

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

**CARACTERIZAÇÃO DE ESTRUTURAS VULCÂNICAS
ASSOCIADAS AO MAGMATISMO ÁCIDO DA PROVÍNCIA
PARANÁ-ETENDEKA, NA REGIÃO DOS APARADOS DA
SERRA, SUL DO BRASIL.**

SUSANA BENITES

ORIENTADOR – Prof. Dr. Carlos Augusto Sommer

Volume I

Porto Alegre – 2018

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

**CARACTERIZAÇÃO DE ESTRUTURAS VULCÂNICAS
ASSOCIADAS AO MAGMATISMO ÁCIDO DA PROVÍNCIA
PARANÁ-ETENDEKA, NA REGIÃO DOS APARADOS DA
SERRA, SUL DO BRASIL.**

SUSANA BENITES

ORIENTADOR – Prof. Dr. Carlos Augusto Sommer

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra. Andréa Ritter Jelinek – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

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

Prof. Dr. Ronaldo Pierosan – Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT)

Dissertação de Mestrado apresentada
como requisito parcial para a
obtenção do Título de Mestre em
Geociências.

Porto Alegre – 2018

CIP - Catalogação na Publicação

Benites, Susana

Caracterização de estruturas vulcânicas associadas ao magmatismo ácido da Província Paraná-Etendeka, na região dos Aparados da Serra, Sul do Brasil. / Susana Benites. -- 2018.

73 f.

Orientador: Carlos Augusto Sommer.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

1. Anisotropia de Susceptibilidade Magnética. 2. Morfologias vulcânicas. 3. Petrologia. 4. Geoquímica. 5. Sensoriamento Remoto. I. Sommer, Carlos Augusto, orient. II. Título.

AGRADECIMENTOS

À minha família pelo incentivo e apoio incondicional.

Ao meu orientador, o Prof. Dr. Carlos Augusto Sommer, que considero um amigo e grande professor, pela oportunidade de trabalhar nesse projeto desde a graduação e pelos ensinamentos, parceria e apoio dedicados ao longo de todo o período de desenvolvimento do mestrado.

A todos os co-autores do artigo confeccionado, Prof. Dr. Carlos A. Sommer, Prof. Dr. Evandro F. de Lima, Prof. Dr. Jairo F. Savian, Prof. Dr. Ricardo I.F. da Trindade, Geól. Thiago R. Moncinhatto e Maurício B. Haag.

Aos colegas Jonas Weschenfelder e Maurício Haag, pelo auxílio na obtenção dos dados geofísicos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geociências e ao Instituto de Geociências pela infraestrutura disponibilizada.

Ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo - USP.

Finalmente, gostaria de agradecer à Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, pelo ensino gratuito de qualidade, sem o qual essa dissertação não teria sido realizada.

RESUMO

As rochas do Grupo Serra Geral representam a porção brasileira de um dos maiores eventos vulcânicos do planeta, a Província Magmática Paraná-Etendeka, que recobre a porção centro-leste da América do Sul e o noroeste da Namíbia, na África. O magmatismo que originou o Grupo Serra Geral é predominantemente básico e está associado à tectônica distensiva que ocasionou a ruptura do continente gondwânico e a consequente abertura do Oceano Atlântico Sul, durante o Cretáceo Inferior. No entanto, a gênese dos depósitos vulcânicos ácidos continua sendo debatida. Neste estudo, as direções de fluxo magmático e magnético foram determinadas por meio do método de Anisotropia de Susceptibilidade Magnética e discutidas em conjunto com as características geomorfológicas, petrológicas e geoquímicas das unidades individualizadas, com o objetivo de caracterizar as feições geomorfológicas observadas na região dos Aparados da Serra, sul do Brasil e tecer considerações sobre a gênese e o vínculo destas estruturas à sistemas vulcânicos primários. As feições geomorfológicas foram divididas nos grupos lineares e circulares, os quais foram reclassificados em quatro unidades com base nas estruturas geológicas presentes. As unidades I e II correspondem a derrames de lavas ácidas vinculadas a erupções fissurais efusivas e têm a morfologia dômica explicada pela ação da erosão diferencial. As rochas da unidade III podem corresponder a domos vulcânicos, enquanto as rochas da unidade IV correspondem a condutos vulcânicos fissurais, sendo associados a extrusão de depósitos efusivos.

Palavras-chave: Anisotropia de Susceptibilidade Magnética; Erosão diferencial; Morfologias vulcânicas; Vulcanismo ácido.

ABSTRACT

The rocks of the Serra Geral Group represent the Brazilian portion of one of the largest volcanic events of the planet, the Paraná-Etendeka Magmatic Province, which covers the central-eastern portion of South America and northwestern Namibia in Africa. The magmatism that originated the Serra Geral Group is dominantly basic and is associated with the distensive tectonics that caused the rupture of the Gondwana continent and the consequent opening of the South Atlantic Ocean during the Lower Cretaceous. However, the genesis of silicic volcanic deposits continues to be debated. In this study, directions of magmatic and magnetic flow were determined by means of the Anisotropy of Magnetic Susceptibility method and discussed together with the geomorphological, petrological and geochemical characteristics of the individualized units, with the objective of characterizing the geomorphological features observed in the Aparados da Serra region, southern Brazil, and to weave considerations about the genesis and linkage of these structures to the primary volcanic systems. Geomorphological features were divided into linear and circular groups, which were reclassified into four units based on the observed geological structures. The units I and II correspond to silicic lavas spills linked to effusive fissural eruptions and have the morphology explained by differential erosion. The rocks of unit III can correspond to volcanic domes, whereas the rocks of unit IV correspond to fissural volcanic conduits, being associated to the extrusion of effusive deposits.

Keywords: Anisotropy of Magnetic Susceptibility; Differential Erosion; Silicic volcanism; Volcanic morphologies.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de localização da região de estudo.....	5
Figura 2: Exemplo de interação da energia eletromagnética com o objeto (Fonte: extraído de Steffen, C. A.).....	7
Figura 3: Classificação revisada das Grandes Províncias Ígneas, com base no trabalho inicial de Coffin & Eldholm, 1994. (Fonte: traduzido de Bryan & Ernst, 2008).	16
Figura 4: Distribuição das Províncias Basálticas Continentais no mundo (Fonte: traduzido de Bryan & Ernst, 2008).....	17
Figura 5: Reconstrução da PMPE durante a fase inicial de abertura da porção sul do Oceano Atlântico (Fonte: modificado de Gibson et al., 2006).....	18
Figura 6: Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná com o contorno estrutural e profundidades do embasamento cristalino. (Modificado de Milani, 2004).	20
Figura 7: Seção colunar ideal para as rochas vulcânicas ácidas do tipo Palmas (Nardy et al., 2008).	23

SUMÁRIO

<i>Sobre a Estrutura desta Dissertação:</i>	3
1. INTRODUÇÃO	4
1.1 OBJETIVOS.....	5
1.2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	5
1.3 MATERIAIS E MÉTODOS	6
1.3.1 Revisão Bibliográfica	6
1.3.2. Sensoriamento Remoto	6
1.3.2.1 LANDSAT-5	7
1.3.2.2 Google Earth	8
1.3.3 Trabalho de Campo	9
1.3.4 Petrografia	9
1.3.5 Litoquímica	10
1.3.6 Geoprocessamento	11
1.3.7 Anisotropia de Susceptibilidade Magnética - ASM	12
1.3.8 Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV	14
1.4 ESTADO DA ARTE	15
1.4.1. As Grandes Províncias Ígneas	15
1.4.2. As Províncias Basálticas Continentais	16
1.4.4. A Bacia do Paraná	18
1.4.5. O Grupo Serra Geral	20
1.5 REFERÊNCIAS.....	28
2. ARTIGO SUBMETIDO	38
ANEXO A – Tabela contendo os dados de litoquímica	67
ANEXO B – Tabelas contendo os dados de ASM	69

Sobre a Estrutura desta Dissertação:

Esta dissertação de mestrado está estruturada em torno de um artigo científico. Consequentemente, sua organização compreende as seguintes partes principais:

a) Introdução sobre o tema e descrição do objeto da pesquisa de mestrado, onde estão sumarizados os objetivos e o estado da arte sobre o tema de pesquisa;

b) Artigo submetido para publicação na revista Anais da Academia Brasileira de Ciências, que possui corpo editorial permanente e revisores independentes.

c) Anexos, compreendendo: ANEXO A contendo uma tabela com os resultados das análises químicas de rocha total e ANEXO B contendo duas tabelas com os dados de Anisotropia de Susceptibilidade Magnética – ASM.

1. INTRODUÇÃO

O Grupo Serra Geral – GSG representa a porção brasileira de um dos maiores eventos vulcânicos do planeta, a Província Magmática Paraná-Etendeka (PMPE), a qual está associada à tectônica distensiva que ocasionou a ruptura do continente gondwânico e a consequente abertura do Oceano Atlântico Sul, durante o Cretáceo Inferior (Peate, 1997). O magmatismo é predominantemente básico (97,5%), com derrames e domos ácidos predominando nas unidades superiores desta sequência vulcânica (Melfi, 1988; Lima *et al.*, 2012; Waichel *et al.*, 2012).

Em relação ao magmatismo ácido, a origem desses depósitos na PMPE ainda é tema de discussão. Algumas características podem sugerir extensos depósitos de lavas ácidas de alta temperatura (Comin-Chiaramonti, 1988; Bellieni *et al.*, 1988; Henry & Wolff, 1992; Umann *et al.*, 2001; Lima *et al.*, 2012a; Lucchetti *et al.*, 2014; Polo & Janasi, 2014; Simões *et al.*, 2014, 2017; Guimarães *et al.*, 2018; Polo *et al.*, 2017a, Polo *et al.*, 2017b), bem como depósitos gerados por colunas piroclásticas de alta temperatura, que passaram por intensa soldagem (Petrini *et al.*, 1989; Whittingham, 1989; Roisenberg, 1989; Milner *et al.*, 1992; Milner *et al.*, 1995; Wildner *et al.*, 2006; Riccomini *et al.*, 2016).

A pequena proporção entre espessura e extensão lateral tem sido usada como um forte argumento para a origem piroclástica das unidades ácidas. No entanto, a ausência de estruturas e texturas piroclásticas preservadas na base das sucessões aponta para origem por fluxos de lava. As texturas e estruturas presentes em depósitos convencionais comumente apresentam características suficientes para a distinção entre fluxos piroclásticos e fluxos de lavas. Contudo, se torna mais difícil fazer a discriminação entre lavas ácidas de alta temperatura de tufos reomórficos de alta temperatura e de ignimbritos do tipo lava-like (Henry & Wolff, 1992).

Nesta dissertação, serão apresentados os resultados de um estudo integrado envolvendo a análise de características geomorfológicas e de dados petrológicos e geoquímicos, que foram correlacionados com as principais direções de fluxo magmático e magnético, obtidos através da técnica de Anisotropia de Susceptibilidade Magnética - ASM aplicada às rochas vulcânicas ácidas da região dos Aparados da Serra, com o objetivo de tecer considerações sobre a gênese e o vínculo destas estruturas à sistemas vulcânicos primários.

1.1 OBJETIVOS

Este estudo pretende aprofundar a investigação das estruturas vulcânicas observadas na região dos Aparados da Serra, nordeste do Rio Grande do Sul, focando em aspectos geofísicos. Mais especificamente inclui as seguintes metas:

- I. Definir o sentido de fluxo magmático das estruturas vulcânicas vinculadas ao magmatismo ácido do Grupo Serra Geral;
- II. Confirmar a presença de domos vulcânicos e de condutos alimentadores na região;
- III. Contribuir para a compreensão do modo de colocação dos pacotes ácidos e determinação da gênese da porção ácida do Grupo Serra Geral.

1.2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo (Fig. 1) localiza-se na região conhecida como Aparados da Serra, no nordeste do estado do Rio Grande do Sul e abrange os municípios de Bom Jesus, São José dos Ausentes e Cambará do Sul.

O principal acesso até a região, partindo-se de Porto Alegre, é feito pela RS-020, por cerca de 240 km.

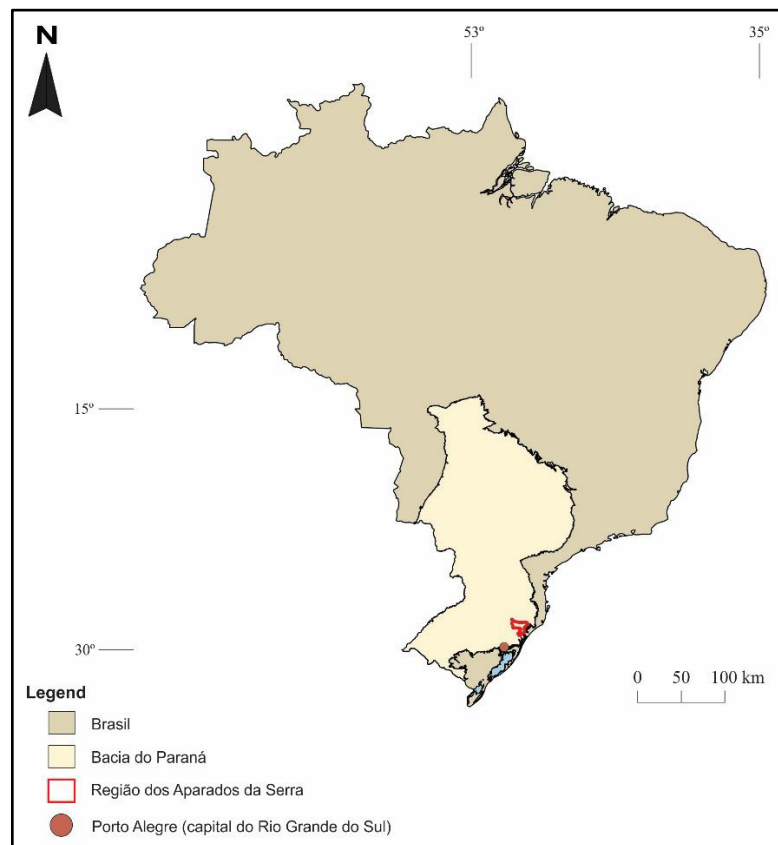


Figura 1: Mapa de localização da região de estudo.

1.3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os materiais, equipamentos, técnicas e métodos de trabalho utilizados para a obtenção dos dados.

ETAPA PRÉ-CAMPO

A metodologia de trabalho nesta etapa consistiu em revisão bibliográfica, aquisição e tratamento de imagens de satélite e seleção de feições geomorfológicas características.

1.3.1 Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica foi realizada com o objetivo de reunir o máximo de informações já publicadas sobre o Grupo Serra Geral. Para isso, foram utilizados livros, periódicos científicos, resumos publicados em anais de eventos, teses, dissertações, monografias e informações adicionais disponíveis sobre os tópicos abordados neste trabalho, e compilados dados como mapas e figuras relativas ao contexto geológico regional da área estudada.

1.3.2. Sensoriamento Remoto

Sensoriamento Remoto (SR) é o conjunto de atividades que permitem a obtenção de informações dos objetos que compõem a superfície terrestre por meio da captação e do registro da energia refletida ou emitida (Florenzano, 2002). Depende de uma fonte de energia que irá interagir com o alvo (objeto, área ou fenômeno que será imageado) e será registrada pelo sensor, que é o equipamento com capacidade de coletar a energia proveniente do alvo (Chuvieco, 1990). A energia eletromagnética se move na forma de ondas eletromagnéticas à velocidade da luz (300.000 km/s) e não precisa de um meio material para se propagar (Moraes, 2002).

O Sol e a Terra são as duas principais fontes naturais de energia eletromagnética utilizadas no sensoriamento remoto da superfície terrestre. Quando a fonte de energia eletromagnética é o Sol, os sensores detectam a energia refletida pelos objetos terrestres e o sensoriamento remoto é realizado na faixa do espectro solar. Quando a fonte de energia eletromagnética é a Terra, os sensores detectam a energia emitida pelos corpos terrestres e o sensoriamento remoto é realizado na faixa do espectro termal. Esta distinção torna possível o tratamento separado desses dois

tipos de energia eletromagnética, facilitando a análise da energia Radiante (Moraes, 2002).

Os objetos interagem de maneira diferenciada com a energia eletromagnética incidente, devido às diferentes propriedades físico-químicas e biológicas (Fig. 2). Portanto, cada material possui absorções e reflectâncias distintas e assim, cada alvo terrestre terá sua própria assinatura espectral (Moraes, 2002).

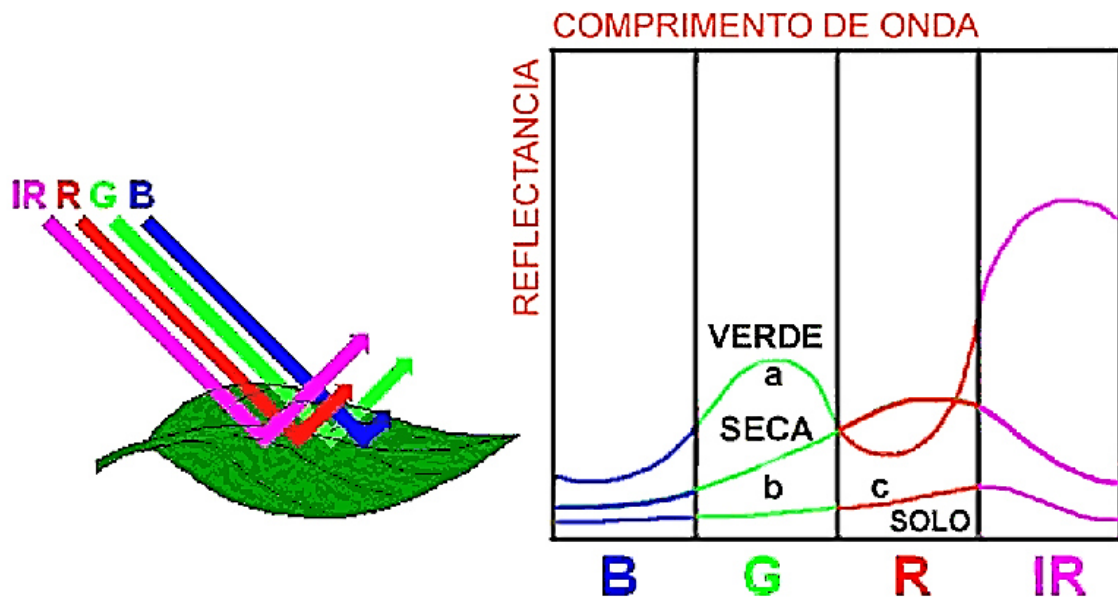


Figura 2: Exemplo de interação da energia eletromagnética com o objeto (Fonte: extraído de Steffen, C. A.).

1.3.2.1 LANDSAT-5

O sistema LANDSAT (LAND SATellite) foi o primeiro a obter de forma sistemática, imagens terrestres sinópticas de média resolução. Desenvolvida pela NASA, a série de satélites LANDSAT iniciou sua operação em 1972. Cada órbita do LANDSAT cobre uma faixa no terreno de 185 km de largura, com uma dimensão de pixel de 30 m. As imagens LANDSAT utilizam 8 bits para cada pixel, portanto, o máximo valor numérico de um pixel destas imagens é 255. Desta maneira, a intensidade da radiação eletromagnética (REM) é quantificada, na imagem LANDSAT, em valores entre 0 e 255 (Moraes, 2002).

O processamento de imagens visa facilitar a identificação e a extração das informações contidas nas imagens, para posterior interpretação. O sucesso dessa operação depende, fundamentalmente, de como os materiais - rocha, solo, vegetação, água, e alvos urbanos evidenciam os contrastes destas propriedades texturais e

espectrais, nas diferentes bandas espectrais de um sensor. Os contrastes entre os objetos nem sempre são totalmente percebidos pelo intérprete, porque com frequência, as variações de cinza dos pixels das imagens são restritas a uma pequena diferença digital (Crosta, 1992).

Neste estudo, o Processamento Digital de Imagens foi realizado com auxílio do software ENVI 4.5 e incluiu correção atmosférica e combinação de bandas para criar composições coloridas. Composições coloridas sintetizam em uma única imagem a informação contida em três bandas escolhidas para constituir o triplete (Perrotta, 2005). As bandas são atribuídas respectivamente aos canais RGB (vermelho, verde e azul). Para análise de lineamentos estruturais em escala regional, foram observadas imagens LANDSAT-5 nas composições R5G4B3 e R5G4B7, por apresentarem o melhor resultado visual e serem tradicionalmente usadas em geologia.

1.3.2.2 Google Earth

O Google Earth é o programa mais popular para visualização da Terra em 3D, sendo usado atualmente por empresas, universidades, órgãos governamentais e mesmo em casa, para as mais diversas finalidades.

Em geral, a resolução do programa é de 15 metros, mas já existem locais com resolução de um metro ou melhor. A fonte da base altimétrica do Google Earth, que permite visualizar os acidentes naturais em perspectiva, é a Missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) da NASA, formada por uma grade quadriculada com 90 metros de lado, e erro médio das altitudes de cinco a dez metros.

