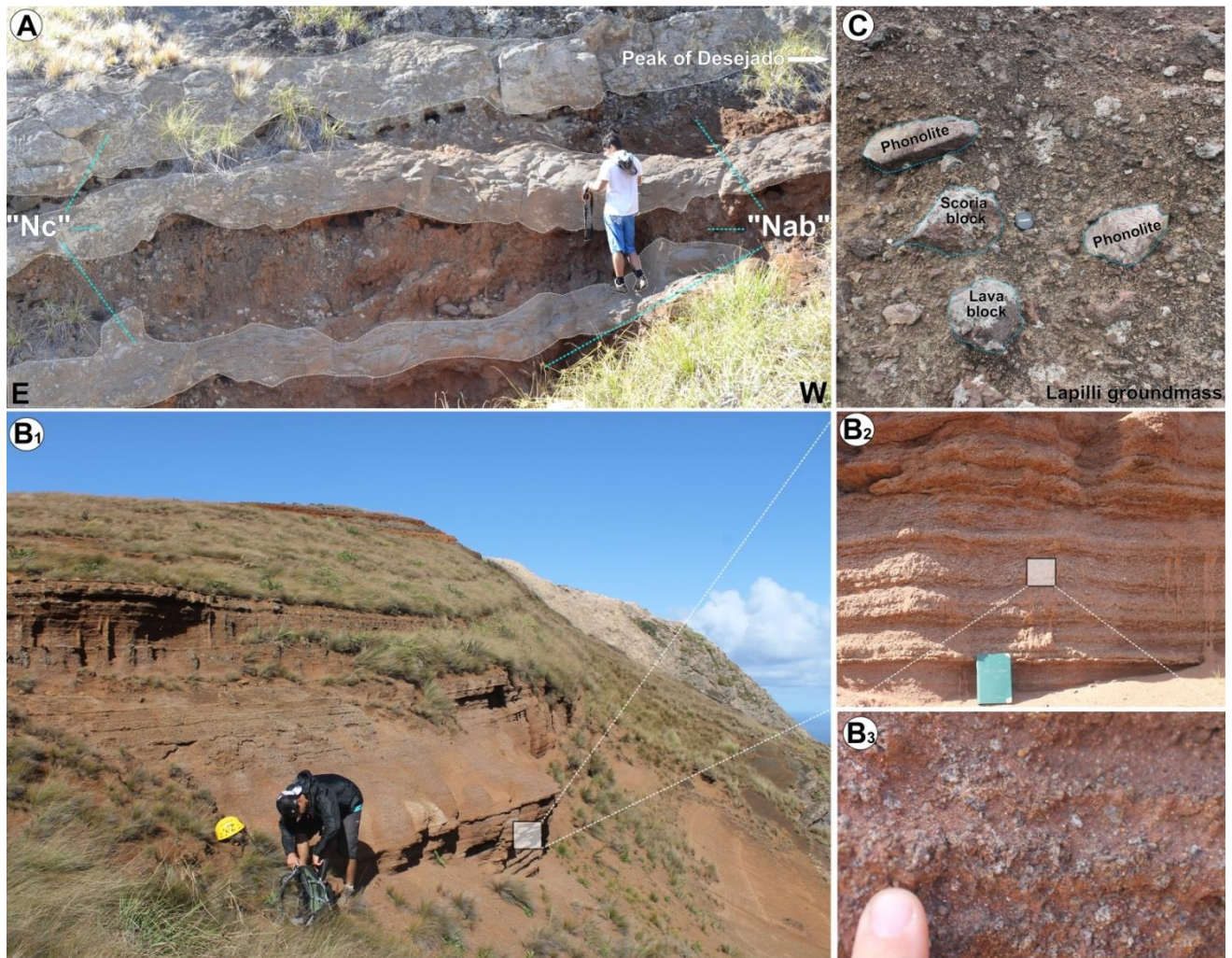


FIGURE 8 - The three facies associations described for the MVF: A – effusive deposits (A1) described in the basal portion of formation highlighting core of lavas (“Nc”) and autobreccia (“Nab”) zone; B₁, B₂ and B₃ – lapillistone and lapilli-tuffs (A2) of the scoria cone formed at the highest altitudes of the formation; C – lapillistone with large fragments and blocks of phonolite, lavas and scoria (A3), representing syn-eruptive resected volcanic deposits

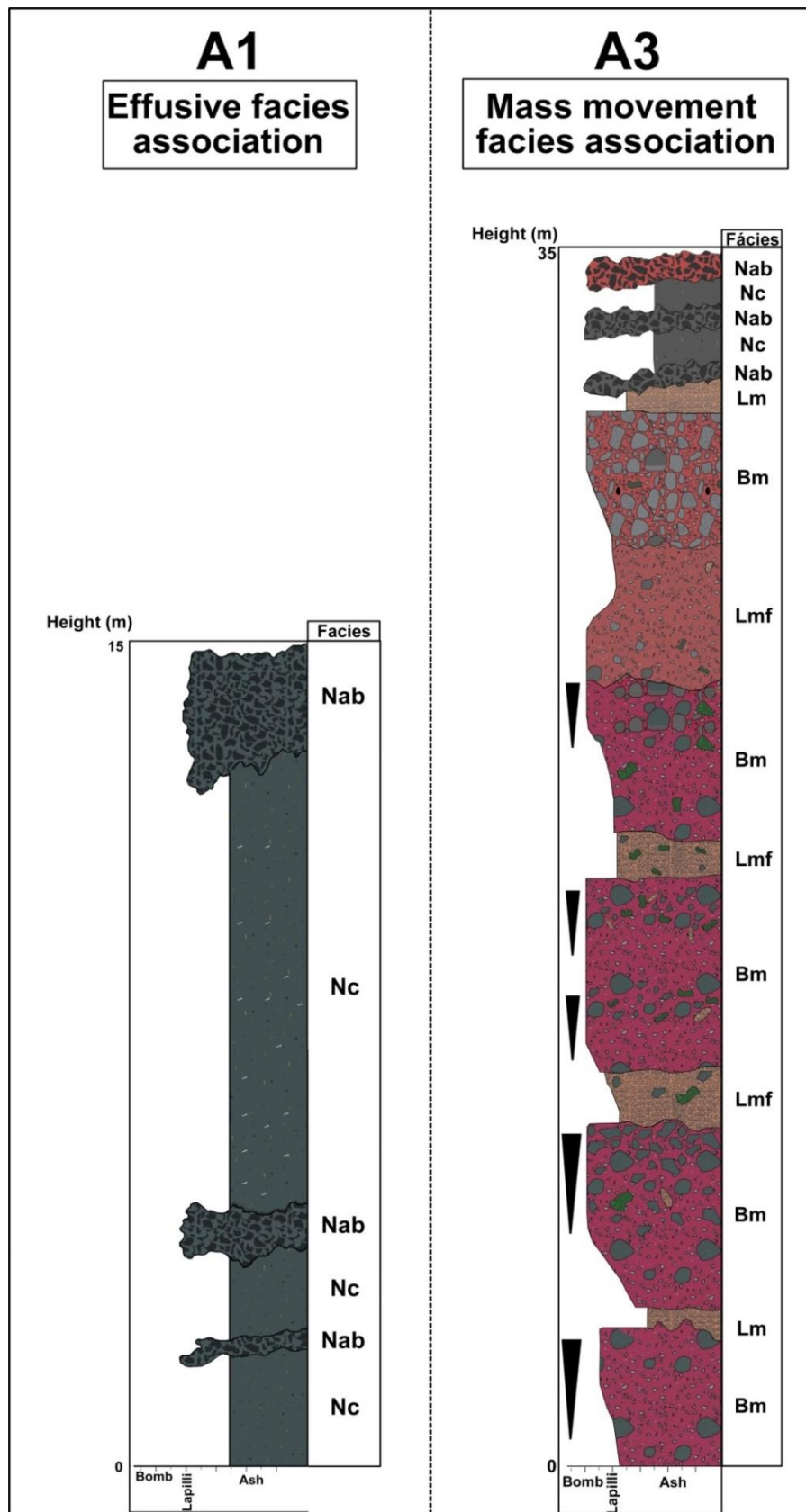


FIGURE 9 - Columnar sections made in effusive and resected deposits of the basal portion of the unit. The two sections belong to the deposits represented by "A1" and "A3" located in the vicinity of Calheta beach, in Figure 5. The deposits described above are laterally located and at the same altitude in the field.

6. Discussion

Based on the integration of the stratigraphic and petrographic analysis of the volcanic deposits, we propose that the volcanism of the MVF was monogenetic and built by two eruptive styles: Hawaiian and Strombolian. For a better organization of the formation, effusive and explosive events were individually described even if they had occurred simultaneously. With the data obtained, we propose a geological model for the generation of the MVF, which is described below.

6.1 Dispersion area

The emissive center of the MVF was located in the central and elevated portion of the island, between the deposits of the predecessor unit (Figure 5). The DS formed a structural plateau in the center of the island. Thus the MVF deposits were emplaced anchored in its eastern slope. The rugged relief and its steepness were responsible for channeling all the material generated to the eastern side (Calheta and Andrada beach) and south of the island (Príncipe beach). During the flow of the volcanic material towards the sea, it was confined by large phonolitic plugs and necks from TC. The lavas and pyroclastic material bypassed the base of these necks and were deposited in large gullies excavated by erosion.

6.2 Stratigraphic analysis

With a total thickness of ~240 meters (or more, considering the meters now submerged by the sea), nephelinitic lavas dominated the basal portion of this unit (A1 association), preserving the preferential orientation from their source to the east and south beaches and representing dominant Hawaiian volcanism. The rare pyroclastic levels described among these lavas, demonstrate that even representing a relatively Hawaiian moment of volcanism, dual activity (effusive and explosive) can occur simultaneously (Pioli et al., 2009).

At about 250 meters of altitude, and well-exposed in the trail of access to the Desejado Peak (Figure 10), there is sudden contact between the basal nephelinitic lavas with pyroclastic deposits (A2 association), that are dominant in the upper portions of the MVF, evidencing an explosive origin. These deposits represent a

frankly Strombolian stage of the system activity, even with the generation of a scoria cone that grew as volcanism continued and can still be recognized in the course of the trail described previously. At ~400 meters the contact between the MVF scoria cone, the phonolithic necks of the Trindade Complex and stratified Desejado Sequence deposits is observed. Studies of the Stromboli volcano in Italy (Andronico et al., 2018) have shown that sudden increases in system explosiveness known as "paroxysms" occur and raise the eruptive column up to a few kilometers above the crater. In these explosions the magma is quite fragmented, generating a great amount of pyroclastic material. A column of gases and ashes is commonly associated with these events, generated in the crater itself or even by the formation of pyroclastic density currents (PDCs) that descends swiftly down the flank of the volcano. Unlike the PDCs, the pyroclastic material of the MVF deposited "cold", forming quite friable deposits as seen in the well-sorted lapilli-tuff and lapillistones that covered the nephelinitic lavas at Príncipe beach. Typically, PDCs exhibit welded, mingling, amalgamated, flow structures where even the vitreous "matrix" marks the preferred orientation of the deposits because of the intense compaction (obliterating the pore system), stretching of the fragments (Andronico et al., 2018), which were not observed in the these rocks of the MVF.

Instabilisation of the portions of the volcanic cone and mass movements occurred during the eruptive events of the MVF (A3 association). The well-sorted pyroclastic products deposited at higher altitudes of MVF were then shifted to lower altitudes, mainly in the form of resedimented syn-eruptive volcanoclastic deposits (McPhie et al. 1993). In the path of these "avalanches" composed by scoria fragments (lapilli average), phonolitic fragments (cm to dm) of the predecessor units were incorporated, as well as lava blocks and big scoria clasts (cm to dm) from MVF, forming from lapillistones with lithoclasts (lithofacies "**Lmf**") even massive breccias (lithofacies "**Bm**"). Large fragments of the cone were deposited entirely too, as in a rigid structure, being recognized as lenses composed basically of well sorted lapillistones. With the main valley already filled by lavas, the material was moved to the surrounding areas, forming a pile of about 30 meters thick where breccias, lapillistone (lithofacies "**Lm**"), lapilli-tufts (lithofacies "**LTi**") and lavas (lithofacies "**Nc**" and "**Nab**") are intercalated.

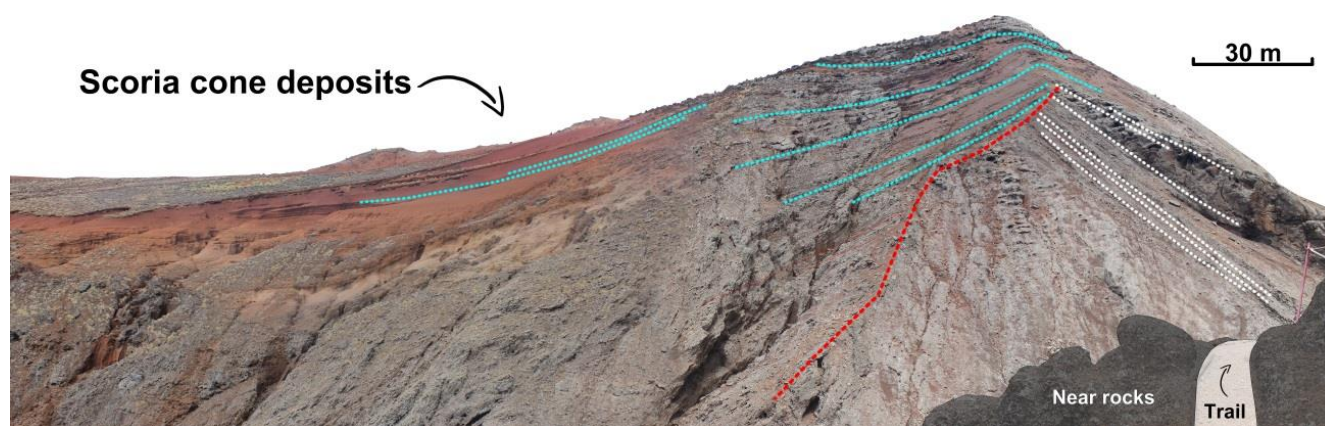


FIGURE 10 - Portion of the MVF scoria cone exposed by erosive processes in the trail to the Desejado Peak. The white dotted lines represent the orientation of the first layers of deposited pyroclastic material. The red dotted line marks the erosive surface where portion slip of the cone occurred. The lines dotted in blue demarcate the new layers of pyroclastic material deposited with the continuation of the volcanism, covering the erosive surface generated.

7. Geological Model

The detailed field observations and microscopic analyzes of the different lithofacies and facies associations allowed us to trace the brief evolutionary history of the third oldest unit of the island, opening up new directions, research possibilities and interpretations for the other formations that of Trindade, which remains poorly understood.

MVF was interpreted as the result of a monogenetic Strombolian eruption, composed of explosive and effusive events that occurred concomitantly. At first, the strombolian scoria cones have a horseshoe shape built around the emissive center. This form allows both, explosive and effusive activity, to occur at the same point. With the development of volcanism and the construction of the cone itself (due to accumulation of pyroclasts around the emissive center), the explosive activity is restricted to the crater whereas the lavas arise through fractures usually located in basal portions of the volcanic building (Pioli et al., 2009). This configuration with two material outlets requires segregation of volatiles and magma in the two conduits (vertical and lateral) (Krauskopf, 1948; Behncke and Neri, 2003). While pyroclasts were accumulated through explosive events occurring in the fissure that originated the MVF material, lavas flowed downstream, mainly to the east, conditioned to the large valley excavated in the rocks of the first unit of the island (Figure 11).

The volcanism continued with the scoria cone acquired several meters by the

accumulation of pyroclastic material. Pyroclastic flows are generated with the destabilization of the deposits, making lapillistones and lapilli-tuffs cover an extensive area in the eastern portion of the island (Figure 11 – B and C). From where we believed that today is the extinct crater of the volcano until the contact with the lavas generated at the base, there are about 200 meters of lapillistone layers and lapilli-tuffs interspersed. With the cone growing and the generation of nephelinitic lavas, the area covered by the unit grew steadily, while the main valley was increasingly filled with effusive deposits. At a certain moment of the activities, portions of the volcanic building collapsed, generating slides of the material (Figure 11 - C).

Deposits composed of lapillistones, mainly, flowed in the form of avalanches along the slope of the scoria cone, heading towards the east coast of the island. The main valley, which had already been filled by lavas, diverted to these lateral portions the resedimented deposits, which were emplaced about 100 meters farther north from where the nephelinitic lavas are recognized. Due to the concomitant generation of effusive and explosive deposits and the action of sedimentary processes, field relations can be complex sometimes. Within portions of the re-deposited materials, it was possible to recognize levels of nephelinitic lavas that flowed over the main valley (already filled) and have covered these lateral deposits. At Príncipe beach, pyroclastic deposits cover the thick lava flows of the base, where it is possible to identify ash levels related to moments of greater explosiveness of the system. These layers of thin material may also be related to the ash clouds formed during the displacement of scoria flows, and which are carried by the winds until they are deposited (Sommer et al., 2003) After the slides, the strombolian activity in the scoria cone crater generated new lapillitic layers that cover the collapsed portion, leaving a sliding surface marked where it was possible to identify old and new layers with different deposition angles, in the same cut of the cone (Figure 10 and Figure 11 – D).