Com o auxílio do programa Google Earth Pro[®], foram observadas imagens aéreas para identificação de feições geomorfológicas que pudessem corresponder a estruturas vulcânicas. Por meio destes dados, foi feita a seleção de áreas-alvo, com o objetivo de escolher as melhores estruturas a serem verificadas em campo. Apesar de apresentar um erro médio de 20 metros, o sistema se mostrou válido, uma vez que as estruturas investigadas apresentam grandes dimensões.

ETAPA DE CAMPO

A etapa de campo foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho, tendo em vista que os principais aspectos abordados requerem a confirmação das feições geomorfológicas individualizadas durante a análise das imagens, além de

amostragem, descrições de rocha, medição de estruturas e análise das relações estratigráficas.

1.3.3 Trabalho de Campo

Os trabalhos de campo tiveram como objetivo principal a verificação dos alvos selecionados com auxílio do Google Earth Pro[®]. Foram realizados entre os dias 11 e 13 de setembro de 2014, 16 e 19 de abril de 2015 e 17 e 18 de janeiro de 2017, sendo visitados 45 afloramentos, o que resultou na coleta de 66 amostras para laminação e litogeoquímica, além de 185 espécimes para ASM distribuídos em 6 sítios diferentes. Os pontos foram georreferenciados com um receptor GPS, usando o sistema de coordenadas UTM, no *datum* WGS-84, que foi escolhido por ser o mesmo *datum* empregado pelos satélites LANDSAT e Google Earth.

As seguintes cartas, confeccionadas pelo Exército em escala 1:50.000, foram utilizadas: Itaimbezinho (Folha SH.22-X-A-IV-2 e MI-2937/2), Bom Jesus (Folha SH.22-X-A-V-1 e MI-2938/1), São José dos Ausentes (Folha SH.22-Z-A-V-2 e MI-2938/2), Silveira (Folha SH.22-X-A-VI-1 e MI-2939/1), Jacinto Machado (Folha SH.22-X-A-VI-3 e MI-2939/3), Vila Santana (Folha SH.22-X-A-V-4 e MI-2938/4), Jaquirana (Folha SH.22-XA-V/3 e MI-2938-3), Várzea do Cedro (Folha SH.22-X-C-II-1 e MI-2955/1) e Cambará do Sul (Folha SH.22-X-C-II-2 e MI-2955/2).

Para as medidas estruturais, foram utilizadas as bússolas Silva e Clar, sendo utilizada a notação de trama.

ETAPA DE LABORATÓRIO

Esta fase envolveu o trabalho de laboratório, onde foram desenvolvidos os estudos petrográficos, litogeoquímicos e geofísicos a partir das amostras coletadas durante a etapa de campo, além da digitalização de dados obtidos em campo, geoprocessamento e confecção de um mapa SIG da região dos Aparados da Serra.

1.3.4 Petrografia

Foram confeccionadas 17 lâminas petrográficas no Laboratório de Preparação de Amostras do Instituto de Geociências/UFRGS e 05 lâminas no Laboratório de Laminação Petrográfica da UNISINOS. Primeiro, as amostras foram serradas e cortadas em fatias retangulares de aproximadamente 1 cm de espessura denominada esquírola, após, esta fatia foi desbastada com lixas de diferentes granulações (120,

220, 600, 1.200, 2.500 e 4.000 grana) e submetida a processos de abrasão com abrasivos progressivamente mais finos, a base de carbetto de silício (900 μm) e óxido de alumínio (9,5 μm). O polimento foi feito através da politriz, com uma frequência de 100 rotações por minuto (rpm), durante 5 minutos, com a utilização de um abrasivo a base de alumina (0,3 μm). Ao final destes procedimentos, a fatia de rocha colada no vidro se encontra com a espessura correta (0,03 mm) para a observação ao microscópio petrográfico de luz transmitida.

As descrições petrográficas e fotomicrografias foram realizadas junto ao Departamento de Mineralogia e Petrologia (DEMIPE) do Instituto de Geociências (IGEO) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). As lâminas delgadas foram descritas com o auxílio de um microscópio petrográfico binocular de luz transmitida da marca Meiji Techno, modelo ML9720, e com seis possibilidades de lentes de aumento: 1,25x, 2,5x, 4x, 10x, 20x e 40x. As fotomicrografias foram adquiridas por uma câmera acoplada a um microscópio petrográfico de luz transmitida da marca Leica e à um computador. Ao total, foram descritas 22 lâminas delgadas.

Para as descrições de lâminas, foram utilizadas as técnicas de luz natural e luz polarizada, sendo empregados os critérios petrográficos baseados principalmente em Kerr (1977), Sial (1984) e Mcphie *et al.* (1993).

O principal objetivo das descrições petrográficas foi a caracterização dos litotipos vulcânicos de acordo com as unidades individualizadas, segundo suas principais características minerais, estruturais e texturais, além de comparação com as características das rochas da região descritas na literatura.

1.3.5 Litoquímica

A primeira etapa da preparação das amostras foi realizada no Laboratório de Preparação de Amostras do Instituto de Geociências, para posterior envio ao *Acme Analytical Laboratories Ltda.*, localizado em Vancouver, no Canadá, onde foram realizadas as análises de rocha total.

As amostras foram quebradas em tamanhos de (10x10x10cm) aproximadamente. Então, foi utilizada uma prensa hidráulica para fragmentar as amostras em pedaços menores. Após isso, estes fragmentos foram reduzidos mais uma vez com o auxílio do almofariz (gral) de ágata com pistilo. Posteriormente, a amostra foi quarteada e encaminhada para a pulverização em um pulverizador (moinho) de bolas de ágata, permitindo assim, a obtenção de frações inferiores à 200

mesh, estando apta a análises químicas nos equipamentos adequados, descritos a seguir. Nesta etapa, tomou-se cuidado na limpeza dos equipamentos após a preparação de cada amostra, devido ao alto risco de contaminação.

A técnica de análise por ICP-AES foi utilizada para a quantificação de elementos maiores (Si, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, Ti, P), com limite de detecção de 0,01% e alguns elementos traço (Sc, Be, V, Ba, Sr, Y e Zr), com limite de detecção variando de 1 até 5 ppm. A precisão é de 0,3 a 2%.

A técnica de análise por ICP-MS foi utilizada para a quantificação dos demais elementos traço e elementos terras raras (ETR), com limite de detecção de 0,005 a 2 ppm.

Os resultados das análises químicas de rocha total são mostrados na Tabela 1 do ANEXO A.

Para o tratamento dos dados e elaboração dos diagramas de classificação, foi utilizado o software *Geochemical Data Toolkit* (GCDKit®), versão 2.3, elaborado por Janoušek *et al.* (2004). O software GCDKit é um programa para a manipulação e recálculo de dados geoquímicos de rochas ígneas e metamórficas.

A geração destes diagramas permitiu classificar os litotipos de acordo com sua composição química e, de uma maneira geral, o magmatismo quanto a sua afinidade química.

1.3.6 Geoprocessamento

Geoprocessamento pode ser definido como uma tecnologia, isto é, um conjunto de conceitos, métodos e técnicas que permitem a realização de análises complexas ao integrar dados de diversas fontes e ao criar banco de dados georreferenciados (Silva & Zaidan, 2011). Utiliza diversas ferramentas, como por exemplo, o SIG (Sistemas de Informações Geográficas). Um SIG é um sistema dedicado ao tratamento de dados geográficos capaz de armazenar, manipular, visualizar e editar grandes quantidades de dados estruturados em um banco de dados. O projeto em um SIG é usualmente composto por um conjunto de Planos de Informação (PI's), que podem ser imagens de satélite, fotografias aéreas, mapas, banco de dados e aplicativos específicos (Câmara & Monteiro, 2004).

Para o desenvolvimento deste projeto, foram utilizados os softwares ArcGis 10.3.1 (desenvolvido pela ESRI) e QGis 2.18.14 (desenvolvido pela OSGeo) para montar a plataforma do SIG. Esses softwares manipulam dados geográficos armazenados, com ou sem extensão espacial e permitem trabalhar com formatos de

dados do tipo *shapefiles*, possibilitando o vínculo com banco de dados externos. As tabelas de atributos contêm todas as informações de cada feição que se quer representar em mapa e esses sistemas permitem a produção de mapas com alta qualidade gráfica.

1.3.7 Anisotropia de Susceptibilidade Magnética - ASM

Uma parte importante do estudo paleomagnético é a investigação de como a rocha adquiriu a magnetização, qual(uais) mineral(is) portador(es) dessa magnetização, e quais são as características desse(s) mineral(is). A identificação dos minerais magnéticos portadores da Anisotropia de Susceptibilidade Magnética - ASM nas rochas é feita através de experimentos que estudam as propriedades magnéticas das rochas e de observações petrográficas.

Trabalhos recentes têm aplicado essa técnica a sistemas vulcânicos ácidos, possibilitando a reconstrução de ambientes vulcânicos, como domos relacionados a colapsos de caldeiras e sistemas fissurais associados a grandes províncias ígneas. Nesses trabalhos foram constatadas boas relações entre os planos e linhas de foliação com as direções da susceptibilidade média máxima, de susceptibilidade média intermediária e o plano que contém as direções de susceptibilidade máxima e intermediária. A homogeneidade reológica dos fluxos de lava amostrados permitiu interpretar o fluxo magmático diretamente a partir das foliações magnéticas e das direções k_{max} e a orientação aleatória da trama magnética que reflete em uma alta dispersão dos dados dos eixos k_{max} , k_{min} e k_{int} seria resultado de padrões de fluxo magmáticos muito complexos (Simões *et al.*, 2018), como o intenso dobramento na mistura de dois líquidos (Ottino, 1989), severas mudanças pós-magmáticas em minerais magnéticos (Hrouda, 1985; Raposo, 2011) e mudanças nas condições de *stress* dentro do magma em movimento, gerando várias fases de dobramento. Já domos e fluxos de lava ácida podem exibir eixos k_{min} quase verticais (Cañon-Tapia & Castro, 2004), k_{max} de alto ângulo e k_{max} - k_{int} horizontais (Mcphie *et al.*, 2008), e também podem exibir zoneamento da trama com k_{max} com alto ângulo próximo da zona de conduto e k_{max} horizontal nas bordas do fluxo (Závada *et al.*, 2009) ou inclinação das estruturas originais por Colapso (Pueyo Anchuela *et al.*, 2014). A disposição plana da foliação magnética em lavas indica fluxo magmático predominantemente horizontal. A distinção entre condutos e lavas é encontrada em estruturas de campo, texturas microscópicas e na orientação da fábrica magnética. Os condutos têm uma maior dispersão dos dados de ASM e podem ter k_{max} horizontal

ou localmente vertical, mas a complexidade do comportamento reológico ao longo dos condutos dividiu esses sistemas em diferentes domínios de fluxo de magma. Nas lavas, os valores de k_{\max} horizontais associados a foliações magnéticas horizontais são um padrão comum (Simões *et al.*, 2018).

Para a aplicação da técnica de ASM foram selecionadas feições geomorfológicas de destaque, onde foram definidos 6 sítios representativos. Para a coleta dos 64 testemunhos cilíndricos com 2,5 cm de diâmetro foi utilizada uma perfuratriz portátil, com broca diamantada. Estes cilindros foram devidamente orientados com auxílio de uma bússola magnética, e sempre que possível, com bússola solar. Em laboratório, os cilindros foram cortados em espécimes padrão com 2,5 cm de diâmetro e 2,2 cm de altura, totalizando 185 espécimes para medidas de ASM, realizadas com auxílio do susceptímetro MKF1A *Multifuction* KAPPABRIDGE, no Laboratório de Paleomagnetismo e Geomagnetismo do IAG-USP. A aquisição e análise dos dados foi feita através dos softwares SUFAR e ANISOFT 5.

Para identificação dos minerais magnéticos foram realizadas curvas termomagnéticas que fornecem a temperatura de Curie e/ou Néel dos mesmos, curvas de aquisição de magnetização remanescente (MRI) e curvas de histerese.

Para a obtenção das curvas termomagnéticas, foi medida a susceptibilidade magnética em baixo campo em função da temperatura. Para obtenção das medidas, as amostras são transformadas em pó e aquecidas progressivamente até 600°C, logo em seguida são resfriadas até a temperatura ambiente, utilizando um susceptímetro Kappabridge (KLY-4) da AGICO. Se as curvas de aquecimento e resfriamento forem semelhantes, então é dito que a curva é reversível e não houve transformação mineralógica.

Para a obtenção das curvas de aquisição de magnetização remanescente e de histerese foi utilizado o magnetômetro de amostra vibrante MicroMag 3900, pertencente ao USPMag. Para tais medidas as amostras são cortadas em pequenos cubos para serem usadas no porta-amostra do equipamento. O procedimento consiste em medir a magnetização induzida na amostra por um campo magnético que varia até 1 T (Tesla), podendo ser revertido para produzir um ciclo de histerese completo. Através das curvas de histerese obtemos os valores da magnetização de saturação (M_s), magnetização remanente de saturação (M_{rs}) e coercividade (H_c) dos minerais magnéticos da rocha. Com o mesmo equipamento, induzimos a MRI na amostra através de um campo magnético que aumenta progressivamente em cada etapa, até

a saturação e posterior *back-field* para a obtenção da coercividade de remanência (H_{cr}). A partir destes resultados das curvas de histerese e MRI é possível construir um diagrama de M_{rs}/M_s versus H_{cr}/H_c , proposto por Day *et al.* (1977) e adaptado por Dunlop (2002). Neste diagrama, conhecido como diagrama de Day, é possível determinar a estrutura de domínio da amostra.

As medidas do tensor de segunda ordem da ASM são obtidas para os espécimes através da medida em 3 posições perpendiculares entre si (K_1 , K_2 e K_3) e os resultados direcionais de ASM são expressos através de estereogramas em equiárea. Utilizando o software ANISOFT 5 foi aplicada uma análise estatística de *bootstrap* aos dados, permitindo uma melhor visualização dos eixos K_1 , K_2 e K_3 do tensor magnético e, dessa forma, possibilitando determinar com maior confiabilidade a atitude do tensor e o sentido de movimento das lavas.

Os resultados obtidos são mostrados nas Tabelas 2 e 3 do ANEXO B.

1.3.8 Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV

O método consiste na utilização de um feixe de elétrons que “varre” a superfície da amostra ponto a ponto e transmite o sinal do detector a uma tela catódica. Esse feixe eletrônico é produzido por um filamento de tungstênio, aquecido através da diferença de potencial gerada pela variação na aceleração dos elétrons, e então, é demagnificado por lentes eletromagnéticas, produzindo-se um feixe focado e com pequeno diâmetro, em determinada região do material, o que irá gerar uma imagem virtual da amostra em análise (Reed, 1996).

A interação dos elétrons com a amostra pode se dar através da interação inelástica de elétrons de baixa energia com a superfície da amostra, produzindo imagens de alta resolução que permitem a montagem de uma imagem aparentemente tridimensional da superfície dos constituintes, ou da excitação de elétrons dos minerais, que migram para camadas mais externas ou são arrancados, liberando energia em forma de raios-X específicos, o que permite a identificação dos elementos e sua concentração nos constituintes da amostra através da espectrometria da energia dispersada (EDS).

A técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi realizada no Laboratório de Geologia Isotópica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LGI-UFRGS), utilizando um microscópio eletrônico JSM 5800 (Jeol) operado a 15kV. Foi aplicada com o objetivo de determinar o hábito e a distribuição dos minerais

magnéticos, bem como obter os elementos presentes através de *Energy Dispersive Spectroscopy* (EDS).

1.4 ESTADO DA ARTE

Neste capítulo, será apresentada uma breve revisão bibliográfica, abordando os seguintes assuntos: as Grandes Províncias Ígneas, as Províncias Basálticas Continentais, a Província Magmática Paraná-Etendeka, a Bacia do Paraná e o Grupo Serra Geral.

1.4.1. As Grandes Províncias Ígneas

As Grandes Províncias Ígneas, também denominadas LIP's (*Large Igneous Provinces*) são formadas a partir de anômalos eventos ígneos de curta duração, resultando em rápida acumulação de um grande volume ($> 1000 \text{ Km}^3$) de rochas extrusivas e intrusivas (Coffin & Eldholm, 1992, 1994). Essa erupção brusca e volumosa em regiões continentais estáveis torna eventos LIP tão distintos, uma vez que, muitas das erupções (70-90%) são produzidas durante um ou dois principais pulsos de atividade eruptiva e o pulso (ou pulsos), ou mesmo toda a duração da atividade na LIP, pode ser muito breve geologicamente (inferior a 5 Ma), e possivelmente inferior a 1 Ma em alguns casos (Rampino & Stothers, 1988; Courtillot & Renne, 2003; Kelley, 2007; Bryan & Ernst, 2008; Chenet *et al.*, 2009).

Segundo os trabalhos de Coffin e Eldholm (1994) e de Bryan e Ernst (2008), as LIP's podem ser oceânicas ou continentais (Fig. 3). As LIP's oceânicas se dividem em Platôs Oceânicos e Basaltos de Assoalho Oceânico. As LIP's continentais se dividem em Províncias Basálticas Continentais (Siberian, Karoo, Paraná-Etendeka, Deccan, Afro-Arabia, Columbia River), Enxames de Diques Continentais, *Sills* e Complexos Intrusivos Máficos e Ultramáficos (Mackenzie, Warakurna, Bushveld), Greenstone Belts Arqueanos (Superior, Yilgarn, Bulawayan, Rae), Margens de Riftes Vulcânicos (Atlântico Norte), LIPs Ácidas (Whitsunday, Chon Aike, Sierra Madre Ocidental).



Figura 3: Classificação revisada das Grandes Províncias Ígneas, com base no trabalho inicial de Coffin & Eldholm, 1994. (Fonte: traduzido de Bryan & Ernst, 2008).

As LIP's continentais são principalmente províncias magmáticas máficas, normalmente vinculadas a ambientes tectônicos distensivos materializados pela associação comum com enxames de diques máficos, tendo componentes ultramáficos e ácidos geralmente subordinados. As rochas ígneas ácidas são predominantes nas províncias basálticas continentais do Mesozoico-Cenozoico e ao longo de margens passivas. Nestas LIPs, rochas vulcanoclásticas e vulcânicas ácidas podem formar partes substanciais da estratigrafia eruptiva e representam uma significativa contribuição para a produção magmática total de uma LIP (Bryan *et al.*, 2002).

1.4.2. As Províncias Basálticas Continentais

As Províncias Basálticas Continentais – PCB's resultam da extrusão de enormes volumes de lava de composições predominantemente toleíticas (Coffin & Eldholm, 1992), em períodos de tempo relativamente curtos (Self *et al.*, 1998), através de fissuras na crosta continental e são claramente associadas com tectônicas extensionais que aparecem como consequência de estiramento litosférico associado à subida de material mantélico quente e profundo. Em muitas PBC's, os basaltos ocorrem associados com magmas ácidos (riolitos) em uma associação bimodal com

raras composições intermediárias. Essas províncias estão distribuídas em todos os continentes do globo (Fig. 4), com expressão areal significativa, destacando-se as Províncias Paraná-Etendeka, Columbia River, Deccan, Siberian Traps e Karoo.

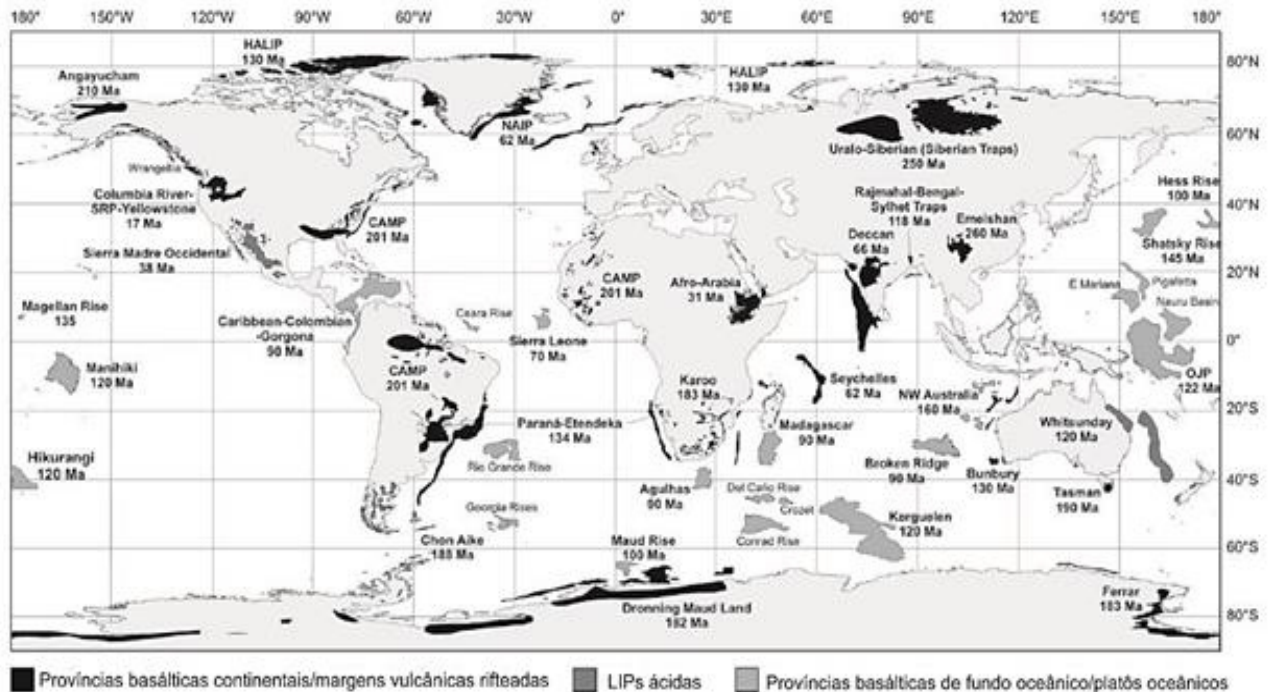


Figura 4: Distribuição das Províncias Basálticas Continentais no mundo (Fonte: traduzido de Bryan & Ernst, 2008).