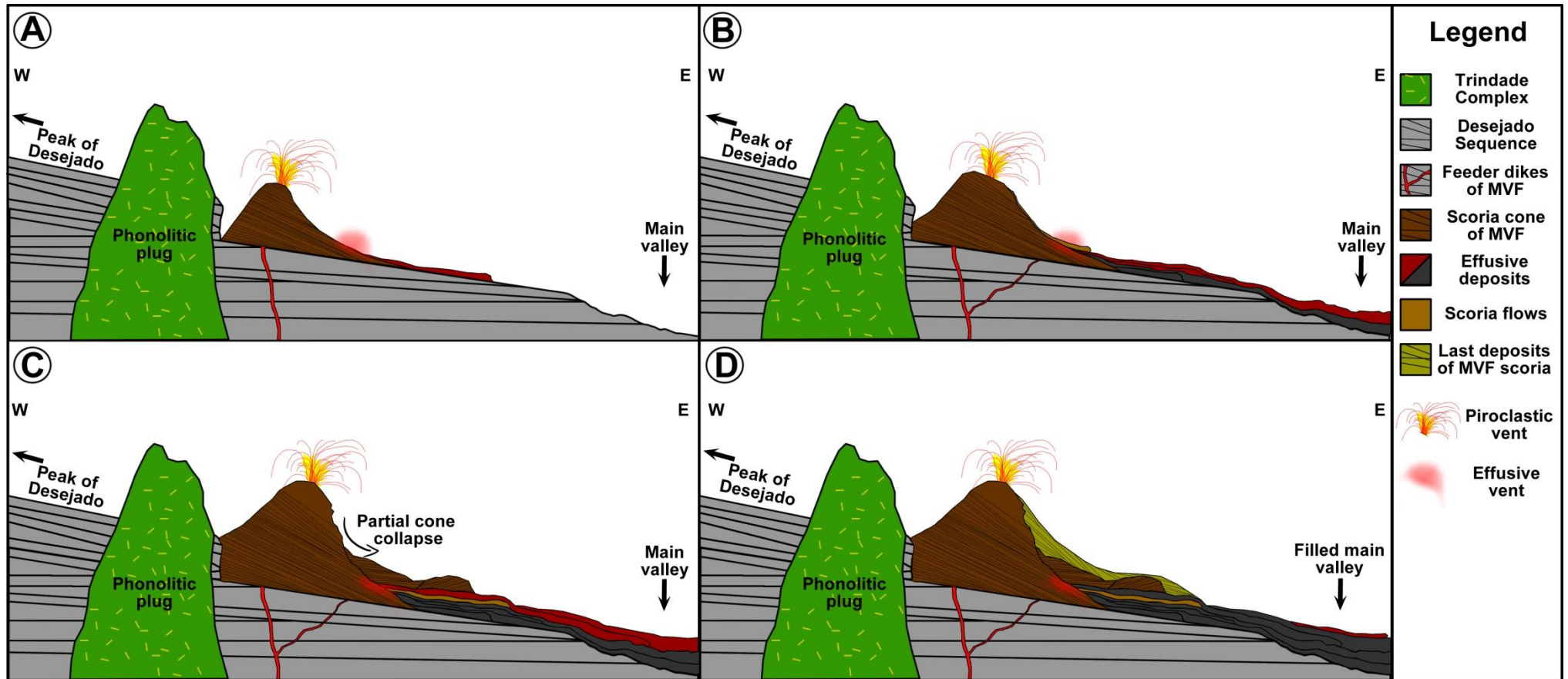


FIGURE 11 - A - beginning of MVF volcanism with the generation of horseshoe shaped scoria cone with lava flowing at the base towards the main valley; B - growth of the scoria cone and bifurcation of the feeder conduit, generating larger lava volumes in basal portions of the volcanic building; C - collapse of the portion of the scoria cone and formation of the resected deposits (A3) that flowed towards the basal portions of the formation; D - final moments of the volcanism in the MVF, with the erosional surface being covered by new pyroclastic deposits and main valley filled by the nephelinitic lava.

8. Conclusion

The use of stratigraphic principles, focusing on the separation of different facies and the probable associations of these, in the volcanic deposits of the MVF is a very efficient technique to recognize the different stages of this volcanism. It was possible to recognize the monogenetic nature of this formation, separating the event into two distinct types of volcanism. The Hawaiian activity was described in basal portions through the stratigraphic survey of a representative columnar section where a succession of *A'a'* morphology lavas were recognized. The Strombolian eruptive style was recognized at higher elevations where frankly pyroclastic deposits were described as well as portions of the scoria cone still preserved from this unit. The systematic construction of columnar sections in key outcrops of the formation, allowed to understand and separate the different products generated and their relations. A total of seven different lithofacies for the MVF were described, separated into three different associations: effusive (Hawaiian), explosive (Strombolian) and resedimented (volcanic products resedimented during eruption). The microscopic description of these deposits corroborates to field characterizations, such as the degree of fragmentation of products, and the identification of emplacement processes. It was also possible to separate purely strombolian deposits (lapillistones) from resected products composed basically of lapillitic fragments (lapillistones with rock fragments and crystal fragments). The integration of all tools allowed to the development of an evolutive model for this unit. Similar work in the last formation of the island (PVF) has been carried out by the same research group (Pasqualon et al., in prep). Thus, a geological model of the formation of the whole island can be proposed, besides providing to the academic community an organized and complete faciological database for later researches.

9. Acknowledgements

The authors acknowledge the financial support of the **Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico** (CNPq) (Project CNPq-442812/2015-9) and Brazilian Navy (Marinha do Brasil) for all the logistical arrangements during field activities.

References

- Almeida F. F. M. de. (1961). *Geologia e Petrologia da Ilha da Trindade*. Rio de Janeiro, DGM/DNPM. 206p. (Monografia XVIII)
- Almeida F. F. M. de. (1992). *Ilha de Trindade: Registro de vulcanismo cenozóico no Atlântico sul*. SIGEP/CPRM
- Almeida, F. F. M. de. (2006). *Ilhas oceânicas brasileiras e suas relações com a tectônica atlântica*. *Terræ Didactica*, 2(1), 3-18
- Alves E.C., Maia M., Sichel S.E., Campos C.M.P. (2005). *Zona de fratura Vitória-Trindade no oceano Atlântico Sudeste e suas implicações tectônicas*. *Revista Brasileira de Geofísica*, 24(1): 117-127
- Behncke, B. And Neri, M. (2003). The July-August 2001 eruption fo Mt. Etna (Sicily). *Bulletin of Volcanology*, 65(7), 461-476
- Cas, R.A.F., & Wright, J.V. (1988). *Volcanic Successions, Modern and Ancient: A Geological Approach to Processes, Products and Successions*, 528 pp.
- Cashman, K., Pinkerton, H., Stephenson, J., (1998). *Introduction to special section: Long lava flows*. *Journal of Geophysical Research* 103 (B11), 27281–27289.
- Cashman, K.V., Thornber, C., Kauahikaua, J.P., (1999). *Cooling and crystallisation of lava in open channels, and the transition of pahoehoe lava to A'a'*. *Bulletin of Volcanology* 61, 306–323.
- Chevrel MO, Guilbaud M-N, Siebe C (2016b). *The ~AD 1250 effusive eruption of El Metate shield volcano (Michoacán, Mexico): magma source, crustal storage, eruptive dynamics, and lava rheology*. *Bulletin of Volcanology* 78:32
- Connor, C.B., Conway, F.M. (2000). *Basaltic volcanic fields*. In: *Sigurdsson H (ed) Encyclopedia of volcanoes*. Academic Press, San Diego, pp

331–343

Cordani, U. G. (1970). *Idade do vulcanismo do Oceano Atlântico Sul. São Paulo: Instituto de Geociências e Astronomia, Boletim IGA, 1, 9-75*

Cordani, U. G., & Blazekovic, A. (1970). *Idades radiométricas das rochas vulcânicas dos Abrolhos. Cong. Bras. Geol, 24, 265-270.*

Di Roberto, A., Bertagnini, A., Pompilio, M., Bisson, M. (2014). *Pyroclastic density currents at Stromboli volcano (Aeolian Islands, Italy): A case study of the 1930 eruption. Bulletin of Volcanology, 76(6).*

Duraiswami, R. A.; Gadpallu, P.; Shaikhg, T. N.; Cardin, N. (2014). *Pahoehoe – A'a' transitions in the lava flow fields of the western Deccan Traps, India – implications for emplacement dynamics, flood basalt architecture and volcanic stratigraphy. Journal of Asian Earth Sciences 84; 146 – 166.*

Farrell, R. E. (2010). *Volcanic facies architecture of the Chilcotin Group basalts at Chasm Provincial Park, British Columbia.* Doctoral dissertation, University of British Columbia.

Ferrari A.L., Riccomini C. (1999). *Campo de esforços Plio-Pleistocênio na Ilha da Trindade (Oceano Atlântico Sul, Brasil) e sua relação com a tectônica regional. Revista Brasileira de Geociências 29(2): 195-202*

Fisher, R. V. 1961. *Proposed classification of volcanoclastic sediments and rocks. Geological Society of America Bulletin, 72: 1409-1414.*

Fisher, R.V., Schmincke, H.U., 1984. *Pyroclastic Rocks.* Springer Verlag 472 pp.

Fodor R.V., Hanan B.B. (2000). *Geochemical evidence for the Trindade hotspot trace: Columbia seamount ankaramite. Lithos 51: 293-304.*

Gibson, S.A., Thompson, R.N., Leonardos, O.H., Dickin, A.P., Mitchell, J.C. (1995). *The Late Cretaceous impact of the Trindade mantle plume: evidence from large-volume, mafic potassic magmatism in SE Brazil*. Journal of Petrology 36, 118-229

Gibson, S.A., Thompson, R.N., Weska, R.K., Dickin, A.P., Leonardos, O.H. (1997). *Late Cretaceous rift-related upwelling and melting of the Trindade starting mantle plume head beneath western Brazil*. Contributions to Mineralogy and Petrology 126, 303-314.

Herz, N. (1977). *Timing of spreading in the South Atlantic: Information from Brazilian alkalic rocks*. Bulletin of the Geological Society of America 88 (1977): 101-112

Jerram, D. A. (2002). *Volcanology and facies architecture of flood basalts*. Volcanic Rifted Margins, 362, 119.

Krauskopf KB (1948) *Lava movement at Parícutin volcano, Mexico*. Geological Society of America Bulletin 59:1267–1284

Kshirsagar P, Siebe C, Guilbaud M-N, Salinas S, Layer PW (2015). *Late Pleistocene Alberca de Guadalupe maar volcano (Zacapu basin, Michoacán): stratigraphy, tectonic setting, and paleohydrogeological environment*. Journal of Volcanology Geothermal Research 304:214–236

Martí, J., Mitjavila, J., Araña, V., (1994). *Stratigraphy, structure and geochronology of the Las Cañadas caldera (Tenerife, Canary Islands)*. Geol. Mag. 131, 715–727.

McPhie, J., Doyle, M., Allen, R. (1993). **Volcanic Textures**. CODES, University of Tasmania, 190 pp.

Miall, A. D. (1977). *Lithofacies types and vertical profile models in braided river deposits: a summary*. Earth Science Reviews, 13 (4), 1-62

Nemeth, K., White, J.D., Reay, A., Martin U (2003). *Compositional variation during monogenetic volcano growth and its implications for magma supply to continental volcanic fields*. J Geology Society of London 160:523–530

Palladino, D.M., Simei, S., Sottili, G., Trigila, R., (2010). *Integrated approach for the reconstruction of stratigraphy and geology of Quaternary volcanic terrains: an application to the Vulsini Volcanoes (central Italy)*. In: Gropelli, G., Viereck-Goette, L. (Eds.), *Stratigraphy and Geology of Volcanic Areas*, The Geological Society of America Special Paper 464, pp. 63–84.

Pasqualon, N.G., Lima, E.F, Scherer, C.M.S., Luz, F.R., Rossetti, L.M.M. (in prep.). *Facies architecture and stratigraphic evolution of the Paredão Volcano, Trindade Island, Brazil*.

Pioli L, Erlund E, Johnson E, Cashman K, Wallace P, Rosi M, Delgado Granados H (2008) *Explosive dynamics of violent Strombolian eruptions: the eruption of Parícutin Volcano 1943–1952 (Mexico)*. *Earth Planet Sci Lett* 271:359–368

Pires, G. L. C., Bongiolo, E. M., (2016). *The nephelinitic-phonolitic volcanism of the Trindade Island (South Atlantic Ocean): Review of the stratigraphy, and inferences on the volcanic styles and sources of nephelinites*. *Journal of South American Earth Sciences*. 72, 49-62.

Rossetti, L. M., Lima, E. F., Waichel, B. L., Scherer, C. M., & Barreto, C. J. (2014). *Stratigraphical framework of basaltic lavas in Torres Syncline main valley, southern Parana-Etendeka Volcanic Province*. *Journal of South American Earth Sciences*, 56, 409-421.

Schmid, R. 1981. *Descriptive nomenclature and classification of pyroclastic deposits and fragments: Recommendations of the IUGS Subcommision on the Systematics of Igneous Rocks*. *Geology*, 9: 41- 43.

Sommer, C.A., Lima, E.F., Nardi, L.V.S., Liz, J.D., Pierosan, R. (2003). *Depósitos de Fluxo Piroclástico Primários: Caracterização e Estudo de um Caso no Vulcanismo Ácido Neoproterozóico do Escudo Sul-rio-grandense*. Instituto de Geociências, UFRGS. *Pesquisas em Geociências*. 30(1), 3-26

Vergnolle, S. and Mangan, M (2000). Hawaiian and Strombolian eruptions. *In: Sigurdsson, H. (ed) Encyclopedia of volcanoes*. Academic Press, San Diego, pp 331–343

Waichel, B. L., de Lima, E. F., Viana, A. R., Scherer, C. M., Bueno, G. V., & Dutra, G. (2012). *Stratigraphy and volcanic facies architecture of the Torres Syncline, Southern Brazil, and its role in understanding the Paraná–Etendeka Continental Flood Basalt Province*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 215, 74-82.

Willians, H., McBirney, A.R. (1979). *Volcanology*. Freeman, Cooper & Co., San Francisco 397pp.

Zanon, V., Pacheco, J., Pimentel, A., 2009. *Growth and evolution of an emergent tuff cone: Considerations from structural geology, geomorphology and facies analysis of São Roque volcano, São Miguel (Azores)*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 180; 277-291.

Parte IV

4.1 Publicações, resumos e histórico do curso

Co-autoria em artigo submetido à revista científica “*Journal of Volcanology and Geothermal Research*” sob o título “*Lithofacies association and stratigraphy of the Paredão Volcano, Trindade island, Brazil*” da pesquisadora Natália Gauer Pasqualon. Este trabalho abordou a estratigrafia da última unidade geológica formada na Ilha da Trindade, a Formação Vulcão do Paredão e faz parte, juntamente com a presente dissertação e artigo, dos trabalhos realizados pelo grupo de pesquisas em rochas vulcânicas da UFRGS como referido no texto.

----- Mensagem encaminhada -----

De: Journal of Volcanology and Geothermal Research <EvisSupport@elsevier.com>

Para: "nati_pasqualon@yahoo.com.br" <nati_pasqualon@yahoo.com.br>

Enviado: sexta-feira, 30 de novembro de 2018 07:36:43 BRST

Assunto: Your manuscript VOLGEO_2018_388 has been sent for review

This message was sent automatically. Please do not reply.

Reference: VOLGEO_2018_388

Title: Lithofacies association and stratigraphy of the Paredão Volcano, Trindade Island, Brazil.

Journal: Journal of Volcanology and Geothermal Research

Dear Miss. Gauer Pasqualon,

I am currently identifying and contacting reviewers who are acknowledged experts in the field. Since peer review is a voluntary service it can take time to find reviewers who are both qualified and available. While reviewers are being contacted, the status of your manuscript will appear in EVISE® as 'Reviewer Invited'.

Once a reviewer agrees to review your manuscript, the status will change to 'Under Review'. When I have received the required number of expert reviews, the status will change to 'Ready for Decision' while I evaluate the reviews before making a decision on your manuscript.

To track the status of your manuscript, please log into EVISE® and go to 'My Submissions' via: http://www.evise.com/evise/faces/pages/navigation/NavController.jspx?JRNL_ACR=VOLGEO

Kind regards,

Journal of Volcanology and Geothermal Research

XXVI SIC
Salão de Iniciação Científica



CERTIFICADO

Certificamos que o trabalho

**ESTRATIGRAFIA E GÊNESE DOS DEPÓSITOS VULCÂNICOS DA
FORMAÇÃO MORRO VERMELHO, ILHA DA TRINDADE**

da autoria de

FERNANDO RODRIGUES DA LUZ

orientado por

EVANDRO FERNANDES DE LIMA

foi apresentado e recebeu destaque na sessão Geociências - Mineralogia e Petrologia, com carga horária de 5 horas, e reapresentado na sessão especial Sessão Especial de Ciências Exatas e da Terra - QUINTA/TARDE no Salão UFRGS 2014: SIC - XXVI SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UFRGS, realizado no período de 20/10/2014 a 24/10/2014.

Documento gerado sob autenticação CKV.835.856.QAG



paz no plural
XXVIII SIC Salão de Iniciação Científica

CERTIFICADO

Certificamos que o trabalho

**ASPECTOS PETROGRÁFICOS E ESTRATIGRÁFICOS DA FORMAÇÃO
MORRO VERMELHO: ILHA DA TRINDADE - ES**

da autoria de

FERNANDO RODRIGUES DA LUZ

orientado por

EVANDRO FERNANDES DE LIMA

foi apresentado na modalidade Apresentação oral e poster, com carga horária de 4 horas, no Salão UFRGS 2016: SIC - XXVIII SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UFRGS, realizado no período de 12/09/2016 a 16/09/2016.