1.4.3. A Província Magmática Paraná-Etendeka - PMPE

A Província Magmática Paraná-Etendeka (PMPE) está associada à tectônica distensiva que ocasionou a abertura do Oceano Atlântico Sul (Peate, 1997), devido à ruptura do continente gondwânico, no Cretáceo Inferior (Fig. 5). Possui cerca de 90% de sua área localizada no continente Sul Americano, recobrimdo uma área de 1.200.000 km² no Brasil, extremo leste do Paraguai, nordeste da Argentina e parte ocidental do Uruguai e o restante no continente africano, cobrindo uma área de cerca de 0,8 x 10⁵ km² no noroeste da Namíbia (Cordani & Vandomos, 1967; Erlank *et al.*, 1984; Melfi *et al.*, 1988). No território brasileiro, ocupa os estados do Rio Grande do Sul, Paraná, Santa Catarina, São Paulo, sudoeste de Minas Gerais, sudeste do Mato Grosso do Sul, sul de Goiás e sudeste do Mato Grosso.

No Brasil, essas rochas são representadas pelo Grupo Serra Geral (GSG) na estratigrafia da Bacia do Paraná, que muitas vezes é denominada Vulcanismo Serra

Geral. Este vulcanismo é considerado uma das maiores manifestações vulcânicas máficas continentais do planeta (Milani, 2004; Milani *et al.*, 2007).

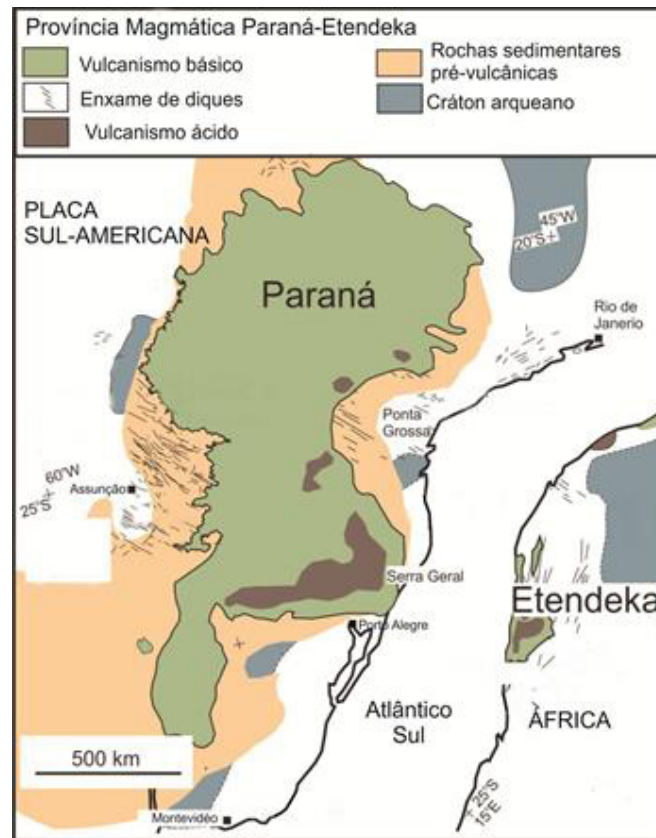


Figura 5: Reconstrução da PMPE durante a fase inicial de abertura da porção sul do Oceano Atlântico (Fonte: modificado de Gibson *et al.*, 2006).

1.4.4. A Bacia do Paraná

A Bacia do Paraná é uma bacia intracontinental (Fúlfaro *et al.*, 1982), de forma alongada segundo SW-NE, que ocupa parte dos territórios do Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai (Zalán *et al.*, 1990), tendo registro de rochas sedimentares e vulcânicas de idades que variam do Neo-Ordoviciano ao Neo-Cretáceo (Milani, 1997).

De acordo com Zalán *et al.* (1990), a estruturação da bacia está relacionada com o fim do Ciclo Brasileiro, sendo em sua maior parte, controlada por direções herdadas do embasamento, representadas por falhas ou zonas de falhas. Os lineamentos encontram-se distribuídos em duas direções principais. O primeiro com direção NW-SE, formando extensas zonas de falhas, é considerado responsável pela delimitação dos depocentros formados durante a evolução da bacia. O outro conjunto com direção NE-SW é representado por zonas de fraqueza reativadas durante a evolução da bacia, estando intimamente relacionadas com o arcabouço tectônico das faixas móveis Ribeira e Dom Feliciano. Um terceiro grupo de estruturas com direção

E-W estaria vinculado à propagação dos esforços decorrentes da abertura do Atlântico Sul durante o triássico.

Com base no controle tectônico da sedimentação, o registro estratigráfico desta bacia consiste basicamente de cinco supersequências deposicionais principais: Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano), Paraná (Devoniano), Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico), Gondwana II (Meso a Neotriássico), Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo). A Supersequência Gondwana III corresponde à Bacia Serra Geral, que compreende as formações Botucatu e Serra Geral, reunidas no Grupo São Bento (Milani, 1997).

O preenchimento sedimentar da Bacia do Paraná é predominantemente siliciclástico, sendo capeado pelas rochas vulcânicas do Grupo Serra Geral. Na parte sul da bacia, os derrames foram depositados principalmente sobre os arenitos da Formação Botucatu, preservando localmente morfologias originais de dunas e feições sedimentares, indicando contemporaneidade entre os primeiros episódios vulcânicos e o sistema eólico ativo desta unidade (Scherer, 2002; Waichel *et al.*, 2008). Também ocorreu significativa atividade ígnea intrusiva associada, que é representada por *sills* e diques. As rochas vulcânicas ocupam uma área de aproximadamente 917.000 km², com um volume de cerca de 450.000 km³. O volume referente aos corpos intrusivos do tipo soleira é de pelo menos 112.000 km³ (Frank *et al.*, 2009).

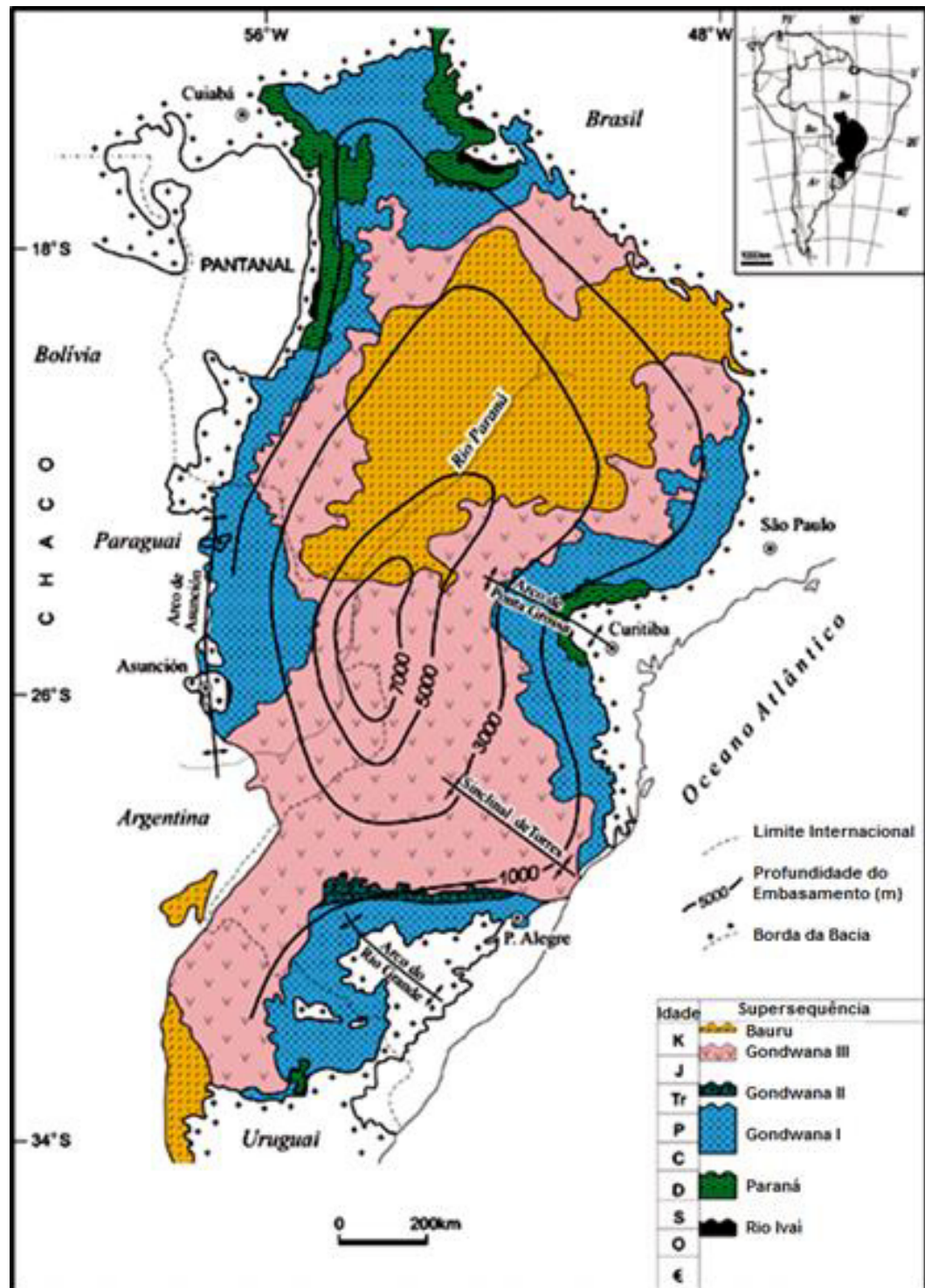


Figura 6: Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná com o contorno estrutural e profundidades do embasamento cristalino. (Modificado de Milani, 2004).

1.4.5. O Grupo Serra Geral

O Grupo Serra Geral - GSG é caracterizado por uma sequência de derrames predominantemente basálticos e andesi-basálticos de afinidade toleítica, que possuem espessura máxima de 1.700 metros. Derrames e domos ácidos são predominantes nas unidades superiores desta sequência vulcânica (Melfi, 1988; Lima

et al., 2012; Waichel *et al.*, 2012). Os diques afloram praticamente por todos os limites da província, enquanto os sills aflorantes estão mais concentrados no limite nordeste. São ainda conhecidas ocorrências de fácies magmáticas efusivas na forma de depósitos piroclásticos em regiões restritas no sudoeste do Paraná (Wildner *et al.*, 2006).

O Grupo Serra Geral é constituído essencialmente por três litotipos facilmente reconhecíveis através de suas características petrográficas e geoquímicas (Bellieni *et al.*, 1986b; Piccirillo *et al.*, 1988; Nardy, 1995; Nardy *et al.*, 2002). São eles:

I) Porção básica, composta por rochas basálticas e andesi-basálticas toleíticas (Comin-Chiaramonti *et al.*, 1988), com coloração cinza escura e negra, maciças ou vesiculares, afíricas, subfaneríticas de granulação variando de média a densa, sendo predominante a textura intergranular.

II) Rochas ácidas do tipo Chapecó, representadas por dacitos, riodacitos, quartzo latitos e riolitos, hipohialinas, porfiríticas a fortemente porfiríticas, com fenocristais de plagioclásio com até 2 cm de comprimento.

III) Rochas ácidas do tipo Palmas, representadas por riolitos e riodacitos, tipicamente afíricas, com textura “sal-e-pimenta”, hipohialinas a hemihialinas.

Esses litotipos apresentam um padrão de distribuição geográfica baseado em dados químicos (Melfi *et al.*, 1988; Bellieni *et al.*, 1984; Mantovani *et al.*, 1985; Piccirillo *et al.*, 1989; Marques *et al.*, 1989). Na parte norte da província predominam basaltos com maior quantidade de titânio ($\text{TiO}_2 \geq 2\%$) e elementos incompatíveis (Sr, Y e Zr), e conseqüentemente, foi denominada subprovíncia Alto Ti (ATi). Nesta subprovíncia, foram definidos os magmas-tipo Ribeira ($\text{TiO}_2 < 2\%$; $200 < \text{Sr} < 375$ ppm; $\text{Ti}/\text{Y} > 310$), Paranapanema ($2 < \text{TiO}_2 < 3\%$; $200 < \text{Sr} < 450$ ppm; $\text{Ti}/\text{Y} > 330$), Pitanga ($\text{TiO}_2 > 3\%$; $\text{Sr} > 350$ ppm; $\text{Ti}/\text{Y} > 350$) e Urubici ($\text{Ti} > 3\%$; $\text{Sr} > 550$ ppm; $\text{Ti}/\text{Y} > 500$), com base principalmente na abundância de elementos-traço e razões entre estes (Peate *et al.*, 1992; Peate, 1997), apesar de compreenderem uma vasta gama de conteúdo de TiO_2 (1,5 - 4,1% em peso). Estes magmas-tipo ocorrem juntamente com ácidas do tipo Chapecó (Piccirillo *et al.*, 1988). As rochas do tipo Chapecó foram subdivididas em Guarapuava ($64,3 < \text{SiO}_2 < 66,3\%$; $\text{TiO}_2 > 1,47\%$; $0,7055 < {}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr} < 0,7060$), Tamarana ($65 < \text{SiO}_2 < 66\%$; $1,29 < \text{TiO}_2 < 1,47$; $0,7060 < {}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr} < 0,7070$) e Ourinhos ($65 < \text{SiO}_2 < 69\%$; $\text{TiO}_2 < 1,29\%$; $0,7076 < {}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr} < 0,7080$) com base em dados químicos (Mantovani *et al.*, 1985, Peate *et al.*, 1992, Garland *et al.*, 1995, Nardy *et al.*, 2008). Na região sul da PMP predominam basaltos com menor quantidade de titânio ($\text{TiO}_2 \leq 2\%$) e elementos incompatíveis (Sr, Y e Zr) e, por conseguinte, foi denominada

subprovíncia Baixo Ti (BTi). Nesta subprovíncia, foram definidos os magmas-tipo Gramado ($\text{TiO}_2 < 2\%$; $140 < \text{Sr} < 400$ ppm; $\text{Ti}/\text{Y} < 310$) e Esmeralda ($\text{TiO}_2 < 2\%$; $120 < \text{Sr} < 250$ ppm; $\text{Ti}/\text{Y} < 310$), também com base na abundância de elementos-traço e razões entre estes (Peate *et al.*, 1992; Peate, 1997). Esta subprovíncia ocorre associada à vulcânicas ácidas do tipo Palmas. As rochas tipo Palmas são volumetricamente superiores às rochas do tipo Chapecó e correspondem a 80% do volume total das ácidas e a cerca de 2,5% do volume total do magmatismo da PMP (Nardy *et al.*, 2008). Os subtipos Santa Maria ($69,56 < \text{SiO}_2 < 70,28\%$; $\text{TiO}_2 < 0,87\%$; $0,7217 < {}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr} < 0,7274$), Clevelândia ($69,56 < \text{SiO}_2 < 70,28\%$; $\text{TiO}_2 < 0,87\%$; $0,714 < {}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr} < 0,727$), Anita Garibaldi ($63,83 < \text{SiO}_2 < 69,56\%$; $1,06 < \text{TiO}_2 < 1,25\%$; $0,7137 < {}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr} < 0,7147$), Caxias do Sul ($68 < \text{SiO}_2 < 69,56\%$; $0,91 < \text{TiO}_2 < 1,03\%$; $0,7137 < {}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr} < 0,7264$) e Jacuí ($63,83 < \text{SiO}_2 < 69,56\%$; $1,05 < \text{TiO}_2 < 1,16\%$; $0,714 < {}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr} < 0,727$) apresentam uma assinatura geoquímica particular (Peate, 1997; Garland *et al.*, 1995; Nardy *et al.*, 2008).

Estratigraficamente, as porções inferiores seriam constituídas principalmente por lavas básicas com morfologia pahoehoe espessas (ponded) que ocupam os espaços interdunas da Formação Botucatu. As porções intermediárias seriam compostas por derrames do tipo pahoehoe e tipo a'a' no topo, sendo as ocorrências de corpos intrusivos básicos/intermediários menos frequentes. Derrames e domos ácidos são predominantes nas unidades superiores desta sequência vulcânica (Melfi, 1988; Lima *et al.*, 2012a; Waichel *et al.* 2012). Estes modelos têm sido propostos para a região da Sinclinal de Torres (Lima *et al.*, 2012b; Waichel *et al.*, 2012) e se fundamentam na arquitetura de fácies, morfologia dos derrames básicos e ácidos, paleotopografia e taxas de efusão, complementando estudos similares baseados na estratigrafia do vulcanismo na Província Etendeka (e.g. Mountney *et al.*, 1998; Jerram *et al.*, 1999, 2000) na Bacia de Huab, Namíbia.

Recentemente, uma abordagem vulcanológica forneceu evidências importantes de que os pacotes de lava mudaram suas morfologias e arquitetura ao longo das diferentes fases da evolução vulcânica (Waichel *et al.*, 2012; Rossetti *et al.*, 2014). Uma nomenclatura formal foi proposta para a litoestratigrafia e vulcanologia da Formação Serra Geral (Rossetti *et al.*, 2017), embora essa designação tenha sido substituída por Grupo Serra Geral (SGG). A unidade foi dividida em quatro formações devido à heterogeneidade dos pacotes de lava:

(i) Formação Torres - caracterizada por lavas andesíticas e andesi-basálticas do tipo pahoehoe e pahoehoe-ponded;

(ii) Formação Vale do Sol - caracterizada por lavas andesi-basálticas do tipo rubbly-pahoehoe empilhadas verticalmente;

(iii) Formação Palmas - caracterizada por dacitos e riolitos que recobrem os derrames da Formação Vale do Sol na área central e oriental e se assentam diretamente sobre as lavas da Formação Torres a oeste;

(iv) Formação Esmeralda - caracterizada por lavas basálticas do tipo campo de fluxo pahoehoe, colocado durante a fase de declínio da atividade vulcânica da seqüência de lavas baixo TiO_2 .

Nardy *et al.* (2008) estabeleceram uma coluna estratigráfica ideal para o derrame tipo Palmas (Fig. 7), dividida em 3 níveis: i) porção inferior, caracterizada por zonas de brechas epiclásticas e acamamento ígneo horizontal; ii) porção principal maciça com diaclasamento vertical; e iii) porção superior, caracterizada por zonas de acamamento ígneo horizontal, seguido por acamamento contorcido, pichestones em forma de lentes e zona vesicular de topo.

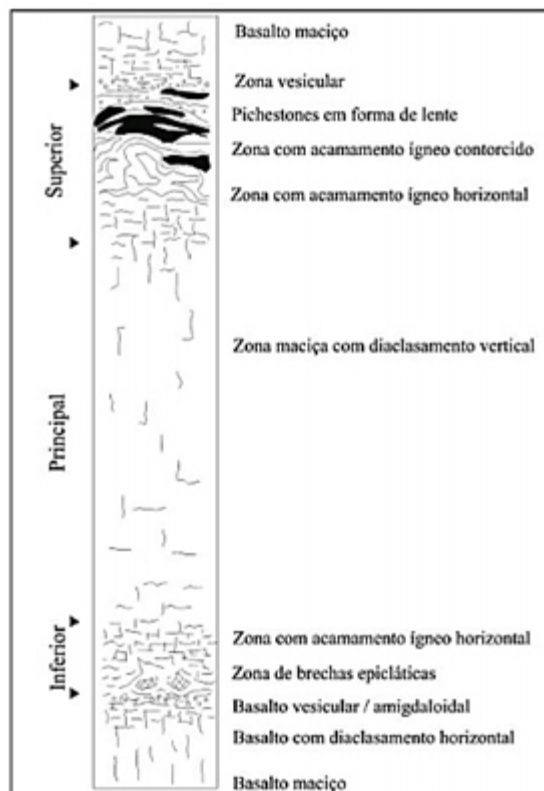


Figura 7: Seção colunar ideal para as rochas vulcânicas ácidas do tipo Palmas (Nardy *et al.*, 2008).

Dados geocronológicos indicam idades variando entre 134 e 137 Ma para as rochas do Grupo Serra Geral (Janasi *et al.*, 2011; Pinto *et al.* 2011; Thiede & Vasconcelos, 2010). Segundo alguns autores, a fase magmática principal teria ocorrido entre 133 e 130 Ma (Renne *et al.*, 1992a, 1996a, 1996b; Peate *et al.*, 1992; Turner *et al.*, 1994; Stewart *et al.*, 1996; Ernesto *et al.*, 1999, 2002; Mincato *et al.*,

2003), e o conjunto de dados é consistente com a curta duração do vulcanismo. As rochas mais antigas se encontram na porção sul da província, enquanto as mais jovens se encontram na porção norte, indicando que a evolução da atividade vulcânica se deu de sul para o norte da Bacia (Renne *et al.*, 1992a, 1992b) hipótese comprovada também por dados paleomagnéticos (Ernesto *et al.*, 1999).