Documento gerado sob autenticação DZR.299.714.6SJ



12 a 16 de setembro - Campus do Vale - UFRGS



CERTIFICADO

Certificamos que o trabalho

Estratigrafia e petrologia da Formação Morro Vermelho: Ilha da Trindade - ES

dos autores

Fernando Rodrigues da Luz, Lucas de Magalhães May Rossetti, Evandro Fernandes de Lima, Breno Leitão Waichel, Claiton Marlon dos Santos Scherer, Dejanira Luderitz Saldanha, Marcos de Magalhães May Rossetti

foi apresentado na forma

ORAL

no 48º Congresso Brasileiro de Geologia,

realizado de 09 a 13 de outubro de 2016 na FIERGS,

em Porto Alegre - RS. Porto Alegre, 13 de outubro de 2016

Gilmar Vital Bueno

Presidente da Sociedade Brasileira de Geologia



Gerson Fauth

Presidente do 48º Congresso Brasileiro de Geologia

Realização





	Universidade Federal do Rio Grande do Sul Programa de Pós-Graduação em Geociências	
Histórico Curso		

Nome: FERNANDO RODRIGUES DA LUZ**Cartão:** 195768**Situação:** ATIVO**Identidade:** 3080424983**CPF:** 1506934005**Data de Nascimento:** 24/04/1989**Curso:** GEOCIÊNCIAS - Mestrado Acadêmico**Área de Concentração:** GEOQUÍMICA**Orientador:** EVANDRO FERNANDES DE LIMA**Proficiência no(s) Idioma(s):** Inglês

Período	Código	Atividade de Ensino/Professor	Créditos	Carga Horária	Conceito	Frequência (%)	Situação	Instituição
2018/01	GEB00045	Fácies e Sistemas Depositionais Professor: CLAITON MARLON DOS SANTOS SCHERER Titulação: Doutorado	5	75	A	100.00	Aprovado	UFRGS
2017/02	GEB00057	Depósitos minerais em ambientes hidrotermais Professor: JOSE CARLOS FRANTZ Titulação: Doutorado	5	75	A	100.00	Aprovado	UFRGS
2017/02	GEB00133	Estratigrafia Magnética Professor: JAIRO FRANCISCO SAVIAN Titulação: Doutorado	4	60	A	75.00	Aprovado	UFRGS
2017/02	GEB00122	MAGMATISMO: FONTES E PROCESSOS Professor: EDINEI KOESTER Titulação: Doutorado	4	60	A	100.00	Aprovado	UFRGS
2017/02	GEB00104	Petrologia e metalogenia de rochas máficas-ultramáficas Professor: JULIANA CHARAO MARQUES Titulação: Doutorado	4	60	A	100.00	Aprovado	UFRGS
2017/01	GEP00048	Geoquímica das rochas graníticas	5	75	A	100.00	Aprovado	UFRGS
2017/01	GEB27-26	T.E. EM GEOLOGIA MARINHA: ANISOTROPIA DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA Professor: JAIRO FRANCISCO SAVIAN Titulação: Doutorado	2	30	A	100.00	Aprovado	UFRGS
		Inglês em 03/08/2018	-	-	-	-		

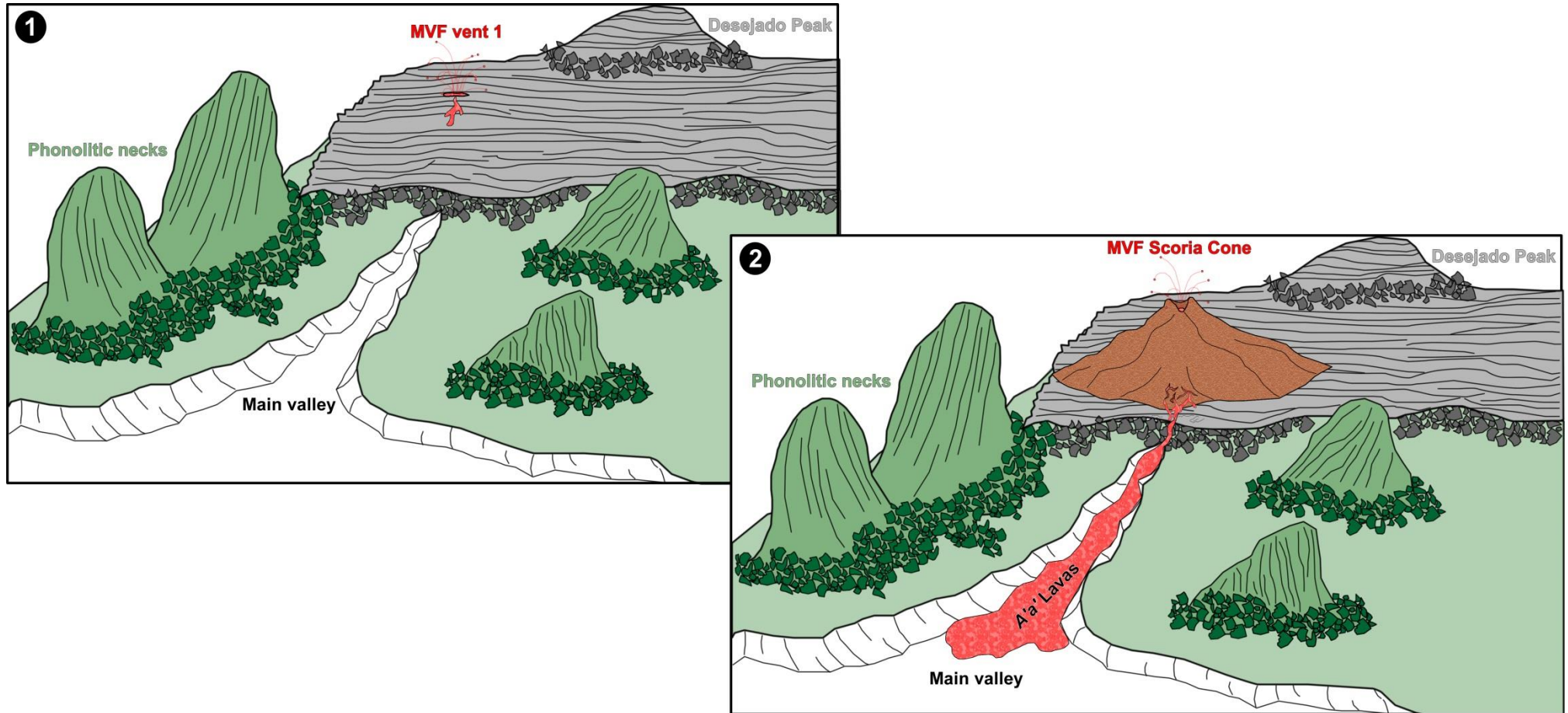
Conceitos
A - Conceito Ótimo
B - Conceito Bom
C - Conceito Regular
D - Conceito Insatisfatório
FF - Falta de Frequência

Totais
Créditos cursados com aprovação neste curso: 29
Total: 29

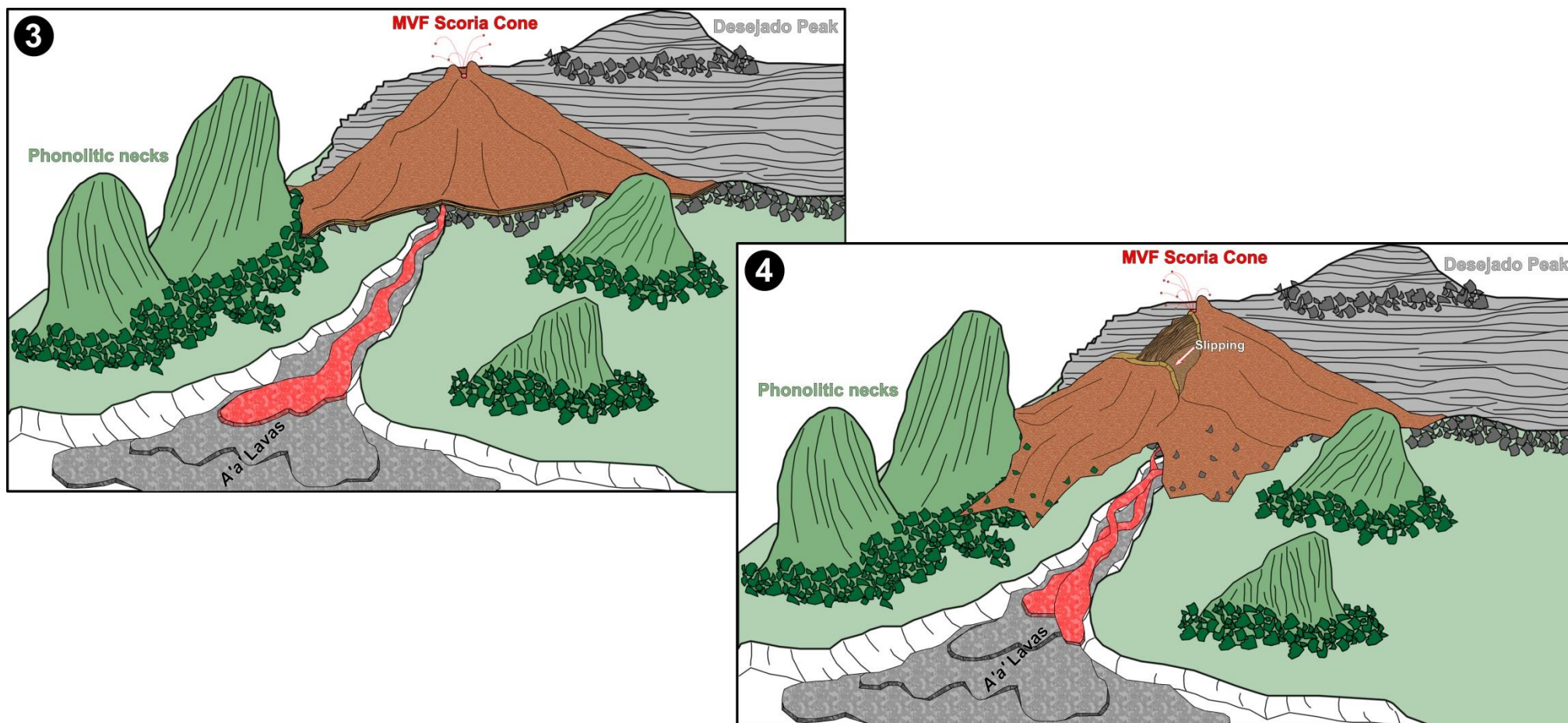
Documento gerado sob autenticação Nº QKT.716.706.6SJ