De acordo com Riccomini *et al.* (2006), o magmatismo extrusivo teve início em 137 Ma ao longo de alinhamentos de direção NE, coincidente com a atual calha do Rio Paraná, e posteriormente migrou para SE (entre 131 e 130 Ma), com intensa atividade magmática intrusiva na forma de enxame de diques situados ao longo de alinhamentos de direção NW-SE, que constituem o Arco de Ponta Grossa.

Embora na maior parte dos trabalhos seja proposta a participação da Pluma de Tristão da Cunha (O'Connor & Duncan, 1990; Gibson *et al.*, 1995, 1999; Milner & Le Roex; 1996; Ewart *et al.*, 1998), a análise integrada de dados geofísicos, geoquímicos e geocronológicos da província, da Ilha de Tristão da Cunha e das cadeias submarinas Walvis e Rio Grande não corrobora o envolvimento desta pluma na gênese da PMPE. Esses dados incluem as baixas razões isotópicas $^3\text{He}/^4\text{He}$ encontradas nas rochas vulcânicas de Tristão da Cunha (Farley & Neroda, 1998); a ausência de anomalias de baixa velocidade sísmica no manto subjacente (Ritsema & Allen, 2003; Montelli *et al.*, 2006); a distância de pelo menos 1.000 km entre a ilha vulcânica de Tristão da Cunha e a região afetada pelo magmatismo (Ernesto *et al.*, 2002; Marques & Ernesto, 2004) em reconstruções paleogeográficas da Placa Sul-americana por volta de 133 Ma; a composição das rochas da PMPE, que reflete essencialmente a composição magmática do manto litosférico, em oposição a hipótese de que as composições das rochas deveriam substancialmente refletir a composição do manto astenosférico e no máximo 2% do manto litosférico (Campbell & Griffiths, 1990; Arndt & Christensen, 1992); os padrões de abundância de elementos químicos dos derrames basálticos da PMPE, que são muito distintos daquele das rochas primitivas de Tristão da Cunha (Marques *et al.*, 1999; Ernesto *et al.*, 2002; Marques & Ernesto, 2004), indicando envolvimento de diferentes componentes mantélicos na gênese dessas rochas. Além disso, hipóteses alternativas estão sendo propostas nas quais o manto sublitosférico é heterogêneo, e os movimentos convectivos incapazes de promover sua completa homogeneização (Marques, 2008).

Para que grandes eventos de fusão do manto superior ocorram não seria preciso a presença de plumas do manto, bastando fenômenos de distensão regional da litosfera (Hawkesworth & Gallagher, 1993). Assim, os derrames de basaltos

continentais formadores das grandes províncias basálticas poderiam ser explicados por um modelo simples de rifteamento acima de uma anomalia térmica no manto subjacente. Segundo este modelo, grandes volumes de magma seriam formados por processos de fusão parcial por descompressão adiabática do manto astenosférico e de parte do manto litosférico, a partir de um incremento de temperatura da ordem de 100 – 200°C, em regiões da crosta que tenham passado por distensão e afinamento litosférico (Mckenzie & Bickle, 1988). Uma vez que a transferência de calor é baixa na litosfera, este tende a ser acumulado em sua base, principalmente quando grandes superfícies continentais são envolvidas. Esse processo pode elevar a temperatura na base da litosfera em cerca de 100 °C (Coltice *et al.*, 2007) e, sob essa condição, mesmo um alívio de pressão relativamente baixo, causado pelos estágios incipientes de ruptura continental, permitiria que a temperatura *solidus* fosse atingida (Mckenzie & Bickle, 1988), causando fusão parcial de manto litosférico. Este processo foi favorecido pela constituição do embasamento da Bacia do Paraná, que por ser formado por domínios litosféricos distintos (Cordani *et al.*, 1984), possui zonas de fraqueza que facilitariam a ocorrência de processos de ruptura, mesmo sob condições de esforços distensivos relativamente baixos (Sheth, 1999). A abertura do Oceano Atlântico Sul teria ocorrido a partir da propagação de um rifte iniciado no extremo sul do Pangea e é caracterizada pela simples divergência de duas placas continentais rígidas (Nürnberg & Müller, 1991). Nas grandes províncias basálticas, segundo dados radiométricos disponíveis, o magmatismo extrusivo e/ou intrusivo precede ou tem início simultaneamente ao rifteamento, sugerindo uma relação de causa e efeito entre os dois fenômenos (Morgan, 1971; Courtillot *et al.*, 1999). Dados paleomagnéticos mostram que por cerca de 50 Ma (entre 180 e 130 Ma) a região do Gondwana Ocidental, onde se desenvolveu a Província Magmática do Paraná, permaneceu quase estacionária (Ernesto *et al.*, 2002), corroborando o modelo de placa.

Embora muitas estruturas vulcânicas associadas ao magmatismo fissural tenham sido identificadas, ao passo que raras feições diagnósticas de uma origem piroclástica tenham sido observadas, a gênese dos depósitos vulcânicos ácidos na PMPE continua sendo questionada, permanecendo a discussão sobre sua geração, que pode ser por fluxos de lava (Comin-Chiaramonti, 1988; Bellieni *et al.*, 1988; Henry & Wolff, 1992; Umann *et al.*, 2001; Lima *et al.*, 2012a; Lucchetti *et al.*, 2014; Polo & Janasi, 2014; Simões *et al.*, 2014, 2017; Guimarães *et al.*, 2018; Polo *et al.*, 2017a,b) e/ou fluxos piroclásticos (Petrini *et al.*, 1989; Whittingham, 1989; Roisenberg, 1989; Milner *et al.*, 1992; Milner *et al.*, 1995; Wildner *et al.*, 2006; Riccomini *et al.*, 2016).

Os vulcanitos ácidos encontrados na região de Cambará do Sul foram interpretados como sucessivos derrames ácidos de alta temperatura, devido à presença de depósitos formados por espessas camadas tabulares com variações não muito acentuadas nas espessuras aliada à ausência de texturas piroclásticas na base dos fluxos e presença de auto brechas (Umann *et al.*, 2001).

As sequências vulcânicas ácidas das regiões de São Francisco de Paula, Cambará do Sul (Umann *et al.*, 2001) e Soledade (Polo, 2014) foram vinculadas a erupções fissurais efusivas.

Os depósitos efusivos parecem predominantes nas unidades tipo Palmas identificadas na área em torno de Gramado Xavier, na parte sul da PMP, uma vez que não foram identificados remanescentes de componentes piroclásticos e as unidades ácidas expostas na área mostram evidências de significativos volumes de vulcanismo efusivo alimentado localmente (Polo *et al.*, 2017b).

Conduitos alimentadores de lavas ácidas estariam representados por rochas ácidas com foliação magmática composta, padrão subvertical revelado pela alternância de diferentes graus de cristalinidade e de oxidação (Lima *et al.* 2012, 2018; De Campos *et al.* 2016).

Sistemas de conduitos foram descritos ao sul do Lineamento Antas (Simões *et al.*, 2017), no nordeste do Rio Grande do Sul, sendo caracterizados por vitrófiros bandados, contendo variados fragmentos vesiculares, graduando-se lateralmente em brechas. Essas estruturas têm orientações subverticais dominantes que tendem a NE-SW e NW-SE e, em escala regional, esses afloramentos de conduitos são alongados de NW-SE a NE-SW. O bandamento medido em campo também apresenta tendências NW-SE e NE-SW, tal como as direções de fluxo de magma obtidas pela técnica ASM para conduitos e lavas (Simões *et al.*, 2018).

A presença de abundantes estruturas de domo indicando que a fonte do magma estaria diretamente abaixo da área de estudo (Polo *et al.*, 2017a), fluxos lobados, fluxos de folhas, auto-brechas e domos de lava, que são estruturas típicas dos fluxos de lava (Polo *et al.*, 2017b), domos “chatos” (*pancake-like*) e os possíveis *coulées* da sequência precoce de dacitos Caxias do Sul alinhados preferencialmente na direção NE-SW, seguindo as principais direções estruturais do embasamento cristalino da Bacia do Paraná e aproximadamente normal ao eixo da Sinclinal de Torres (Waichel *et al.*, 2012) são importantes evidências para a alimentação local do vulcanismo efusivo.

Um modo predominantemente efusivo de colocação é consistente com as propriedades físicas dessas fusões, como inferido a partir do equilíbrio rocha-mineral (Polo *et al.*, 2017a), apresentando temperaturas mais elevadas (1010-930°C), menor teor de água (1-2% em peso) e viscosidades mais baixas (104-106 Pa.s) do que os magmas ácidos típicos.

A gênese das unidades ácidas da GSG poderia ser atribuída à produção constante de magma ácido quente proveniente do fracionamento de basalto e andesito causado por uma fonte constante de calor do manto, que manteria as altas temperaturas, inibindo a cristalização e a associação de radicais OH⁻ para formar minerais hidratados, aliados ao baixo conteúdo de água entre 1-2% em peso. Esta geração constante e o rápido acesso à superfície por meio de falhas, explicaria o grande volume de magma ácido no sul da LIP Paraná-Etendeka e também porque os fluxos teriam mantido sua baixa viscosidade e seria a razão pela qual o magma ácido não teria explodido, depositando-se como fluxos de lava efusivos (Simões *et al.*, 2018).

Depósitos piroclásticos proximais foram identificados em áreas vizinhas (Riccomini *et al.*, 2016) e ocorrências de depósitos piroclásticos são conhecidas em regiões restritas no sudoeste do Paraná (Wildner *et al.*, 2006), reforçando a evidência de que as rochas vulcânicas ácidas da PMP não foram alimentadas a partir de condutos centrais remotos, mas de vários centros vulcânicos locais (Guimarães *et al.*, 2018) que estão alinhados e foram alimentados por condutos fissurais (Polo *et al.*, 2017b).

1.5 REFERÊNCIAS

- Arndt, N.T. & Christensen, U. 1992. The role of lithospheric mantle in continental flood volcanism: Thermal and geochemical constraints. *Journal of Geophysical Research*, v. 97, n. B7, p. 10967
- Bellieni, G., Comin-Chiaramonti, P., Marques, L.S., Martinez, L.A., Melfi, A.J., Nardy, A.J.R., Papatrechas, C., Piccirillo, E., Roisenberg, A. & Stolfa, D. 1986b. Petrogenetic aspects of acid and basaltic lavas from the Paraná plateau (Brazil): geological, mineralogical and petrochemical relationships. *Journal of Petrology*, v. 27, n. 4, p. 915-944.
- Bellieni, G., Comin-Chiaramonti, P., Marques, L.S., Melfi, A.J., Nardy, A.J.R., Piccirillo, E.M. & Roisenberg, A. 1984a. High- and low-TiO₂ flood basalts from the Paraná plateau (Brazil): petrology and geochemical aspects bearing on their mantle origin. *Neues Jahrbuch für Mineralogie – Abhandlungen (Journal of Mineralogy and Geochemistry)*, v. 150, p. 276-306.
- Bellieni, G., Piccirillo, E.M., Comin-Chiaramonti, P., Melfi, A.J. & Roit, P. 1988. Mineral chemistry of continental stratoid volcanics and related intrusives from the Paraná Basin (Brazil). In: Piccirillo, E.M. & Melfi, A.J. (Ed.). *The Mesozoic flood volcanism of the Paraná Basin*. São Paulo: Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, 600p. [S.l.: s.n.].
- Bryan, S.E. & Ernst, R.E. 2008. Revised definition of Large Igneous Provinces (LIPs). *Earth-Science Reviews*, v. 86, n. 1–4, p. 175–202.
- Bryan, S.E., Riley, T.R., Jerram, D.A., Stephens, C.J. & Leat, P.T. 2002. Silicic volcanism: an undervalued component of large igneous provinces and volcanic rifted margins. *Special Papers – Geological Society of America*, p. 97-118.
- Câmara, G. & Monteiro, A.M.V. 2004. Conceitos Básicos em Ciência da Geoinformação. In: *Introdução à Ciência da Geoinformação*. Divisão de Processamento de Imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - DPI/INPE. 35p.
- Campbell, I.H. & Griffiths, R.W. 1990. Implications of mantle plume structure for the evolution of flood basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 99, p. 79-93.
- Cañón-Tapia, E. & Castro, J. 2004. AMS measurements on obsidian from the Inyo Domes, CA: a comparison of magnetic and mineral preferred orientation fabrics. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 134, n. 3, p. 169-182.
- Chenet, A.L., Courtillot, V., Fluteau, F., Gérard, M., Quidelleur, X., Khadri, S.F.R., Subbarao, K.V. & Thordarson, T. 2009. Determination of rapid Deccan eruptions across the Cretaceous–Tertiary boundary using paleomagnetic secular variation: 2 Constraints from analysis of eight new sections and synthesis for a 3500-m-thick composite section. *Journal of Geophysical Research*, v. 114, n. B6.

- Chuvieco, E. 1990. Fundamentos de teledetección espacial. 1. ed. Madrid: *Ediciones Rialp*, 453p.
- Coffin, M.F. & Eldholm, O. 1992. Volcanism and continental break-up: a global compilation of large igneous provinces. *Geological Society, London, Special Publications*, v. 68, n. 1, p. 17–30.
- Coffin, M.F. & Eldholm, O. 1994. Large igneous provinces: Crustal structure, dimensions, and external consequences. *Reviews of Geophysics*, v. 32, n. 1, p. 1-36.
- Coltice, N., Phillips, B.R., Bertrand, H., Ricard, Y. & Rey, P. 2007. Global warming of the mantle at the origin of flood basalts over supercontinents. *Geology*, v. 35, n. 5, p. 391– 394.
- Comin-Chiaramonti, P., Bellieni, G., Piccirillo, E.M. & Melfi, A.J. 1988. Classification and petrography of continental stratoid volcanic and related intrusive from the Paraná Basin (Brazil). In: Piccirillo, E.M. & Melfi A.J. (Ed.). *The Mesozoic flood volcanism of the Paraná Basin*. São Paulo: Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, p. 47-72.
- Cordani, U.G., Tassinari, C.C.G. & Kawashita, K. 1984. A Serra dos Carajás como região limítrofe entre províncias tectônicas. *Ciências da Terra*, v. 9, p. 6-11.
- Cordani, U.G. & Vandomos, P. 1967. Basaltic rocks of the Paraná basin. In: Bigarella, J.J.; Becker, R.D.; Pinto, J.D. (Ed.). *Problems in Brazilian Gondwana geology*. p. 207-231.
- Courtillot, V. 1999. Evolutionary catastrophes: the science of mass extinction. New York: *Cambridge University Press*, 173p.
- Courtillot, V.E. & Renne, P.R. 2003. On the ages of flood basalt events. *Comptes Rendus Geoscience*, v. 335, n. 1, p. 113–140.
- Crósta, A.P. 1992. *Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto*. São Paulo. 173p. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de Campinas.
- Day, R., Fuller, M. & Schmidt, V.A. 1977. Hysteresis properties of titanomagnetites: Grain-size and compositional dependence. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, v. 13, n. 4, p. 260–267.
- De Campos, C.P., Guimarães, L.F., Lima, E.F., Janasi, V.A., Giordano, D. & Dingwell, D.B. 2016. Chaotic flow and fragmentation patterns in the acidic feeder system from the Paraná-Etendeka Large Igneous Province. *Goldschmidt Conference Abstracts*, 2413.
- Dunlop, D.J. 2002a. Theory and application of the Day plot (Mrs/Ms versus Hcr/Hc) 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data. *Journal of Geophysical Research*, v. 107, n. B3.

- Erlank A.J., Marsh J.S., Duncan A.R., Miller R. Mcg., Hawkesworth C. J., Betton P. J. & Rex D.C. 1984. Geochemistry and petrogenesis of the Etendeka volcanic rocks from SWA/Namibia. *Geological Society, South Africa, Special Publications*, v. 13, p. 195-246.
- Ernesto M., Marques, L.S., Piccirillo, E.M., Molina, E.C., Usami, N. & Bellieni, G. 2002. Paraná Magmatic Province – Tristan da Cunha plume system: fixed versus mobile plume, petrogenetic considerations and alternative heat sources. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 118, n. 1, p. 15-36.
- Ernesto, M., Raposo, M.I.B., Marques, L.S., Renne, P.R., Diogo, L.A. & De Mim, A. 1999. Paleomagnetism, geochemistry and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the North-eastern Paraná Magmatic Province: tectonic implication. *Journal of Geodynamics*, Netherlands, v. 28, p. 321-340.
- Ewart, A., Milner, S.C. & Armstrong, R.A. 1998. Etendeka Volcanism of the Goboboseb Mountains and Messum Igneous Complex, Namibia. Part I: Geochemical Evidence of Early Cretaceous Tristan Plume Melts and the Role of Crustal Contamination in the Paraná-Etendeka CFB. *Journal of Petrology*, v. 39, n. 2, p. 191–225.
- Farley, K.A. & Neroda, E. 1998. Noble gases in the Earth's mantle. *Annual Review of Earth and planetary Sciences*, v. 26, p. 189-218.
- Florenzano, T.G. 2002. *Imagens de satélites para estudos ambientais*. São Paulo: Oficina de Textos, 97 p.
- Frank, H.T. 2008. *Gênese e padrões de distribuição de minerais secundários na Formação Serra Geral (Bacia do Paraná)*. Porto Alegre, 322p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Fúlfaro, V.J.; Saad, A.R.; Santos, M.V. & Vianna, R.B. 1982. Compartimentação e evolução tectônica da Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, v.12, p. 590-611.
- Garland, F.; Hawkesworth, C.J. & Mantovani, M.S.M. 1995. Description and petrogenesis of the Paraná Rhyolites [sic], Southern Brazil. *Journal of Petrology*, v. 36, n. 5, p. 1193-1227.
- Gibson, S.A., Thompson, R.N., Dickin, A.P. & Leonardos, O.H. 1995. High-Ti and low-Ti mafic potassic magmas: key to plume-lithosphere interactions and continental flood-basalt genesis. *Earth Planetary Science Letters*, v. 136, p. 149-165.
- Gibson, S.A., Thompson, R.N., Leonardos, O.H., Dickin, A.P. & Mitchell, J.G. 1999. The limited extent of plume-lithosphere interactions during continental flood basalt genesis: geochemical evidence from Cretaceous magmatism in southern Brazil. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 137, n. 1–2, p. 147–169.

- Guimarães, L.F., Raposo, M.I.B., Janasi, V.A., Cañón-Tapia, E. & Polo, L.A. 2018. An AMS study of different silicic units from the southern Paraná-Etendeka Magmatic Province in Brazil: implications for the identification of flow directions and local feeding. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 355, p. 304–318.
- Hawkesworth, C.J. & Gallagher, K. 1993. Mantle hotspots, plumes and regional tectonics as causes of intraplate magmatism. *Terra Nova*, v. 5, n. 6, p. 552–559.
- Henry, C.D. & Wolff, J.A. 1992. Distinguishing strongly rheomorphic tuffs from extensive silicic lavas. *Bulletin of Volcanology*, v. 54, p. 171-186.
- Hrouda, F. 1985. The magnetic fabric in the Brno Massif. *Sbor. Geol. Ved. Uz Geol.* V. 19, p. 89–112.
- Janasi, V.A., Freitas, V.A. & Heaman, L.H. 2011. The onset of flood basalt volcanism, Northern Paraná Basin, Brazil: A precise U-Pb baddeleyite/zircon age for a Chapecó-type dacite. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 302, n. 1, p. 147-153.
- Janousek, V., Braithwaite, C.J.R., Bowes, D.R. & Gerdes, A. 2004. Magma-mixing in the genesis of Hercynian calc-alkaline granitoids: an integrated petrographic and geochemical study of the Sázava intrusion, Central Bohemian Pluton, Czech Republic. *Lithos*, v. 78, n. 1–2, p. 67–99.
- Jerram, D.A., Mountney, N., Howell, J., Long, D. & Stollhofen, H. 2000. Death of a sandsea: an active aeolian erg systematically buried by the Etendeka flood basalts of NW Namibia. *Journal of the Geological Society*, London, v. 157, n. 3, p. 513–516.
- Jerram, D., Mountney, N., Holzforster, F. & Stollhofen, H., 1999. Internal stratigraphic relationships in the Etendeka group in the Huab Basin, NW Namibia: understanding the onset of flood volcanism. *Journal of Geodynamics*, v. 28, n. 4–5, p. 393–418.
- Kelley, S. 2007. The geochronology of large igneous provinces, terrestrial impact craters, and their relationship to mass extinctions on Earth. *Journal of the Geological Society*, London, v. 164, p. 923-936.
- Kerr, P.F. 1977. *Optical mineralogy*. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 492p.
- Lima, E.F., Philipp, R.P., Rizzon, G.C., Waichel, B.L. & Rossetti, L.M.M. 2012a. Sucessões vulcânicas e modelo de alimentação e geração de domos de Lava ácidos da Formação Serra Geral na região de São Marcos-Antônio Prado (RS). *Geologia USP - Série Científica*, v. 12, p. 49-64.
- Lima E.F., Waichel B.L., Rossetti L.M.M., Sommer C.A. & Simões M.S. 2018. Feeder systems of acidic lava flows from the Paraná-Etendeka Igneous Province in southern Brazil and their implications for eruption style. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 81, p. 1–9.
- Lima, E.F., Waichel, B. L., Rosetti, L. M. M., Viana, A. R., Scherer, C. M., Bueno, G. V. & Dutra, G. 2012b. Morphology and petrographyc patterns of the pahoehoe and 'a'a flows of the Serra Geral Formation in the Torres Syncline, Rio Grande do Sul state, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 42, p. 744-753.