Podendo ser constatada em até 45 dias a partir da data de emissão, na Internet, pelo endereço <http://www.ufrgs.br/autenticacao>, tendo validade sem carimbo e assinatura.

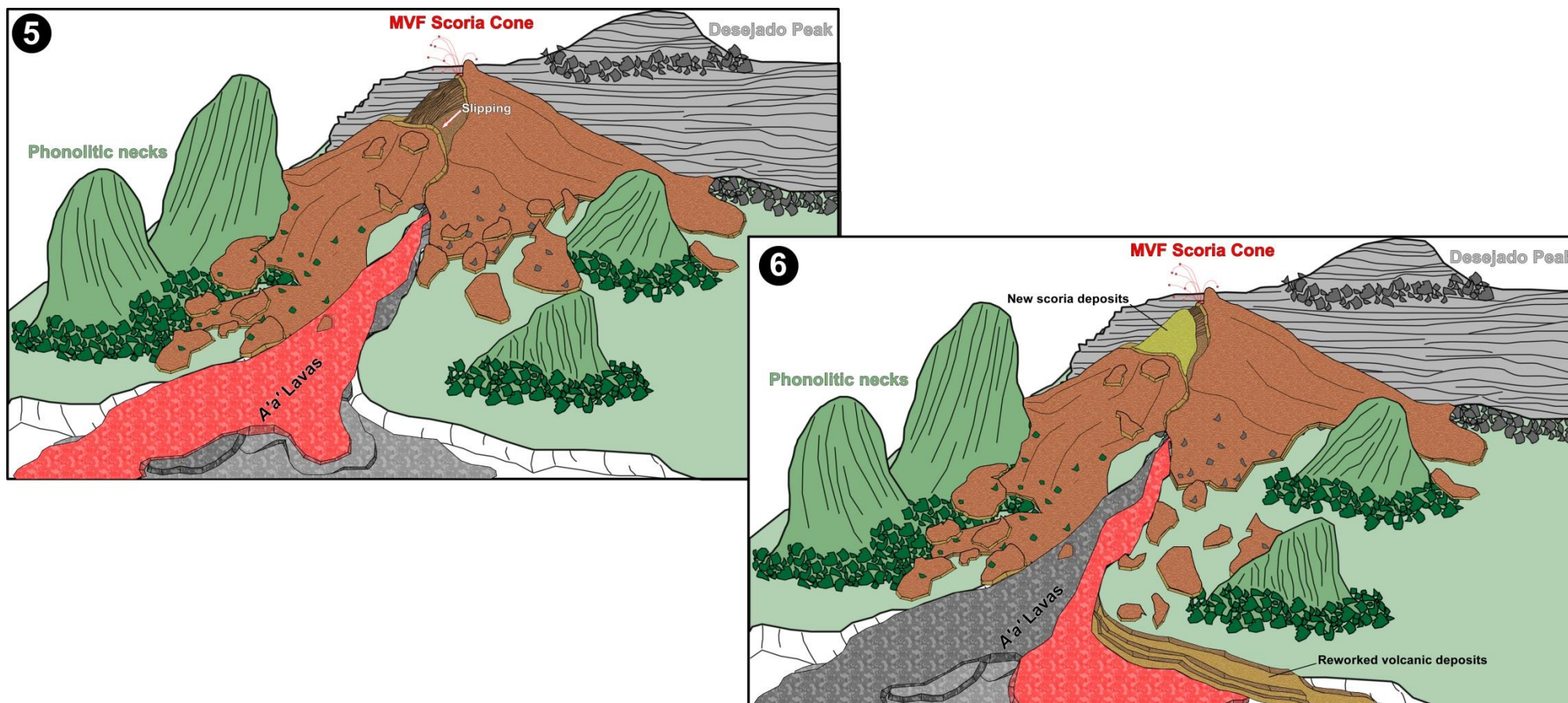
4.2 Anexos



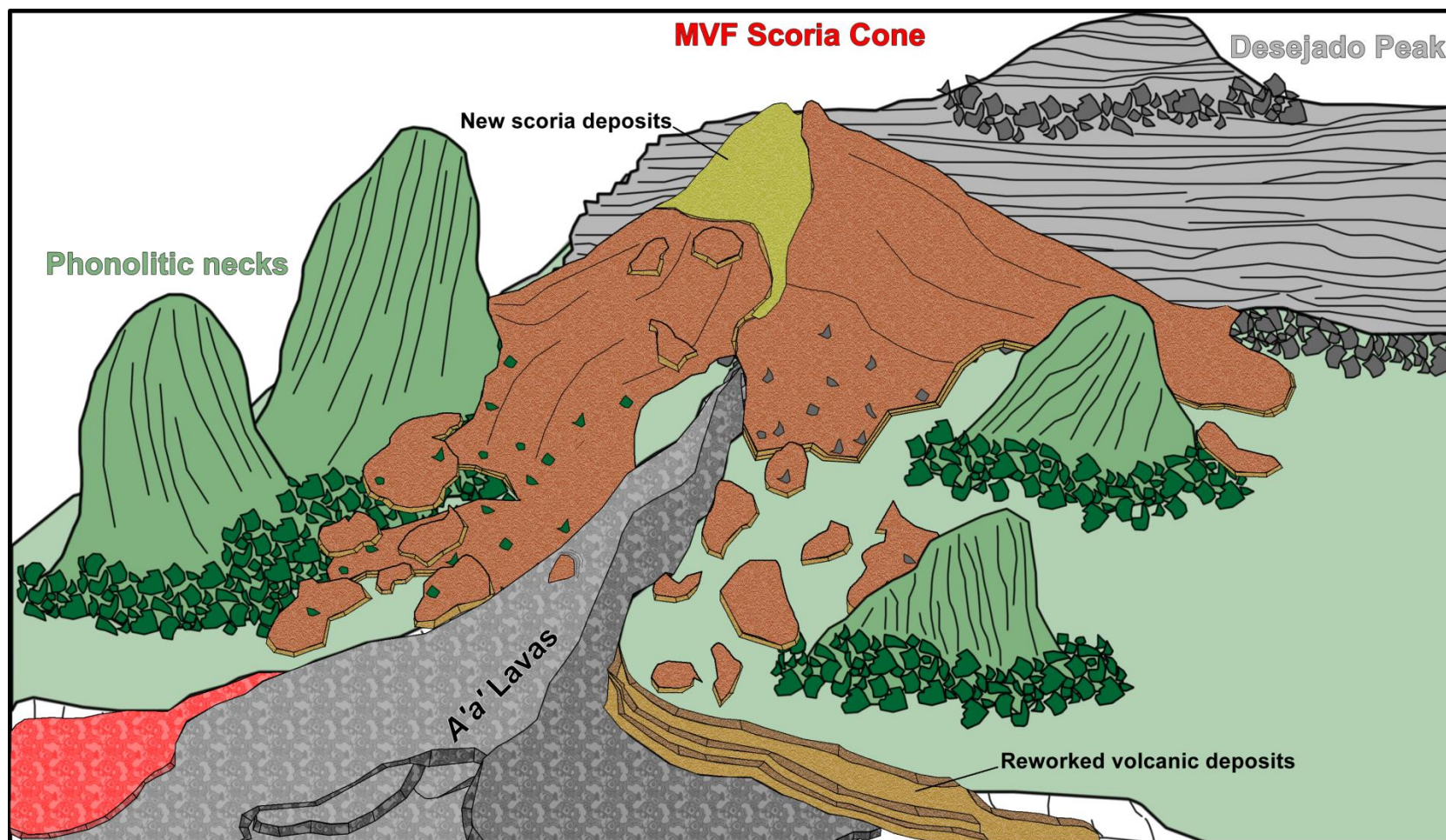
Anexo I: Modelo geológico da FMV. 1) Início do vulcanismo com geração de derrames e atividade explosiva no mesmo centro eruptivo; 2) Formação de cone de escórias por atividade estromboliana nas porções mais elevadas da unidade com fluxos de lava nefelinítica (estilo Havaiano) sendo formados nas porções basais do cone.



Anexo II: Modelo geológico da FMV. 3) Crescimento do cone de escórias por deposição de mais e mais material fragmentado (lápili) próximo à cratera e preenchimento de grande vale previamente escavado pela erosão nas rochas do Complexo Trindade (verde) por fluxos de lava nefelinítica com morfologia final A'ia'; 4) Movimentos de massa na forma de grandes escorremantos de porções do cone e fluxos de escória são gerados durante a atividade explosiva no cone de escórias da unidade.



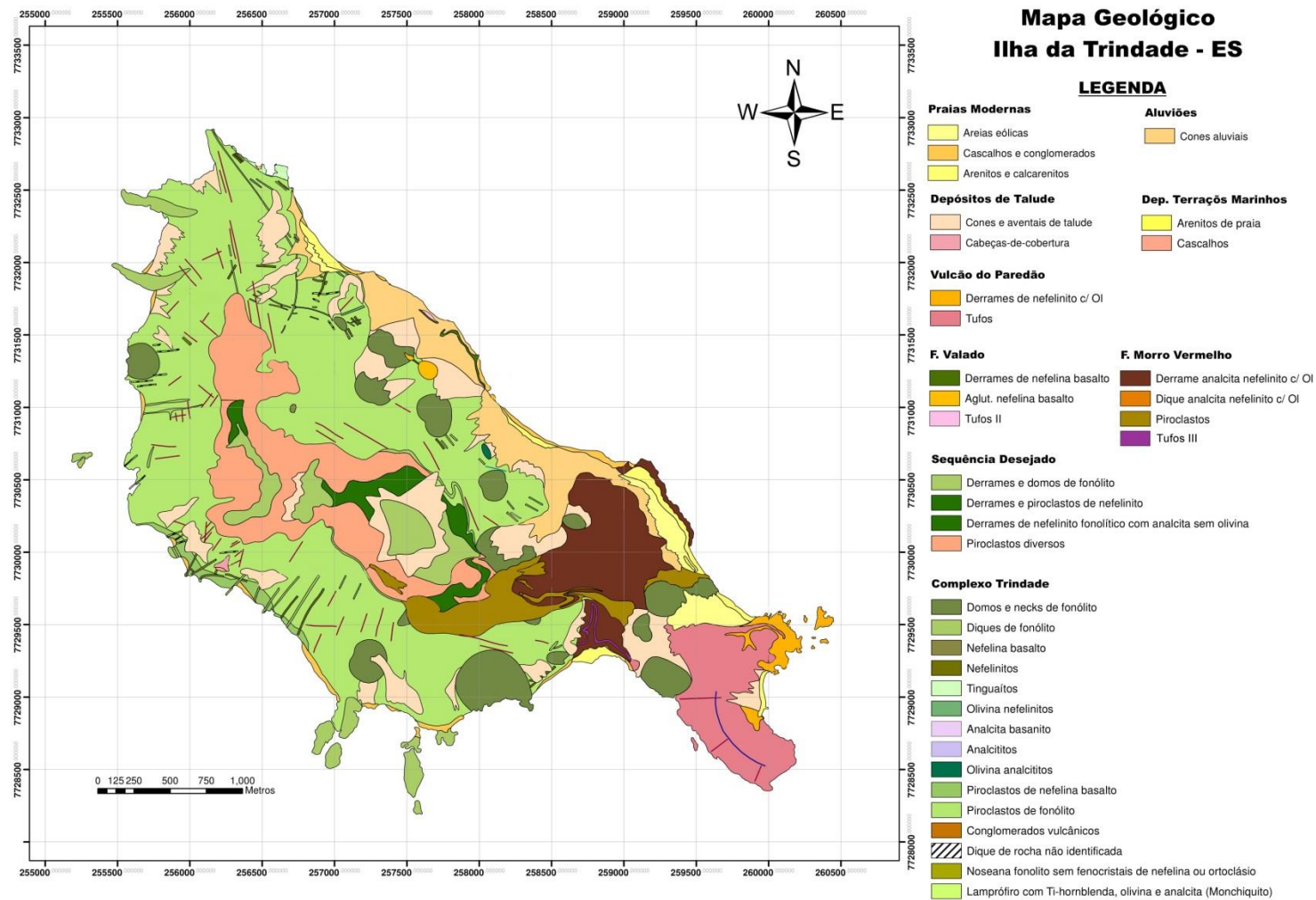
Anexo III: Modelo geológico da FMV. 5) Fragmentos do cone de escórias e fluxos de escória fluem em direção às porções de menor altitude da ilha, enquanto que o vale já se encontra quase completamente preenchido pelos derrames nefeliníticos; 6) Deposição de parte do material referente aos movimentos de massa (lapilitos, lápili-tufos e brechas) em posição lateral aos derrames que preencheram o vale, ocorrendo interdigitação destes depósitos em alguns pontos. A continuada manifestação explosiva no topo da unidade gera novos pacotes de material piroclástico, que sobrepõem as antigas camadas que sofreram desmoronamento, deixando marcada a superfície de deslizamento onde este ocorreu com diferentes orientações das camadas.



Anexo IV: Modelo geológico da FMV. Provável configuração final da Formação Morro Vermelho, com o vale totalmente preenchido por derrames nefelíníticos com depósitos referentes à movimentos de massa posicionadas lateralmente, e depósitos piroclásticos relacionadas à vulcanismo estromboliano dominando nas porções de maior altitude (cone de escória com porção onde é reconhecida zona de deslizamento – cores amarela e marrom).



Anexo V: Detalhe de erupção ocorrida no vulcão Stromboli (Italia), mostrando atividade explosiva na cratera do cone de escórias (estilo Estromboliano), atividade efusiva na base (estilo Havaiano) e fraturas que podem vir a gerar movimentos de massa como escorregamentos, fluxos de escória e PDC's. Este seria o provável cenário durante as atividades eruptivas da FMV.



Anexo VI: Mapa Geológico de Trindade atualizado com áreas recobertas por depósitos da FMV e referenciadas anteriormente à outra unidade geológica da Ilha (modificado de Almeida, 1961).

Litofácies	Descrição	Interpretação	Associação de fácies
Lavas nefeliníticas (núcleo) "Nc"	Núcleos coerentes, tabulares (irregulares em alguns pontos), usualmente variando de 1 a 2 metros de espessura, ricos em fenocristais e aglomerados de olivina (mm - 1cm) orientados em matriz fina, cinza-escuro, onde não se reconhecem os constituintes com lupa de mão. Estas lavas apresentam alta taxa de vesiculação com vesículas estiradas e orientadas também segundo o fluxo (para leste).	Porção central de lavas nefeliníticas solidificadas em contato direto com o ar, gerando matriz com textura fina e fenocristais emersos.	A1
Lavas nefeliníticas (autobrechas) "Nab"	Autobrechas granulares, monolíticas (2-64mm), constituindo pacotes irregulares nas superfícies das lavas. Os fragmentos escoriáceos, pertencentes às brechas de topo e base, são compostos por material muito fino, com dimensões mm-dm e comum presença de fenocristais e aglomerados de olivina.	Superfície fragmentada de lava originada pelo resfriamento que causa um aumento aparente na viscosidade. Os fragmentos são formados na superfície e transportados para porções basais dos derrames através de um movimento semelhante ao de uma esteira ("caterpillar movement").	A1
Lapilito (maciço) "Lm"	Níveis compostos por fragmentos juvenis e angulares de escória (1cm em média) com limites por vezes encobertos e ocorrendo preferencialmente na forma de lentes nas porções basais da pilha vulcânica e em formato tabular em porções referentes ao cone de escórias da unidade.	Depósitos de queda através de trajetória balística	A2
Lapili-tufo "LTi"	Camadas tabulares com gradação inversa de lapili-tufo à lapilito bem selecionado, composto por fragmentos juvenis de escória de coloração preta, bem preservados e com espessura média de 30cm.	Depósitos de queda através de trajetória balística e derivados de nuvens de cinzas.	A2
Tufo "Tm"	Finas camadas tabulares (máximo 4cm) de tufo maciço composto por partículas de cinza média a fina bem selecionada e com coloração acinzentada.	Depósitos de queda de uma nuvem de cinzas	A2
Brecha maciça "Bm"	Camadas tabulares ou na forma de lentes, consistindo de fragmentos juvenis do tamanho lapili suportando blocos e bombas de escória, lapilito, nefelinítico e fonólito. Estes blocos possuem baixíssimo arredondamento e esfericidade. Alguns níveis apresentam estes blocos concentrados e/ou com gradação inversa.	Depósitos vulcanoclástico sin-eruptivos ricos em piroclastos compreendendo talus e fragmentos do cone vulcânico.	A3
Lapilito (com clastos) "Lmf"	Lentes com limites por vezes imperceptíveis compostas por lapilito maciço composto por fragmentos centimétricos de escórias com fragmentos (cm-dm) de fonólito, lava nefelinítica e escória.	Depósitos vulcanoclástico sin-eruptivos ricos em piroclastos compreendendo talus e fragmentos do cone vulcânico.	A3

Anexo VII: Tabela de fácies e associação de fácies gerada para os depósitos que compõem a pilha vulcânica da FMV.