- Luchetti, A.C.F., Nardy, A.J.R., Machado, F.B., Madeira, J.E.O. & Arnosio, J.M. 2014. New insights on the occurrence of peperites and sedimentary deposits within the silicic volcanics sequences of the Paraná Magmatic Province, Brazil. *Solid Earth*, v. 5, n. 1, p. 121–130.
- Mantovani, M.S.M., Marques, L.S., Souza, M.A., Atalla, L., Civeta, L. & Inonocenti, F. 1985. Trace element and strontium isotope constrains of the origin and evolution of Paraná continental flood basalts of Santa Catarina State (Southern Brazil). *Journal of Petrology*, v. 26, p. 187-209.
- Marques, L.S. 2008. Tectônica de placas, plumas, heterogeneidades do manto e a origem da Província Magmática do Paraná. In: IV SIMPÓSIO DE VULCANISMO E AMBIENTES ASSOCIADOS, 2008, Foz do Iguaçu. v. CD-ROM.
- Marques, L.S., Dupré, B. & Piccirillo, E.M. 1999. Mantle source compositions of the Paraná Magmatic Province (southern Brazil): evidence from trace element and Sr-Nd-Pb isotope geochemistry. *Journal of Geology*, v. 28, p. 439-458.
- Marques, L.S. & Ernesto, M. 2004. O Magmatismo Toleítico da Bacia do Paraná. In: Mantesso-Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C.D.R., Brito-Neves, B.B. (Ed.), *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo: Editora Beca.
- Marques, L.S., Piccirillo, E.M., Melfi, A.J., Cominchiaramonti, P. & Bellieni, G. 1989. Distribuição de terras raras e outros elementos traços em basaltos da Bacia do Paraná. *Geochimica Brasiliensis*, v. 3, p. 33-50.
- Mckenzie, D. & Bickle, M.J. 1988. The volume and composition of melt generated by extension of the lithosphere, *Journal of Petrology*, v. 29, n. 3, p. 625–679.
- Mcphie, J., Della Pasqua, F., Allen, S.R. & Lackie, M.A. 2008. Extreme effusive eruptions: paleoflow data on an extensive felsic lava in the Mesoproterozoic Gawler Range Volcanics. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 172, p. 148-161.
- Mcphie, J., Doyle, M. & Allen, R. 1993. *Volcanic Textures: a guide to the interpretation of textures in volcanic rocks*. Hobart: Centre for Ore Deposit and Exploration Studies, Univ. of Tasmania, 191p.
- Melfi, A.J. 1988. The Mesozoic flood volcanism of the Paraná Basin: petrogenetic and geophysical aspects. In: Piccirillo, E.M. (Ed.). *The Mesozoic flood volcanism of the Paraná Basin*, São Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico, 600p.
- Melfi, A.J., Nardy, A.J.R. & Piccirillo, E.M., 1988. Geological and magmatic aspects of the Paraná Basin: an introduction. In: Piccirillo, E.M., Melfi, A.J. (Ed.), *The Mesozoic flood volcanism of the Paraná Basin*. São Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico, 600p.
- Milani, E.J. 1997. *Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana Sul-Occidental*. Porto Alegre, 2v. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

- Milani, E.J. 2004. Comentários sobre a origem e a evolução tectônica da Bacia do Paraná. *In: Mantesso-Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C. & Neves, B. (Ed.). Geologia do continente sulamericano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida.* São Paulo: Beca, 2004. p. 265- 279.
- Milani, E.J., Fernandes, L.A., França, A.B., Melo, J.H. G. & Souza, P.A. 2007. Bacia do Paraná. *In: Milani, E.J. (Ed.). Boletim de geociências da Petrobrás, Cartas estratigráficas.* Petrobrás, v. 15, n. 2, p. 265-287.
- Milner, S.C., Duncan, A. R. & Ewart, A. 1992. Quartz latite rheognimbrites flows of the Etendeka Formation, north-western Namibia. *Bulletin of Volcanology*, v. 54, p. 200-219.
- Milner, S.C., Duncan, A.R., Whittingham, A.M. & Ewart, A. 1995. TransAtlantic correlation of eruptive sequences and individual silicic volcanic units within Paraná-Etendeka Igneous Province. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 69, p.137-157.
- Milner, S.C. & Le Roex, A.P. 1996. Isotope characteristics of the Okenyenya igneous complex, northwestern Namibia: constraints on the composition of the early Tristan plume and the origin of the EM 1 mantle component. *Earth Planetary Science Letters*, v. 141, p. 277-291.
- Mincato, R.L., Enzweiler, J. & Schrank, A. 2003. Novas idades $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ e implicações na metalogênese dos depósitos de sulfetos magmáticos de Ni-Cu-EPG na Província Ígnea Continental do Paraná. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, 9, 2003.* Belém, Resumo Expandido, Belém/Pará, SBGq, p. 67-92.
- Montelli, R., Nolet, G., Dahlen, F. & Masters, G. 2006. A catalogue of deep mantle plumes: new results from finite frequency tomography. *Geochemistry, Geophysics and Geosystems*, v. 7, n. 11.
- Moraes, E.C. 2002. *Fundamentos de sensoriamento remoto.* DSR/INPE. Ministério da Ciência e Tecnologia. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos. 22 p.
- Morgan, W.J. 1971. Convection Plumes in the Lower Mantle. *Nature*, v. 230, n. 5288, p. 42–43.
- Mountney, N., Howell, J., Flinth, S. & Jerram, D.A., 1998. Aeolian and alluvial deposition within the Mesozoic Etjo Sandstone Formation, northwest Namibia. *Journal of African Earth Science*, v. 27, p. 175–192.
- Nardy, A.J.R. 1995. *Geologia e petrologia do vulcanismo mesozoico da região central da Bacia do Paraná.* Rio Claro, São Paulo, 316 f. Tese de Doutorado em Geociências, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- Nardy, A.J.R., Machado, F.B. & Oliveira, M.A.F. 2008. As rochas vulcânicas mesozoicas ácidas da Bacia do Paraná: litoestratigrafia e considerações geoquímico-estratigráficas. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 38, n. 1, p. 178-195.

- Nardy, A.J.R., Oliveira, M.A.F., Betancourt, R.H.S., Verdugo, D.R.H. & Machado, F.B. 2002. Geologia e estratigrafia da Formação Serra Geral. *Revista Geociências*, v. 21, n.2, p. 15-32.
- Nürnberg, D. & Müller, R.D. 1991. The tectonic evolution of the South Atlantic from Late Jurassic to present. *Tectonophysics*, v. 191, n. 1–2, p. 27–53.
- O' Connor, J.M. & Duncan, R.A. 1990. Evolution of the Walvis Ridge-Rio Grande Rise HotSpot System: implications for African and South American plate motions over plumes. *Journal of Geophysical Research*, v. 95 (B11), p. 17475-17502.
- Ottino, J.M. 1989. The mixing of fluids. *Scientific American*, v. 260, n. 1, p. 56–67.
- Peate, D.W. 1997. The Paraná–Etendeka province. In: Mahoney J.J., Coffin M.F. (Ed.). *Large Igneous Provinces: Continental, Oceanic and Planetary Flood Volcanism*. Washington, DC: American Geophysical Union, p. 217-245.
- Peate, D.W., Hawkesworth, C.J. & Mantovani, M.S.M. 1992. Chemical stratigraphy of the Paraná lavas (South America): classification of magma types and their spatial distribution. *Bulletin of Volcanology*, Berlin, v. 55, n. 1, p. 119-139.
- Perrotta, M.M. 2005. *Processamento digital básico de imagens de sensores remotos ópticos para uso em mapeamento geológico*. DISERE/CPRM. Divisão de Sensoriamento Remoto. 40 p.
- Petrini, R., Civetta, L., Iacumin, P., Longinelli, A., Belliene, G., Comin-Chiaramonti, P., Ernesto, N., Marques, L.S., Melfi, A., Pacca, I. & Piccirillo, E.M. 1989. High temperature flood silicic lavas (?) from the Paraná Basin (Brasil). *New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources Bulletin*, v. 131, p. 213.
- Piccirillo, E.M., Civetta, L., Petrini, R., Longinelli, A., Bellieni, G., Cominchiaramonti, P., Marques, L.S. & Melfi, A.J. 1989. Regional variations within the Paraná Flood Basalts (Southern Brazil): evidence for subcontinental mantle heterogeneity and crustal contamination. *Chemical Geology*, v. 75, n. 1–2, p. 103–122.
- Piccirillo, E.M. & Melfi, A.J. 1988. *The Mesozoic flood volcanism of the Paraná Basin - petrogenetic and geophysical aspects*. São Paulo: Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, 600p.
- Pinto, V.M., Hartmann, L.A., Santos, J.O.S., Mcnaughton, N.J. & Wildner, W. 2011. Zircon U-Pb geochronology from the Paraná bimodal volcanic province support a brief eruptive cycle at ~ 135 Ma. *Chemical Geology*, v. 281, n. (1-2), p. 93-102.
- Polo, L.A. 2014. *O vulcanismo ácido da Província Magmática Paraná-Etendeka, na região de Gramado Xavier, RS: estratigrafia, estruturas, petrogênese e modelo eruptivo*. São Paulo, 340p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Polo, L.A., Giordano, D., Janasi, V.A. & Guimarães, L.F. 2017a. Effusive silicic volcanism in the Paraná Magmatic Province, South Brazil: Physico-chemical conditions of storage and eruption and considerations on the rheological behavior

during emplacement. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 355, p. 115-135.

Polo, L.A. & Janasi, V.A., 2014a. Volcanic stratigraphy of intermediate to silicic rocks in Southern Paraná Magmatic Province, Brazil. *Geologia USP - Série Científica*, v. 14, p. 83-100.

Polo, L.A., Janasi, V.A., Giordano, D., Lima, E.F., Cañón-Tapia, E. & Roverato, M. 2017b. Effusive silicic volcanism in the Paraná Magmatic Province, South Brazil: evidence for locally-fed lava flows and domes from detailed field work. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 355, p. 204-218.

Pueyo Anchuela, Ó., Gil Imaz, A. Gil-Peña, I., Maestro, A., Galindo-Zaldivar, J., López-Martínez, J., Rey, J., Soto, R. & Oliva-Urcia, B. 2014. Application of AMS for reconstruction of the geological evolution of recente volcanics systems: case of Deception Island (South Shetland Islands, Antarctica). *Tectonophysics*, v. 626, p. 69-85.

Rampino, M.R. & Stothers, R.B. 1988. Flood basalt volcanism during the past 250 million years. *Science*, v. 241, n. 4866, p. 663–668.

Raposo, M.I.B. 2011. Magnetic fabric of the Brazilian dike swarms. A review. *In: Petrovský, E., Herrero-Bervera, E., Harinarayana, T. & Ivers, D. (Ed.). The Earth's Magnetic Interior. IAGA Special Sopron Book Series*, v. 1, p. 247–262, Springer Berlin.

Reed, S.J.B. 1996. Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology. New York. *Cambridge University Press*, 201 p.

Renne, P.R., Deckart, K., Ernesto, M., Férraud, G. & Piccirillo, E.M. 1996a. Age of the Ponta Grossa dike swarm (Brazil) and implications to Paraná flood volcanism. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 144, p. 199-212.

Renne, P.R., Ernesto, M., Pacca, I.G., Coe, R.S., Glen, J.M., Prévot, M. & Perrin, M. 1992a. The age of Paraná flood volcanism, rifting of Gondwana land, and the Jurassic-Cretaceous boundary. *Science*, v. 258, p. 975-979.

Renne, P.R., Ernesto, M., Pacca, I.G., Nardy, A.J.R., Coe, R.S., Glen, J.M., Prévot, M. & Perrin, M. 1992b. Age and duration of Paraná flood volcanism in Brazil. *American Geophysical Union*, p. 531-532.

Renne, P.R., Glen, J.M., Milner, S.C. & Duncan, A.R. 1996b. Age of Etendeka flood volcanism and associated intrusions in southwestern Africa. *Geology*, v. 24, p. 659-662.

Riccomini, C., Brentan, S., Tomba, C.L.B., Ferrari, A.L., Taioli, F., Silva, T.B. & Manoel, D.F.C. 2006. Regime tectônico de colocação dos enxames de diques eocretáceos do sudeste do Brasil. *In: 43° CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 2006, Aracaju, Resumos, p. 110.

Riccomini, C., Sant'anna, L.G. & Fambrini, G.L. 2016. The Early Cretaceous Jacuí Group, a newly discovered volcanoclastic–epiclastic accumulation at the top of the Paraná Basin, southern Brazil. *Cretaceous Research*, v. 59, p. 111–128.

Ritsema, J. & Allen, R.M. 2003. The elusive mantle plume. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 207, p. 1-12.

Roisenberg, A. 1989. *Petrologia e geoquímica do vulcanismo ácido mesozóico da Província Meridional da Bacia do Paraná*. Porto Alegre, 285 p. Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Rossetti, L., Lima, E.F., Waichel, B.L., Hole, M.J., Simões, M.S., Scherer, C.M.S. 2017. Lithostratigraphy and volcanology of the Serra Geral Group, Paraná-Etendeka Igneous Province in Southern Brazil: towards a formal stratigraphical framework. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 355, p. 98–114.

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*, v. 56(0), p. 409 - 421.

Scherer, C.M.S. 2002. Preservation of aeolian genetic units by lava flows in the Lower Cretaceous of the Paraná Basin, southern Brazil. *Sedimentology*, v. 49, p. 97-116.

Self, S., Keszthelyi, L. & Thordarson, T. 1998. The importance of pahoehoe. *Annual Reviews Earth Planetary Science*, v. 26, p. 81-110.

Sheth, H.C. 1999. Flood basalts and large igneous provinces from deep mantle plumes: fact, fiction and fallacy. *Tectonophysics*, v. 311, p. 1-29.

Sial, A.N. & McCreath, I. 1984. *Petrologia Ígnea*. Sociedade Brasileira de Geologia. v.1, 179p.

Silva, J.X., Zaidan, R.T. 2011. *Geoprocessamento & meio ambiente*. Rio de Janeiro: Bertrand.

Simões, M.S., Lima, E.F., Sommer, C A. & Rossetti, L.M.M. 2017. Structures and lithofacies of felsic volcanic feeder conduit systems in the Paraná-Etendeka LIP, southernmost Brazil. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 355, p. 319-336.


Simões, M.S., Raposo, M.I.B., Lima, E.F. & Sommer, C.A. 2018. Magmatic flow patterns in silicic feeder conduits and lava flows from Paraná Etendeka LIP, southern Brazil: AMS fabric, magma transport properties and implications for emplacement. *Bulletin of Volcanology*.


Simões M.S., Rossetti L.M.M., Lima E.F. & Ribeiro B.P. 2014. The role of viscosity in the emplacement of high-temperature silicic flows of Serra Geral Formation in Torres Syncline (Rio Grande do Sul State, Brazil). *Brazilian Journal of Geology*, v. 44, n. 4, p. 669-679.


- Steffen, C.A. *Introdução ao Sensoriamento Remoto*. DSR/INPE. Instituto Nacional de pesquisas Espaciais. Divisão de Sensoriamento Remoto. Disponível em <http://www3.inpe.br/unidades/cep/atividadescep/educasere/apostila.htm>.
- Stewart, K., Turner, S., Kelley, S., Hawkesworth, C., Kirstein, L. & Mantovani, M. 1996. 3-D ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology in the Paraná continental flood basalt province. *Earth Planet Science Letters*, v. 143, p. 95-109.
- Thiede, D.S. & Vasconcelos, P.M. 2010. Paraná flood basalts: Rapid extrusion hypothesis confirmed by new $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ results. *Geology*, v. 38, n. 8, p. 747- 750.
- Turner, S., Regelous, M., Kelley, S., Hawksworth, C. & Mantovani, M.M.S. 1994. Magmatism and continental break-up in the South Atlantic: high precision $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology. *Earth Planetary Science Letters*, v.121, p. 333-348.
- Umann, L.V., Lima, E.F., Sommer, C.A. & Liz, J.D. 2001. Vulcanismo ácido da região de Camará do Sul, RS: litoquímica e discussão sobre a origem dos depósitos. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 31, n. 3, p. 357-364.
- Waichel, B.L., Lima, E.F., Viana, A., Scherer, C.M.S., Bueno, G. & 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*, v. 215, p. 74-82.
- Waichel, B.L., Scherer, C.M.S. & Frank, H.T. 2008. Basaltic lavas covering active Aeolian dunes in the Paraná Basin in Southern Brazil: features and emplacement aspects. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 169, p. 59-72.
- Whittingham, A.M. 1989. Geological features and geochemistry of the acid units of the Serra Geral Formation, south Brazil. *Bulletin of Volcanology - IAVCEI abstracts*, Santa Fé, New México, p. 293.
- Wildner, W., Brito, R.S.C., Licht, O.A.B. & Arioli, E.E. 2006. *Geologia e Recursos Minerais do Estado do Paraná: texto explicativo dos mapas geológico e de recursos minerais*. Curitiba: CPRM, (Convênio CPRM/MINEROPAR). 95p. + mapas, Escala 1:200.000.
- Zalán, P.V., Wolff, S., Astolfi, M.A.M., Vieira, I.S., Conceição, J.C.J., Appi, V.T., Neto, E.V.S., Cerqueira, J.R. & Marques, A. 1990. The Paraná Basin, Brazil. *In: Interior Cratonic Basins. Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, Memoir, v. 51, p. 681-707.
- Závada, P., Schulmann, K., Lexa, O., Hroudá, F., Haloda, J., Týcová, P. 2009. The mechanism of flow and fabric development in mechanically anisotropic trachytes lava. *Journal of Structural Geology*, v. 31, n. 11, p. 1295–1307.

2. ARTIGO SUBMETIDO

O artigo “*Characterization of volcanic structures associated to the silicic magmatism of the Paraná-Etendeka Province, in the Aparados da Serra region, southern Brazil*” foi submetido à revista Anais da Academia Brasileira de Ciências.

 Anais da Academia Brasileira de Ciências

 Home

 Author

Submission Confirmation Print

Thank you for your submission

Submitted to
Anais da Academia Brasileira de Ciências

Manuscript ID
AABC-2018-0981

Title
Characterization of volcanic structures associated to the silicic magmatism of the Paraná-Etendeka Province, in the Aparados da Serra region, southern Brazil.

Authors
Benites, Susana
Sommer, Carlos
Lima, Evandro
Savian, Jairo
Haag, Mauricio
Moncinhatto, Thiago
Trindade, Ricardo

Date Submitted
18-Sep-2018

[Author Dashboard](#)

Characterization of volcanic structures associated to the silicic magmatism of the Paraná-Etendeka Province, in the Aparados da Serra region, southern Brazil

SUSANA BENITES¹, CARLOS A. SOMMER¹, EVANDRO F. DE LIMA¹, JAIRO F. SAVIAN¹, MAURÍCIO B. HAAG¹, THIAGO R. MONCINHATTO² and RICARDO I.F. DA TRINDADE²

¹Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Avenida Bento Gonçalves, 9.500, CEP 91501-970, Caixa Postal 15.001, Porto Alegre, RS, BR.

²Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo - USP, Rua do Matão, 1226, CEP 05508-090, São Paulo, SP, BR.

ABSTRACT

The Paraná-Etendeka Magmatic Province is associated with the distensive tectonics that caused the rupture of the Gondwana continent during the Lower Cretaceous and generated the intense volcanism in the south areas of Brazil. This volcanic sequence is named Serra Geral Group in the region of the Torres Syncline, which predominantly consists of basalts and the subordinate silicic rocks. Despite the questions regarding the eruption mechanisms there is an agreement on that complex systems of volcanic conduits are considered the main feeders of these tabular silicic flows. The main goal of this study is to characterize the geomorphological features observed in the Aparados da Serra region, southern Brazil, and to evaluate the genesis and relationship between these structures and the primary volcanic systems. From satellite images processing, the geomorphological features were divided into linear and circular groups, which were reclassified based on the geological structures present in four units. Units I and II correspond to silicic lava flows linked to effusive fissure eruptions, presenting a dome morphology explained by differential erosion. The rocks of Unit III may correspond to volcanic domes, whereas the rocks of Unit IV correspond to fissure volcanic conduits associated with the extrusion of effusive deposits.

Key words: Anisotropy of magnetic susceptibility; image processing; silicic lavas; volcanic morphologies.

INTRODUCTION

The Serra Geral Group (SGG) represents the Brazilian portion of the Paraná-Etendeka Magmatic Province (PEMP), which is the second largest Large Igneous Province (LIP) in the world (White and Mckenzie 1995 *apud* Frank 2008). Of all the volume of this province, only about 10% corresponds to silicic magmatism, which is concentrated on the top of this sequence (Lima et al. 2012a, Waichel et al. 2012). The region known as Aparados da Serra is located in the extreme south of Brazil and hosts several geomorphological structures identified by remote sensing (Benites 2015). These structures may correspond to domes and volcanic conduits, or they may result from differential erosion processes (Benites 2015). According to Werlang (2004), the superposition of different lithologies with different degrees of resistance to

weathering creates zones of lithostructural weaknesses, playing an important role in the Paraná Basin relief carving. The morphology of lava domes is variable. They are typically thick, steep extrusions, but their shapes can vary from circular, low-profile domes to cylindrical spines with thick talus slopes. Less sluggish types are gradational to lava flows and are sometimes referred to as dome flows or coulees (Jain 2013). The volcanic conduits are associated with a linear top horizontal morphology, with sub-vertical to vertical flow structures. This study aims to investigate the landforms related to the silicic magmatism of the Serra Geral Group in the Aparados da Serra region (Fig. 1), with the intend to draw considerations about its genesis and to analyze whether the landforms identified through remote sensing are primary structures or resulting from secondary erosive processes. In this study, the geomorphological features of the candidate domes and conduits were integrated to petrological, geochemical, and main magmatic and magnetic flow directions obtained through the anisotropy of magnetic susceptibility (AMS).



Figure 1: Location map of the study area.

MATERIALS AND METHODS

With the aid of Google Earth Pro® software, images were observed to identify features that could correspond to volcanic structures. Based on this analysis, the most representative targets were selected to be verified in the field stage. LANDSAT-5 images in the R5G4B3 and R5G4B7 compositions were used for the analysis of structural lineaments on a regional scale because they return the best visual result and are traditionally used in the geology field. The results obtained were used as a basis for the creation of thematic maps, supporting the data interpretation.

From the set of collected samples, 22 petrographic thin sections were prepared and 11 whole-rock samples were analyzed to obtain the major elements, some trace elements and REEs with the use of the ICP-AES and ICP-MS techniques, performed by Acme-Analytical Laboratories Ltda.

For the application of AMS (anisotropy of magnetic susceptibility), four prominent targets were selected, and six representative paleomagnetic sites were sampled, with a total of 64 oriented cylinders. The cylinders were cut into standard specimens measuring 2.5 cm in diameter and 2.2 cm in height, totaling 185 specimens for AMS measurements. The measurements were performed using a MKF1A Multifunction KAPPABRIDGE instrument, at the Laboratory of Paleomagnetism and Geomagnetism of IAG-USP. The data acquisition and analysis were accomplished with the software SUFAR and ANISOFT 5. For the identification of the magnetic minerals, thermomagnetic curves, remnant magnetization acquisition curves and hysteresis curves were obtained. To obtain the thermomagnetic curves, the magnetic susceptibility was measured under a low magnetic field as a function of temperature, using an AGICO Kappabridge susceptibility meter. To obtain the remnant magnetization acquisition and hysteresis curves, a MicroMag 3900 vibrating sample magnetometer was used.

GEOLOGICAL SETTING

The Paraná-Etendeka Magmatic Province (PEMP) is associated with the distensive tectonics that led to the opening of the South Atlantic Ocean due to the rupture of the Gondwana continent in the Lower Cretaceous. About 90% of its area is in the South American continent and the rest is in the African continent (Ewart et al. 1998). In Brazil, these rocks are represented by the Serra Geral Group (SGG), which covers the predominantly siliciclastic sediments of the Paraná Basin and is considered one of the largest volcanic mafic continental manifestations on the planet (Milani 2004, Milani et al. 2007). According to Zalán et al. (1987, 1991), the NW and NE lineaments stand out in the structural framework of the basin. These lineaments are considered older structures originated from the reactivation of weakness zones present in the basement, recurrently reactivated during the Phanerozoic period. These weakness zones influenced the paleogeography, sedimentation, and distribution of facies in the basin, as well as the development of tectono-sedimentary structures; E-W, developed during the Gondwana separation, active since the Triassic, as well as many of the NW-oriented faults, while those of NE direction remained inactive.

Geochronological data indicate ages between 134 and 137 Ma for the SGG rocks (Janasi et al. 2011, Pinto et al. 2011, Thiede and Vasconcelos 2010). According to some authors, the main magmatic phase occurred between 133 and 130 Ma (Renne et al. 1992a, Renne et al. 1996a, Renne et al. 1996b, Peate et al. 1992, Turner et al. 1994, Stewart et al. 1996, Ernesto et al. 1999, Ernesto et al. 2002, Mincato et al. 2003) and the dataset was consistent with the short volcanism duration.

Several studies based on chemical data (Bellieni et al. 1984, Mantovani et al. 1985, Melfi et al. 1988, Piccirillo et al. 1989, Marques et al. 1989) have suggested a division of the basic volcanic rocks into two large groups: high-Ti basalts ($\text{TiO}_2 > 2\%$) and low-Ti basalts ($\text{TiO}_2 < 2\%$). Subdivisions of these groups into magma-types were proposed by Peate et al. (1992) and Peate (1997), based on the abundance of trace elements and their ratios. The magma-types that predominantly occur in the northern portion of the province were named Pitanga ($\text{TiO}_2 > 3\%$; $\text{Ti/Y} > 350$), Paranapanema ($2 < \text{TiO}_2 < 3\%$; $200 < \text{Sr} < 450$ ppm; $\text{Ti/Y} > 330$) and Ribeira ($\text{TiO}_2 < 2\%$; $200 < \text{Sr} < 375$ ppm; $\text{Ti/Y} > 310$). The magma-types Gramado ($\text{TiO}_2 < 2\%$; $140 < \text{Sr} < 400$ ppm; $\text{Ti/Y} < 310$), Esmeralda ($\text{TiO}_2 < 2\%$; $120 < \text{Sr} < 250$ ppm; $\text{Ti/Y} <$

310) and Urubici ($Ti > 3\%$; $Sr > 550$ ppm; $Ti/Y > 500$) occur predominantly in the southern portion of the province. The silicic volcanic rocks were subdivided into the Palmas (Santa Maria, Clevelândia, Anita Garibaldi, Caxias do Sul and Jacuí) and Chapecó facies (Guarapuava, Ourinhos and Tamarana). The Chapecó type silicic rocks are concentrated in the center of the Paraná Basin and are represented by dacites, rhyodacites, quartz latites, and rhyolites, hypohyaline, porphyritic to strongly porphyritic. The Palmas type silicic rocks correspond to rhyolites and rhyodacites, typically aphyric, with "salt-and-pepper" structure, holohyaline to hypocrySTALLINE. In general, these rocks of silicic composition are preferentially present in the states of Rio Grande do Sul, Santa Catarina, and Paraná (Bellieni et al. 1986, Piccirillo et al. 1989, Nardy 1995). The main distinguishing factor of these groups is the abundance of incompatible elements. The Chapecó facies show $Zr > 500$ ppm, $Ba > 900$ ppm and $Sr > 250$ ppm, while the Palmas facies presents $Zr < 400$ ppm, $Ba < 800$ ppm and $Sr < 170$ ppm (Peate et al. 1992).

Recent studies, focusing on a more detailed work scale, have suggested new stratigraphic models for the SGG, based on the facies architecture. These models have been proposed for the Torres Syncline region (Lima et al. 2012b, Waichel et al. 2012) and are based on the morphology of basic and silicic flows, paleotopography and effusion rates, complementing similar studies based on the volcanism stratigraphy of the Etendeka Province (e.g. Mountney et al. 1998, Jerram et al. 1999, Jerram et al. 2000) in the Huab Basin, Namibia. With this approach, this region is mainly composed, in its lower portions, by basic lavas with thick pahoehoe morphology that fill the interdune spaces of the Botucatu Formation. The intermediate portions of this province are composed of pahoehoe and rubbly pahoehoe flows at the top, with less frequent occurrences of basic/intermediate intrusive bodies. The magmatism that originated the SGG is predominantly basic (about 97.5%), and the silicic flows and domes predominate in the upper units of this volcanic sequence (Lima et al. 2012a, Waichel et al. 2012).

Although many volcanic structures associated with fissure magmatism have been identified, the genesis of the silicic volcanic deposits in the PEMP continues to be questioned, and their generation is debated, which may be by lava flows (Comin-Chiaramonti 1988, Bellieni et al. 1988, Henry and Wolff 1992, Umann et al. 2001, Lima et al. 2012a, Lucchetti et al. 2014, Polo and Janasi 2014, Simões et al. 2014, Simões et al. 2017, Simões et al. 2018, Guimarães et al. 2018, Polo et al. 2017a, Polo et al. 2017b) and/or pyroclastic flows (Petrini et al. 1989, Roisenberg 1989, Whittingham 1989, Milner et al. 1992, Milner et al. 1995, Wildner et al. 2006, Riccomini et al. 2016, Luchetti et al. 2018).

Feeder conduits of silicic lavas were suggested by Lima et al. (2012, 2018) and may be represented by silicic rocks with composite magmatic foliation, but with a sub-vertical pattern, revealed by the alternation of different degrees of crystallinity and oxidation. Following this study, conduit systems were described to the south of the Antas Lineament (Simões et al. 2017, Simões et al. 2018) in the northeast of Rio Grande do Sul. These conduits are characterized by banded vitrophyres, containing many vesicular fragments, laterally gradating into breccias. These structures have dominant sub-vertical orientations trending NE-SW and NW-SE, and, on a regional scale, these outcrops of conduits are elongated from NW-SE to NE-SW.

The magnetic flow orientations obtained by the AMS technique for conduits and lavas coincide with the orientations of the magmatic structures in most cases (Simões et al. 2018). According to these authors, the flat arrangement of the magnetic foliation in lavas indicates a predominantly horizontal magmatic flow. The distinction between conduits and lavas is evidenced in field structures, microscopic textures and the orientation of the magnetic fabric. The conduits have a greater dispersion of the AMS data and may have horizontal or locally

vertical k_{\max} , but the complexity of the rheological behavior along the conduits has divided these systems into different domains of magmatic flow. In the lavas, horizontal k_{\max} values associated with horizontal magnetic foliations are a common pattern.

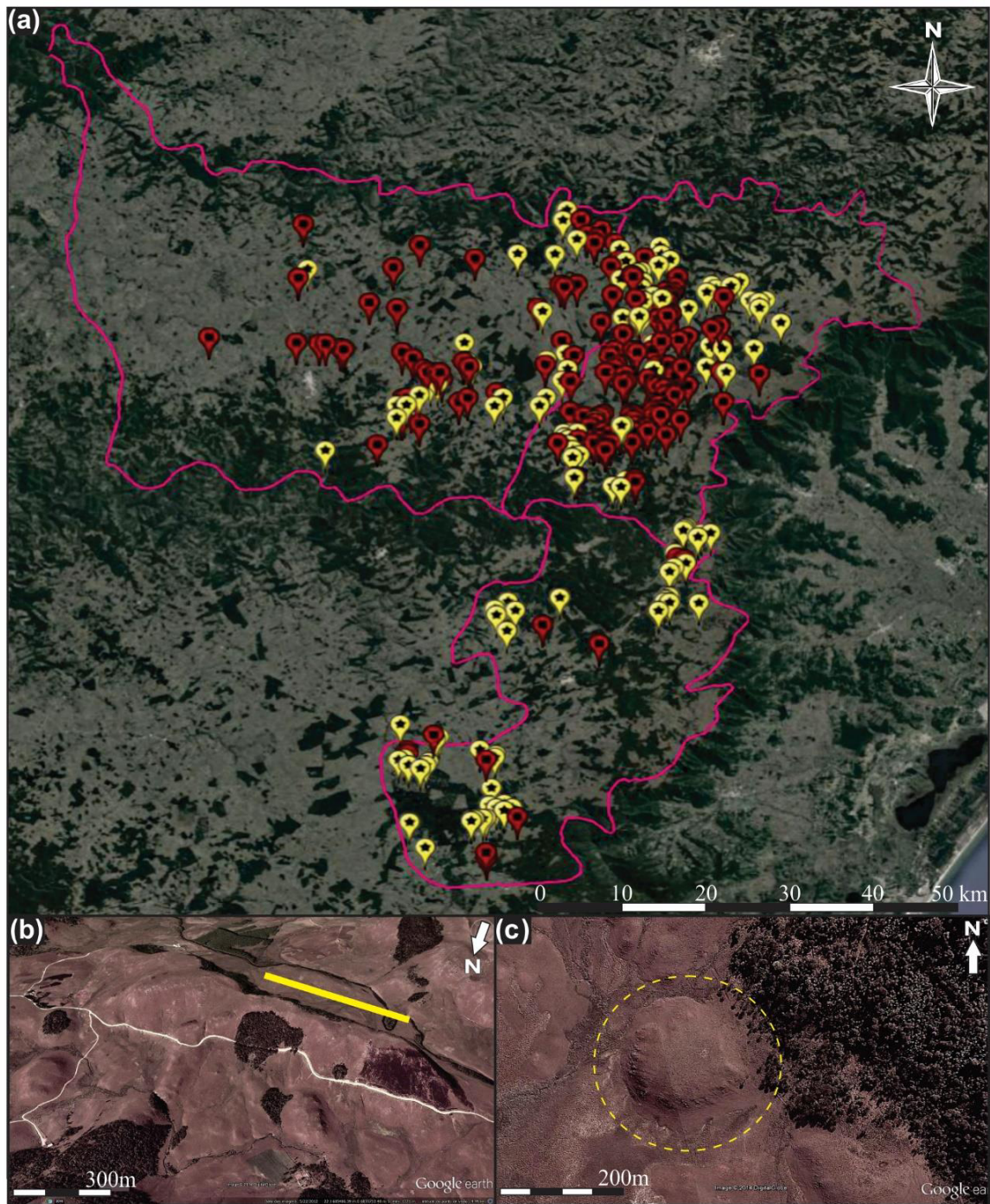
The results of Polo et al. (2017b) show that the effusive deposits appear to predominate in the Palmas type silicic units, and structures like lava domes, lobed flows, sheet flows and auto-brecciation are common, indicating that they are more abundant than it was previously thought in the PMP silicic volcanism.

Simões et al. (2018) attributed the genesis of the SGG to the constant generation of hot silicic magma derived from the fractionation of basalt and andesite caused by a constant source of mantle heat, with high temperatures, inhibiting the crystallization and the association of OH^- radicals to form hydrated minerals, combined with the low water content of 1-2% by weight. This constant generation and rapid ascending through faults could explain the large volume of silicic magma in the south of the PEMP, as their high temperature and low viscosity flows may result in a non-explosive volcanism and simple deposition as lava flows.

RESULTS

ANALYSIS OF GEOMORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS

The geomorphological features observed in the images were divided into two groups: linear and circular (Fig. 2a). The linear features correspond to elongated bodies of positive relief or linear depressions (Fig. 2b). The circular features comprise rounded bodies (Fig. 2c) and were subdivided into four groups (Fig. 3) according to their geometries: (i) circular features with positive relief from the edge to the center and a domed top; (ii) circular features with positive relief from edge to center and flattened top; (iii) circular features with positive relief from the edge to center and depressed center; (iv) composite features, with a central uplift followed by a depressed peripheral zone and uplifted edge. The analysis resulted in the identification of 320 geomorphological features in the region, with a predominance of the circular type with positive relief from the edge to the center and domed top (Benites 2015).



Legend

- ★ Linear geomorphologies
- Circular geomorphologies
- Delimitation of study region

Figure 2: Geomorphological features. (a) Distribution of linear and circular features in the investigated area. (b) example of linear feature and (c) circular feature.

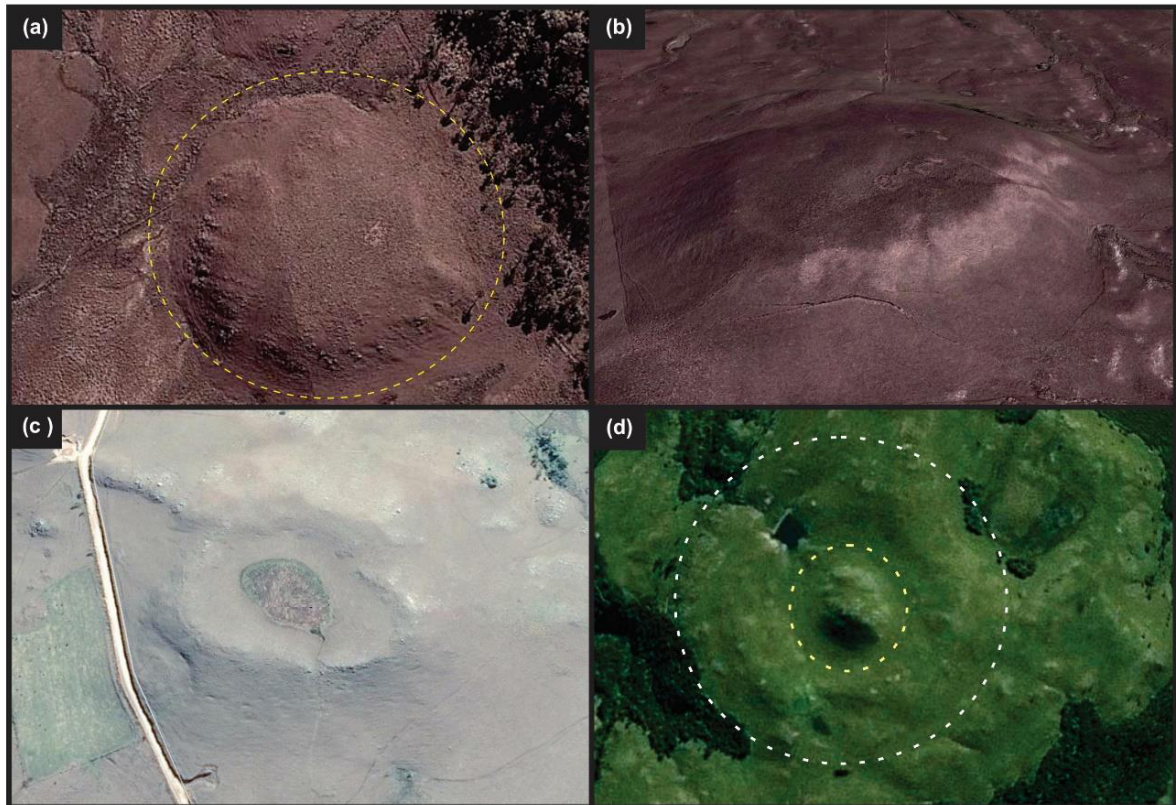


Figure 3: Subdivision of circular features. (a) circular feature with positive relief from the edge to the center and a domed top; (b) circular feature with positive relief from edge to center and flattened top; (c) circular features with positive relief from the edge to the center and depressed center; (d) composite feature, with a raised center followed by a depressed peripheral zone and uplifted edge.

GEOLOGICAL AND PETROLOGICAL CHARACTERIZATION OF GEOMORPHOLOGICAL FEATURES

The identified geomorphological features were reclassified based on the geological structures observed in the field. They are: (i) lava flows with magmatic foliation incipient to massive, (ii) lava flows with sub-horizontal flow structures, (iii) lava flows with dome flow structures, all associated with the circular features; (iv) lava flows with sub-vertical flow structures, associated with the linear features.

UNIT I: Lava flows with magmatic foliation incipient to massifs

This unit is composed of black obsidians and vitrophyres and microporphyratic rocks (Fig. 4 a, b). The presence of amygdales, filled by carbonates is common, which can be well-rounded or horizontally stretched and aligned in the flow direction, with a NW preferential direction. Petrographically, this unit is characterized by microphenocrysts of plagioclase and, subordinately, clinopyroxene, scattered in a glassy matrix formed by quartz-feldspar crystallization residue (Fig. 5 b). The presence of spherulites is common (Fig. 5 a) due to devitrification, and there are microfractures filled by oxides scattered throughout the thin section. The plagioclase grains commonly exhibit chaotic orientation and swallow-tail termination and hollow crystal textures, indicative of rapid cooling. The presence of intersectal and intergranular texture with interstitial pyroxene it is also common.

UNIT II: Lava flows with sub-horizontal flow structures

This unit is composed of black obsidians and vitrophyres and microporphyrific rhyolites (Fig. 4 c, d). It shows either tabular structures or horizontal to sub-horizontal flow structures, with predominating SE bedding. The rocks display an aphanitic texture, and sometimes, a granophyric texture. Amygdales filled by quartz and/or chalcedony, elongated up to 4 mm in the major axis, and colorless quartz geodes are common. Petrographically, it is characterized by the presence of microphenocrysts and plagioclase microlites, immersed in a glassy matrix of quartz-feldspar crystallization residue (Fig. 5d). It has intergranular texture with interstitial pyroxene (Fig. 5 c), as well as grains of pyroxenes partially enveloped by plagioclase. Microphenocrysts can be euhedral to subhedral, occur in the form of skeletal, hollow, or swallow-tail termination grains. The pyroxene is represented by anhedral to subhedral crystals.

UNIT III: Lava flows with dome flow structures

This unit consists of gray obsidian and aphanitic rocks (Fig. 4 e, f), with a massive and well-preserved core, and foliated and highly vesiculated edges that can be quite altered and autobrecciated. It has vesicles and amygdales, elongated and well-rounded, up to 7 mm and geodes of up to 4 cm in size. Petrographically, it is characterized by the presence of a glassy matrix composed of crystallization residue with "microfractures" with no orientation, very fine quartz veins, quartz-filled amygdales, and plagioclase and pyroxene microphenocrysts. The plagioclase makes up about 10% of the rock volume, with chaotic distribution, euhedral crystals and skeletal, thin, elongated microphenocrysts of up to 0.5 mm. Swallow-tail termination texture and hollow crystals may occur (Fig. 5 e, f). The pyroxene occurs in a proportion of about 7% of the rock volume in the form of anhedral to subhedral and sometimes elongated crystals.

UNIT IV: Lava flows with sub-vertical flow structures

This unit is composed by rocks of aphanitic texture with strong flow structures (Fig. 4 g, h), characterized by a colorimetric lamination/banding, given by the alternation of dark gray and burgundy colors. The foliations are highly sloped to sub-vertical, with preferential NE direction. The gray portion contains the most diagnostic feature in the lamination, while in the burgundy portion the presence of autobrecciation is common. Localized homogenization seems to occur with a full mixture of these two lithotypes, but the red portion also appears as breccias within the gray portion. There are pockets of angular breccias, composed of clay and a high concentration of elongated vesicles, and approximately 15 cm in size. It is petrographically characterized by the presence of thin banding, parallel to the sub-vertical flow direction (Fig. 5 g). The color variations are due to differences in the degree of crystallinity, and an intense oxidation of the ferromagnesian minerals, associated with a lower amount of plagioclase is observed in the red band. The gray color bands are devitrified, with crystallization residue in the matrix and a greater proportion of plagioclases. Parallel to these bands, quartz venules occur (Fig. 5 h), while the venules of oxides occur orthogonally to the layers. It can present a fluid texture, characterized by the alignment of plagioclases crystals. The mineral makes up about 10% of the rock volume, with particle sizes around 0.10 mm. The crystals are euhedral and sometimes thin and elongated, with swallow-tail terminations. Hollow/skeletal crystals may also occur, indicating rapid cooling. They may occur aligned in the flow direction, sometimes

exhibiting two preferential directions. Oxidation is also present around fractures and quartz vein. Microlites and oxidation tracks may be present. It also contains quartz-filled amygdales stretched in the flow direction.

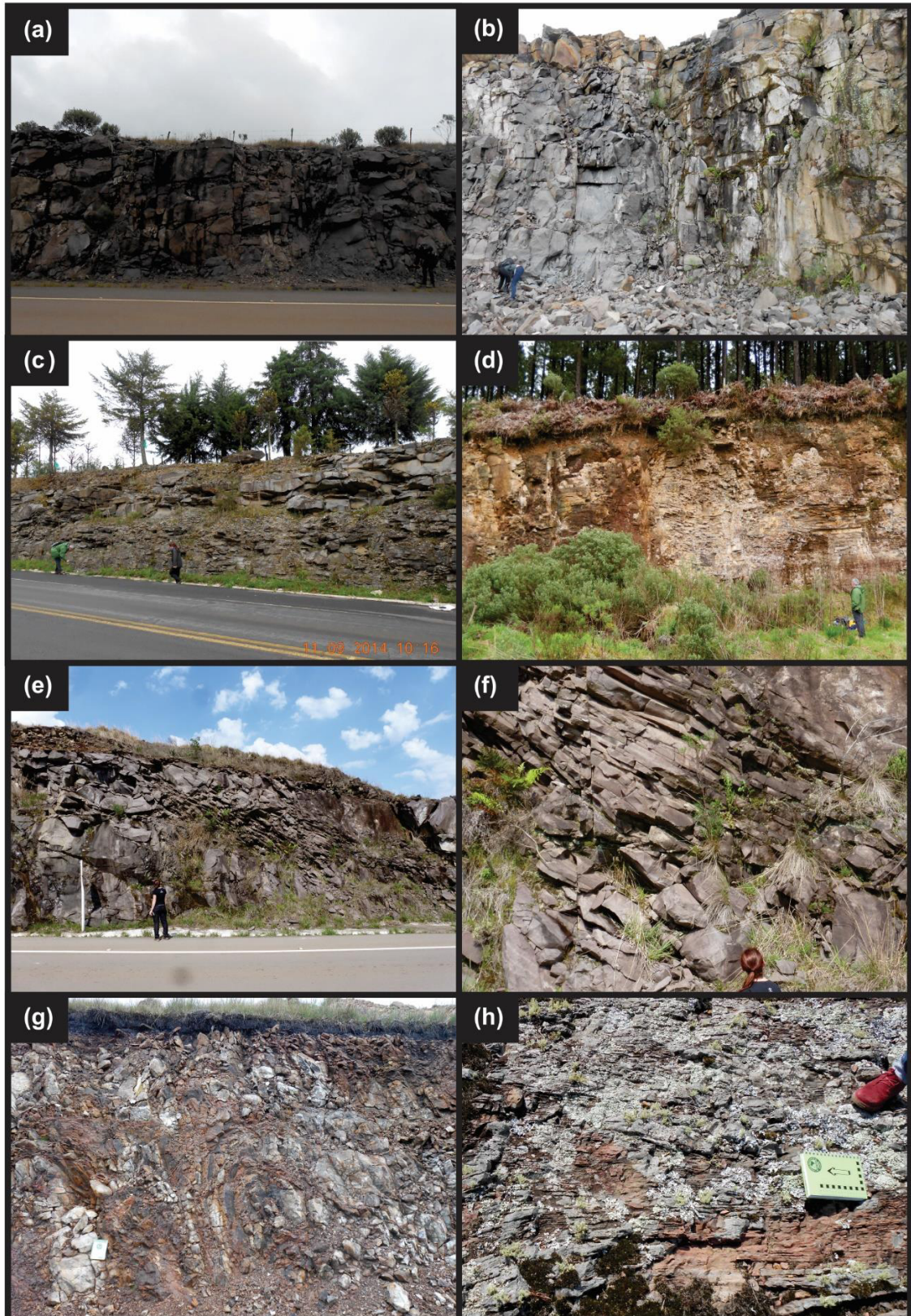


Figure 4: Representative photographs of the individualized units. UNIT I: (a) and (b) lava flows massifs and fractured; UNIT II: (c) and (d) lava flows with sub-horizontal flow structures; UNIT III: (e) lava flows with dome flow structures; (f) highlight for observed foliation; UNIT IV: (g) lava flows with sub-vertical flows structures; (h) sub-vertical flow under plan view.

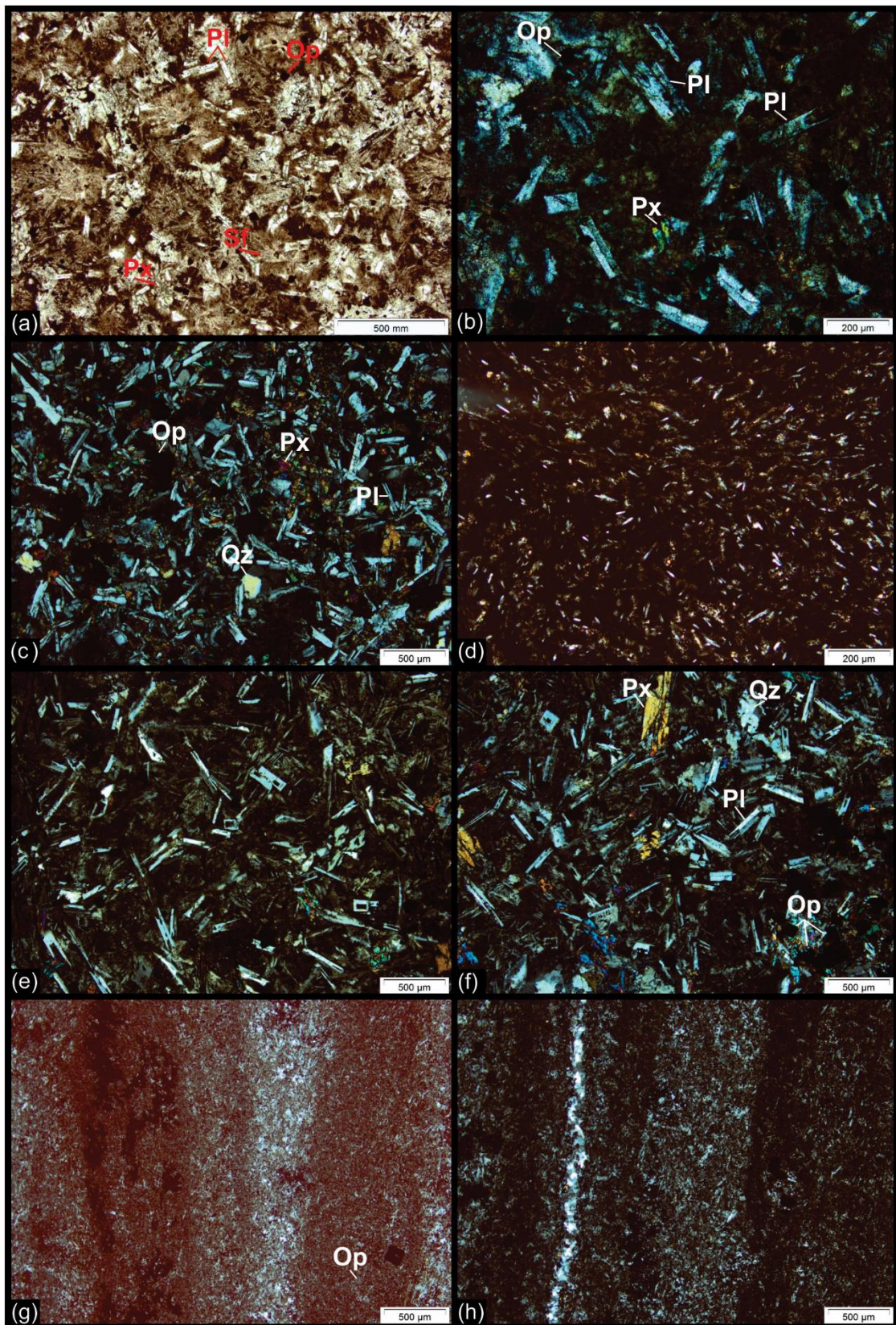


Figure 5: Representative photomicrographs of the Units. UNIT I: (a) Presence of spherulites; (b) Plagioclase in matrix of quartz-feldspathic crystallization residue. UNIT II: (c) Presence of intergranular texture with interstitial pyroxene; (d) Minerals aligned in the direction of flow. UNIT III: (e) Presence of hollow plagioclase crystals with swallow-tail termination; (f) Plagioclase with swallow-tail termination are common. UNIT IV: (g) Aspect of banding; (h) Venule filled by quartz parallel to bands that have a difference in degree of oxidation. Pl: plagioclase. Qz: quartz. Px: pyroxene. Sf: spherulite. O: opaque.

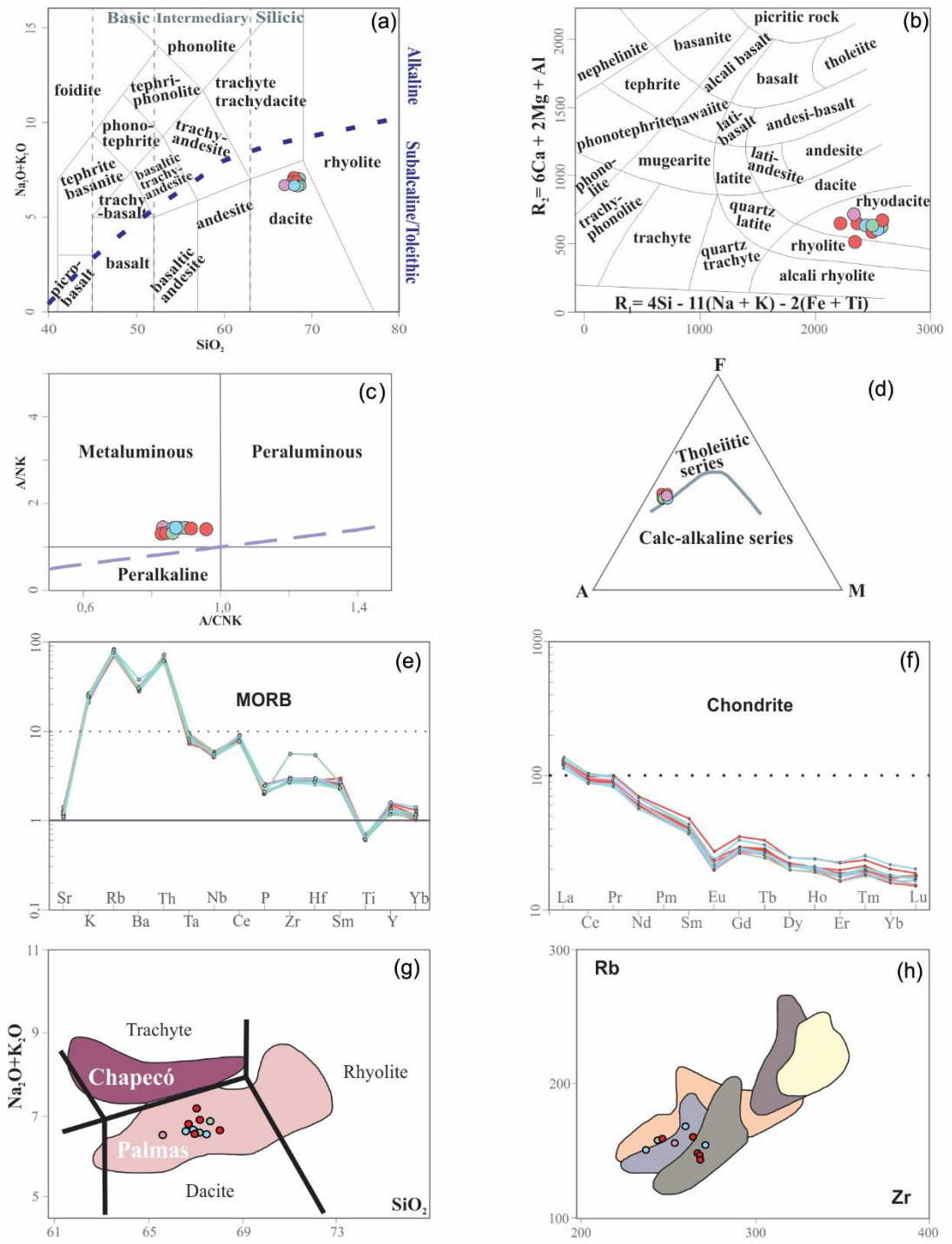
LITHOCHEMISTRY

In general, the obtained data indicate slight compositional variation between the individual units. They present a silica concentration ranging between 65.6 and 68.1% and alkali content between 6.54 and 7.2%. They occupy the dacite field (Fig. 6 a) when plotted in the TAS diagram (Le Bas et al. 1986), and the rhyodacite field (Fig. 6 b) by the classification obtained from the R_1 - R_2 diagram (De La Roche et al. 1980). They also display a sub-alkaline and tholeiitic affinity and a metaluminous character (Fig. 6 c, d).

When MORB-normalized (Fig. 6 e), the samples show enrichment of the elements from Sr and Sm, with Y and Yb contents close to the unit. In addition, a negative Ba anomaly and the slight enrichment in Ce and Nb combined with the enrichment in Rb and K_2O relative to Nb are common in associations derived from a mantle source with significant crustal participation. Moderate to low levels of HFS elements, except Th, which has a positive anomaly with high content.

When chondrite-normalized (Nakamura 1974), the samples show a moderate concentration of rare earth elements ($\Sigma ETR = 194 - 229$ ppm). The fractionation between LREE and HREE is moderate in the samples representative of the Units, with a LaN/YbN ratio ranging approximately between 6 and 7.75. In general, the fractionation of the LREEs is higher than that of the HREEs, with LaN/SmN ratios (2.66 – 3.43) higher than the TbN/LuN ratios (1.51 – 1.75). A strong negative Eu anomaly ($Eu/Eu^* = 0.61 - 0.72$) occurs in all samples and is probably related to the bivalent character of this element and the fractionation of feldspars (Fig. 6 f).

The studied samples show properties compatible with the typical characteristics of the Palmas Group (Nardy et al. 2008, Lima et al. 2012). They occupy the dacite field by the classification obtained from the $Na_2O+K_2O \times SiO_2$ diagram (Fig. 6 g) and show a low Rb/Ba ratio ranging from 0.21 to 0.27 ppm and a low Nb content, between 17.9 and 20.5 ppm. To discriminate the subgroups of the Palmas type, the diagram was based on the work of Garland et al. 1995, Nardy et al. 2008, Lima et al. 2012 and Polo 2014. The studied samples vary among the subgroups Anita Garibaldi, Caxias do Sul and Jacuí. (Fig. 6 h).



Legend

Palmas subtypes	Units
■ Anita Garibaldi	● UNIT I: lava flows with magmatic foliation incipient to massifs
■ Clevelândia	● UNIT II: lava flows with sub-horizontal flow structures
■ Caxias do Sul	● UNIT III: lava flows with dome flow structures
■ Santa Maria	● UNIT IV: lava flows with sub-vertical flow structures
	■ Jacuí

Figure 6: Diagrams based on lithochemistry. (a) TAS Diagram; (b) R₁-R₂ Diagram; (c) Shand's index Diagram; (d) AFM Diagram; (e) MORB Diagram; (f) REE Diagram normalized by the chondrite; (g) Diagram for silicic rocks subdivision; (h) Diagrams to classification of subtype Palmas as already defined in the literature. The color areas in the diagram Rb (ppm) vs. Zr (ppm) correspond to the study by Nardy et al. 2008.

ANISOTROPY OF MAGNETIC SUSCEPTIBILITY – AMS

Recent studies have applied this technique to silicic volcanic systems, enabling the reconstruction of volcanic environments, such as domes related to caldera collapses (Tomek et al. 2016) and fissure systems associated with large igneous provinces (Simões et al. 2018). In these studies, satisfactory relationships were found among the bedding planes and lineations with the directions of maximum mean susceptibility, intermediate mean susceptibility and the plane that contains the maximum and intermediate susceptibility directions.

Directional Data

The AMS directional results were displaying using equal area stereograms and, using the software ANISOFT 5 (Agico co., 2017) a statistical bootstrap analysis was applied to the data (Tauxe et al. 1991), allowing a better identification of the K_1 , K_2 and K_3 axes of the magnetic tensor. This technique allowed to determine more reliably the attitude of the tensor and the lava flow direction. Figure 7 shows the directional data and (P vs. Km) and (T vs. P) plots for the sampled sites. The mean susceptibility (Km) of the sample ranges between 11.7 and 40.8×10^{-3} SI. The degree of anisotropy (P) found is low, not exceeding 1.036. Regarding the shape of the ellipsoids, the shape parameter (T) indicates a presence of both oblate and prolate ellipsoids. Despite the low degree of anisotropy of the samples, it was possible to identify clear patterns of lineation and foliation, as can be seen in the stereograms of Figure 7.

Magnetic Mineralogy

Figure 8 shows a representative thermomagnetic curve for each sampled site. In most cases, the samples show reversible curves (PAS17, PAS38, PAS41n, PAS41b), except for samples PAS06v and PAS06h, with irreversible behavior. However, in all cases, it is possible to observe a total loss of susceptibility (the Curie temperature) at temperatures between 550°C and 580°C. The reversible curves do not indicate mineralogical alteration or destruction during heating. The Curie temperature variation is mainly associated to the variation of the titanium content in the samples and their oxidation state. The opposite happens with irreversible curves. The curves with reversible behaviors indicate that the magnetic mineralogy is composed of titanomagnetites with low titanium. Eventually, some hematites are present, as well small amounts of maghemite, as seen in curves PAS06v, PAS06h, and PAS17.

Figure 8 also shows the hysteresis loops obtained for the same set of samples. The hysteresis loops are similar, typical of low coercivity magnetic minerals, with values (Table 1) within the pseudo-single domain – PSD (Day et al. 1977, Dunlop 2002). This field is a transition between single-domain (SD) and multi-domain grains (MD). In igneous rocks, most of the magnetite and titanomagnetite grains carrying stable thermal remnant magnetization fall into the field of PSD grains (Dunlop and Özdemir 1997). The IRM curves for all the samples saturate in fields lower than or near 300 nT, indicating that the main magnetization carrier shows low coercivity compatible with titanomagnetites.

Scanning Electron Microscopy (SEM)

Using Scanning Electron Microscopy, was determined the habit and distribution of the magnetic minerals and obtained the present elements through Energy Dispersive Spectroscopy

(EDS). Through the SEM observations, four types of magnetic fabrics were identified in the samples (Fig. 8), which are characterized by the predominance of:

I - anhedral phenocrysts ($\geq 100 \mu\text{m}$) and euhedral, scattered microcrystals ($\leq 20 \mu\text{m}$), (samples PAS06v e PAS06h). In these samples, the tensor obtained by AMS for the magnetic foliation and lineation does not coincide with the field data, although the axes are well grouped with low e/z values;

II - anhedral phenocrysts ($\geq 100 \mu\text{m}$) and small anhedral crystals ($\leq 10 \mu\text{m}$) associated with oriented plagioclase crystals (PAS17). In this fabric, it is observed that the AMS tensor does not agree with the flow structures and the magnetic axes are scattered, showing high e/z values.

III - anhedral phenocryst ($\geq 300 \mu\text{m}$), sometimes clustered, exhibiting glomeroporphyritic texture and with low number of microcrystals (PAS-41n e PAS-41b). In these samples, the magnetic fabric is consistent with the flow orientations measured in the field, although there is a high dispersion of the magnetic axes.

IV - euhedral phenocrysts ($\geq 400 \mu\text{m}$), showing ilmenite exsolution features, sometimes with a glomeroporphyritic texture, and anhedral microcrystals ($\leq 10 \mu\text{m}$), associated with crystals of plagioclase (PAS-38). In these samples, there is no concordance between the magnetic data and the geological structures, although the magnetic axes are relatively clustered and may represent a mixture between fabrics II and III.

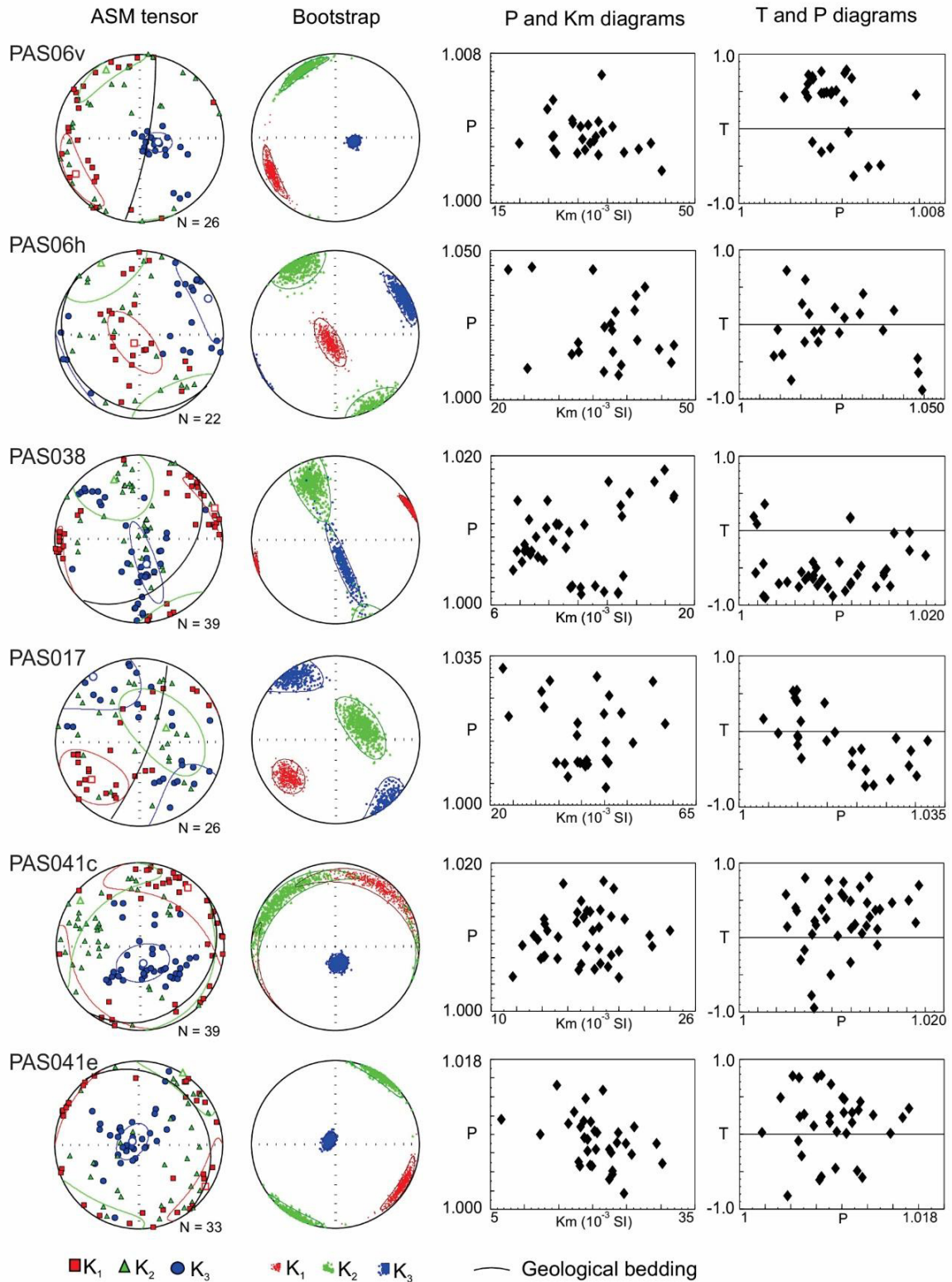


Figure 7: Directional data by anisotropy of magnetic susceptibility and bootstrap analysis, as well as anisotropy degree diagrams (P), mean magnetic susceptibility (Km) and shape parameter (T). PAS06v: sub-vertical flow structure. PAS06h: sub-horizontal flow structure. PAS038: dome flow structure. PAS017: sub-vertical flow structure. PAS041c: raised center of the composite geomorphology. PAS041e: uplifted edge of the composite geomorphology.

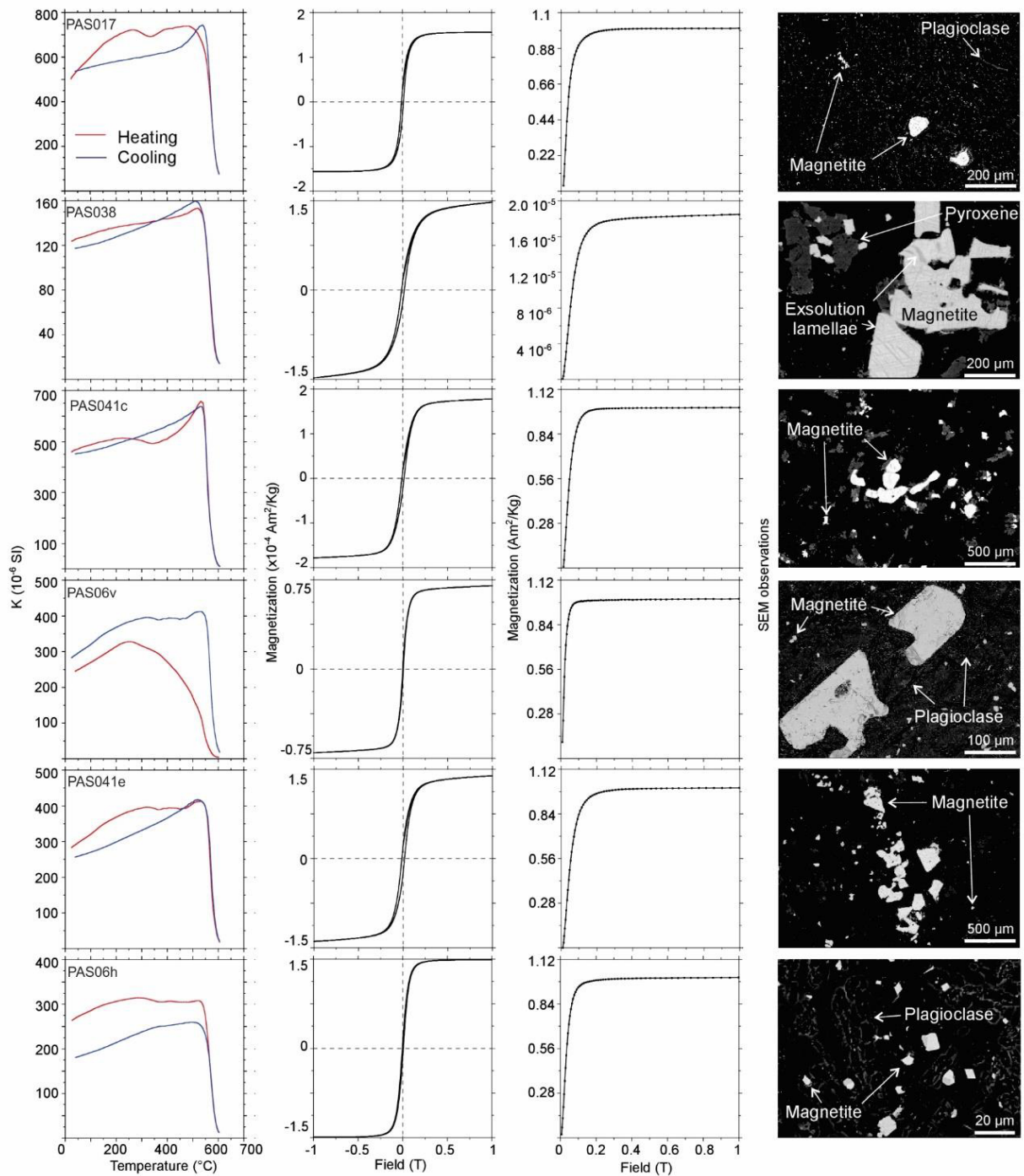


Figure 8: Thermomagnetic, hysteresis and MRI acquisition curves, and SEM observations of representative samples of the studied sites. The results show that mineralogy is related predominantly to a low coercivity mineral, such as magnetite and/or titanomagnetite.

Table 1. AMS data parameters and field data. N: number of specimens; Km: site-average magnetic susceptibility; P: anisotropy degree; T: shape parameter; F: magnetic foliation; L: magnetic lineation; K₁, K₂ and K₃: maximum, intermediate and minimum axis of magnetic susceptibility; e/z: angular error for the maximum and minimum ellipses of Jelineck's statistics.

	Site	PAS06v	PAS06h	PAS017	PAS038	PAS41c	PAS41e
	N	26	22	26	39	39	33
Scalar Data	km (10 ⁻³ SI)	31.5	36.9	40.8	11.7	17.2	20.6
	P	1.036	1.023	1.017	1.009	1.011	1.007
	T	0.320	-0.075	-0.125	-0.490	0.240	0.142
	F	1.023	1.010	1.006	1.002	1.007	1.004
	L	1.013	1.013	1.011	1.007	1.004	1.003
Directional Data	K ₁	241/14	212/80	232/29	068/02	039/11	122/07
	e/z	32/12	37/17	34/24	33/9	68/24	37/13
	K ₂	335/11	331/05	063/61	337/26	307/12	032/00
	e/z	32/11	36/33	52/29	44/32	68/20	37/19
	K ₃	102/72	062/08	325/05	163/64	170/74	299/83
	e/z	14/9	34/17	52/29	44/9	26/18	20/13
Field Data	Foliation Pole	10/280	81/041	10/290	48/312	64/315	72/232

GEOPROCESSING

The results obtained with the interpretation of the satellite images served as the basis for the creation of thematic maps, supporting the data interpretation. The rosette diagrams prepared with the field measurements and the measurements taken from the satellite images (Fig. 9) indicate the predominance of NE-SW trending structures, followed by SE-NW and E-W directions in the field, and a predominance of NE-SW over NW-SE trending structures on a regional scale. Often, the bedding planes identified in the field are concordant with the lineaments observed in the image analysis.

There is a greater concentration of features, both linear and circular in the municipality of São José dos Ausentes, where the lineaments are scarce and more spaced, but more extensive. The landforms are less common in regions where there is a great density of small lineaments of NE direction, such as in the municipalities of Cambará do Sul and Bom Jesus.

The thematic map (Fig. 9) allows verifying the behavior patterns of the structures. The small domed circular features have a preferential alignment in the NNE direction in the city of São José dos Ausentes, while the larger features have a random distribution throughout the region and may be related to large N-S direction lineaments. The flat top circular features do not show a preferential distribution, presenting only a slight tendency to form clusters of smaller

features, while the larger structures are widely spaced. The smaller linear features, with sizes up to 530 meters, often occur in aligned clusters, with directions ranging from NE-NNE to N-NNW. This pattern follows the predominant trending of the lineaments observed at the sites. However, the larger features are not oriented.

Also based on the analysis of the satellite images, both structures similar to lava flows and lava flows with vertical foliations were identified. Some of these structures are depicted in the map of Figure 9. Structures similar to vertical foliations commonly occur associated with large lineaments. The presence of linear and circular geomorphological features in these areas is frequent and may be indicative of volcanic systems in the region.

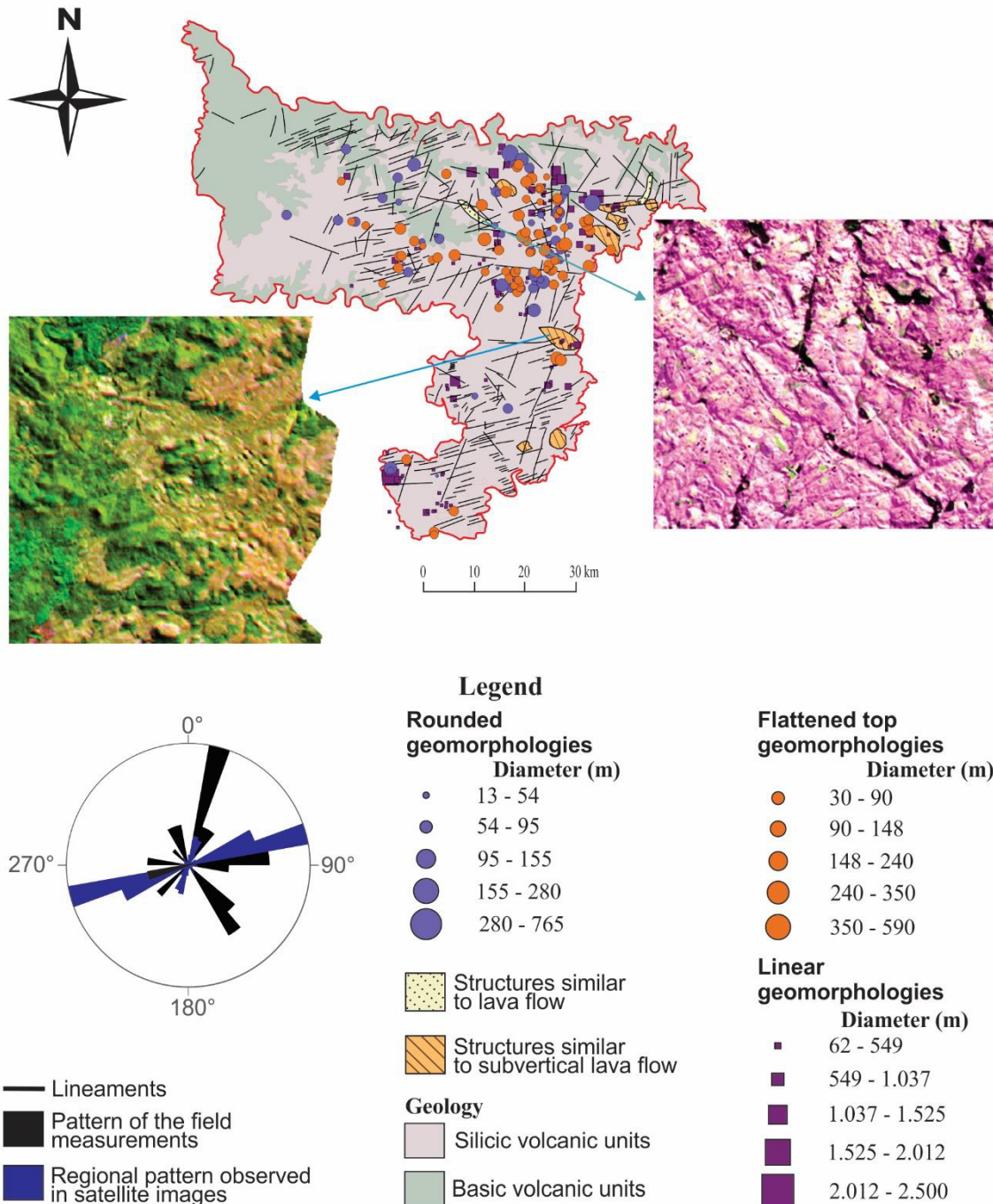


Figure 9: Thematic map, containing comparison between the patterns of lineaments measurements in the field and observed in the satellite images on the lithotypes present in the region and highlighting structures identified in satellite images.

DISCUSSION

The region known as "Aparados da Serra" in southern Brazil consists of the silicic volcanic rocks of the Serra Geral Group, which is linked to the PEMP. Classically, these silicic rocks are related to tabular deposits of great extension, whose origin is still a subject of discussion, and the debate regarding its genesis by lava flows (Bellieni et al. 1988, Comin-Chiaramonti 1988, Henry and Wolff 1992, Umann et al. 2001, Lima et al. 2012, Polo et al. 2017a, Polo et al. 2017b, Guimarães et al. 2018, Lima et al. 2018, Simões et al. 2018) or pyroclastic flows (Petrini et al. 1989, Roisenberg 1989, Whittingham 1989, Milner et al. 1992, Milner et al. 1995, Luchetti et al. 2018) remains. In the investigation of the Serra Geral volcanism, emphasis is usually given to the lithochemical and isotopic aspects, usually organizing the data on a regional scale, where aspects related to local structures, flow regime and effusion are suppressed or overlooked (Waichel 2006). The apparent monotonous and homogeneous nature, much ascribed to the PEMP, has been one of the main factors for the geochemical characterization to be the central definition focus for the units (Piccirillo et al. 1990, Peate et al. 1992, Turner et al. 1999, Ewart et al. 2004). The stratigraphic lithofaciological approaches have been the subject of recent research, focusing mainly on the basic units related to this magmatism. (e.g. Lima et al. 2012, Waichel et al. 2012, Barreto et al. 2014, Rossetti et al. 2014, Lima et al. 2018, Simões et al. 2018).

Umann et al. (2001) suggest that the silicic volcanism of the Aparados da Serra region can be interpreted as successive high-temperature pyroclastic flows. The authors did not identify diagnostic fragments of explosive volcanic activity in any of the studied units, such as pyroclasts and accidental fragments. They locally observed basal breccias, similar to those reported by Roisenberg (1989) in the region of Nova Prata (RS) and by Milner et al. (1992) in the Etendeka Group (NW of the Namibia). However, these brecciated layers are characterized by a random distribution of rhyolitic angular clasts, usually banded, of decimetric dimensions, surrounded by a quartz-feldspar matrix, typical of an auto-breccia generated by the friction of the flow base with the substrate. Flow foliations are commonly observed, sometimes with continuous asymmetric folds, which are frequent features in intermediate to silicic lavas, although they may also occur in high-temperature pyroclastic flows (Henry et al. 1988, Henry and Wolff 1992, McPhie et al. 1993). Pumice, fiamme, crystalloclasts, and lithoclasts were not observed, and a vitrophyre under scanning electron microscopy indicated a compact holohyaline condition, with crystallites and microliths of feldspars randomly distributed, typical of silicic flows.

Lima et al. (2012, 2018) have described feeder systems for the silicic lavas and, according to these authors, the presence of the root of a feeder conduit suggests that, in certain portions, the structures may assume dome shapes in response to the resistance to the flow.

Polo (2014) concludes that the silicic volcanic sequences of the Soledade region are widely dominated by effusive deposits and that the extrusion occurred through fissures. The volcanic eruptions of the Palmas type began with the effusion of lava flows and lava domes of dacitic compositions, identified as subtype Caxias do Sul.

Among the 320 individual structures in the Aparados da Serra region, there is a predominance of circular features with positive relief from the edge to the center and domed top. In the field, these features are represented by hillocks with rounded to acute convex tops. The linear features are usually represented by elongated bodies (Benites 2015). Often, the foliations found in the field are concordant with the lineaments identified in the image analysis. Some lineaments may represent the structural framework of the Paraná Basin, where NW and NE orientations are considered to be older and originate from the reactivation of weak zones

present in the basement and the E-W lineaments were developed from the Triassic during the Gondwana separation (Zalán et al. 1987, Zalán et al. 1991).

The "flat" domes (pancake-like) and the possible coulées of the early sequence of Caxias do Sul dacites are preferentially aligned in the NE-SW direction, following the main structural directions of the crystalline basement of the Paraná Basin and approximately perpendicular to the Torres Syncline axis (Waichel et al. 2012).

The analysis of the structures that characterize the volcanic conduits in the area investigated by Simões et al. (2015), covering the municipalities of Mato Perso, São Marcos and Cambará do Sul, indicates a banding arranged with predominant NE-SW over NW-SE directions, with subordinate E-W and N-S directions and dipping ranging from 1 to 89°, with predominant sub-vertical dips. In the Jaquirana region, the sub-vertical banding measurements are predominant in the NE-SW direction.

The conduits inferred by Simões et al. (2018) have predominant sub-vertical orientations that trending NE-SW and NW-SE, and, on a regional scale, these outcrops of conduits are elongated from NW-SE to NE-SW. The field measurements of the conduits banding inferred by Simões et al. (2018) also show NW-SE and NE-SW trends, as well as the magmatic flow directions inferred using the AMS technique for conduits and lavas.

The direction of the foliations of the outcrops measured in this study