ANEXO I

Título da Dissertação/Tese:

ANÁLISE ESTRATIGRÁFICA DOS DEPÓSITOS VULCÂNICOS DA FORMAÇÃO MORRO VERMELHO, ILHA DE TRINDADE, BRASIL

Área de Concentração: **GEOQUÍMICA**

Autor: **FERNANDO RODRIGUES DA LUZ**

Orientador: **Prof. Dr. Evandro Fernandes de Lima**

Examinador: **CARLOS AUGUSTO SOMMER**

Data: **28/01/2019**

Conceito: **A**

PARECER

A Dissertação de Mestrado do Sr. FERNANDO RODRIGUES DA LUZ, intitulada "ANÁLISE ESTRATIGRÁFICA DOS DEPÓSITOS VULCÂNICOS DA FORMAÇÃO MORRO VERMELHO, ILHA DA TRINDADE, BRASIL" teve como objetivos principais propor um modelo geológico para a evolução do vulcanismo na Formação Morro Vermelho da Ilha Trindade, a partir da construção de um arcabouço estratigráfico com base nas diversas litologias descritas para a unidade (depósitos efusivos, explosivos e ressedimentados sin-vulcânicos) e como estas estão organizados dentro da pilha vulcânica.

A dissertação está estruturada na forma de artigo científico, seguindo as normas do PPGGEO desta Universidade, no qual um artigo submetido, corresponde ao capítulo principal da dissertação. A obra é complementada por uma parte introdutória, constituída de Introdução, Estado da Arte, Metodologia e Contexto Geológico da Área de Estudo.

A dissertação está muito bem organizada, apresentando uma redação correta o que facilita a leitura e compreensão do texto. A disposição e organização dos capítulos permitem ao leitor um aprofundamento gradual e constante sobre o tema trabalho. Todas as figuras e tabelas são pertinentes e editadas com uma resolução adequada.

A Introdução apresenta a temática a ser desenvolvida na dissertação, bem como os objetivos propostos e a organização do trabalho. Contempla ainda uma revisão bibliográfica e contexto geológico regional. Discute ainda, princípios físicos de vulcanologia e a aplicação de arquitetura de fácies em sequências vulcânicas. É baseada em bibliografia recente, permitindo a inserção da área trabalhada dentro de um contexto regional e internacional. Fornece uma base sólida para a leitura e compreensão de toda a dissertação.

O capítulo de Metodologia (II) apresenta todas as etapas de trabalho e métodos utilizados na execução do projeto.

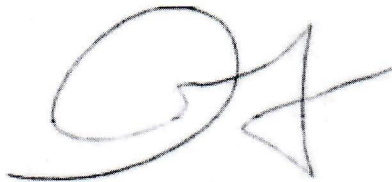
O capítulo III é a parte principal da dissertação que é o um artigo científico intitulado "*Stratigraphic Analysis of the volcanic deposits of the Morro Vermelho Formation, Trindade Island, Brazil* ", submetido a revista *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. O artigo está muito bem organizado e tem como objetivos principais os mesmos da própria dissertação, descritos na parte introdutória.

Complementa a dissertação uma parte de anexos, constituído pela produção bibliográfica do autor e figuras e mapas complementares ao artigo e dissertação.

Em síntese, pode-se constatar através desta Dissertação que o aluno atingiu plenamente todos os objetivos propostos para um mestrado acadêmico, utilizando diferentes técnicas e métodos na resolução de problemas geológicos relacionados à uma parcela da Ilha Trindade. Com certeza, pode ser considerada uma excelente contribuição que proporcionará um grande avanço científico na compreensão sobre o vulcanismo associado a estas estruturas geológicas.

Ante ao exposto, sou de parecer positivo e considero a dissertação em análise plenamente aprovada e parabeno o aluno, seu orientador e a instituição pelo nível de excelência do trabalho.

Assinatura:

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized 'S' followed by a vertical line and a horizontal stroke.

Data: 28/01/2019

Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno:

ANEXO I

Título da Dissertação/Tese:

ANÁLISE ESTRATIGRÁFICA DOS DEPÓSITOS VULCÂNICOS DA FORMAÇÃO MORRO VERMELHO, ILHA DE TRINDADE, BRASIL

Área de Concentração: **GEOQUÍMICA**

Autor: **FERNANDO RODRIGUES DA LUZ**

Orientador: **Prof. Dr. Evandro Fernandes de Lima**

Examinador: Dra. Isabela de Oliveira Carmo

Data: 28/02/2019

Conceito: C

PARECER

Esta dissertação utiliza uma abordagem nova e que se mostra bastante útil para o entendimento dos processos vulcânicos ocorridos na construção da Ilha de Trindade. Todas as correções e comentários sobre partes específicas do texto, realizadas pela presente revisora, estão assinaladas diretamente no corpo da dissertação em formato PDF, encaminhado juntamente com este parecer.

O aluno Fernando Luz apresenta um trabalho detalhado de campo, com a aplicação de técnica de estratigrafia vulcânica e demonstra um bom aprendizado da técnica. No entanto, o trabalho carece de uma melhor apresentação das relações laterais dos depósitos reconhecidos e delimitados em campo e da utilização dos seus dados e de exemplos de análogos que corroborem as interpretações dos estilos eruptivos e natureza do vulcanismo. Outro item que carece de importante revisão é a apresentação do item 1.3 (Estado da Arte), no qual o aluno demonstra uma grande dificuldade em focar no tema abordado neste estudo; seria esperado que o aluno viesse a discorrer sobre "estratigrafia e evolução magmática/vulcânica da ilha de Trindade"; entretanto, ele foca no tema de geodinâmica do magmatismo regional, que sequer é mencionado na introdução, objetivo, resultados e discussão do trabalho. Além disto, as questões mais pertinentes ao tema abordado nesta dissertação ficaram fora de contexto ao final deste item. As questões de petrogênese e geodinâmica estão fora de contexto do tema abordado na dissertação e estão desvinculadas com os resultados apresentados. Isto também afeta a organização das ideias do artigo que compõe o item "resultados" da dissertação.

O item "Resultados", na forma de artigo, necessita de algumas melhorias para submissão. A contextualização do tema a ser estudado precisa ser melhor desenvolvida na introdução, de forma que seja apresentada a contribuição deste trabalho para o entendimento da evolução geológica da Ilha de Trindade. Por exemplo, em nenhum momento, seja no artigo ou corpo da tese, é apresentado a existência ou não de interpretações divergentes, através de outras metodologias de trabalho, acerca dos processos vulcânicos que formaram a ilha ou da formação estudada (Formação Morro Vermelho). Isto deve ser apresentado na introdução, de forma que mostre como este trabalho contribui para esta discussão. Outro ponto a ser melhorado neste item, é a apresentação dos resultados (fácies, associação de fácies e características petrográficas), principalmente no que diz respeito à conexão dos dados petrográficos com os dados faciográficos. É preciso ser específico sobre como a petrografia ajuda no entendimento da natureza dos produtos (depósitos) vulcânicos. Figuras que vinculem as principais características petrográficas às fácies, podem ajudar.

A interpretação dos tipos eruptivos, assim como da natureza monogenética da unidade vulcânica estudada, é apresentada desvinculada dos dados. Ou seja, o aluno não apresenta um raciocínio linear que apresente como as associações de fácies e os processos interpretados para estas

permitem a interpretação dos estilos eruptivos e o caráter monogenético da Formação Morro Vermelho.

Além dos pontos destacados acima e outras menores observações ao longo do texto em PDF, o texto necessita de poucas revisões de digitação, mas necessita de uma revisão completa da numeração de figuras que esta equivocada a partir da figura 3. Em termos do conteúdo do texto, necessita de: (i) melhorias no resumo, (ii) melhorias na diferenciação do que é objetivo, métodos e recomendação para trabalhos futuros, e (iii) separar resultados e interpretação do item métodos. E, no item "4.1" sugiro a subdivisão em sub-itens: 4.1.1 - Publicação de artigo - co-autoria; 4.1.2 - Publicação de resumos e apresentação em eventos científicos – autor; e 4.1.3 - Histórico do Curso.

Assinatura:  Data: 28/02/2019

Ciente do Orientador: _____

Ciente do Aluno:

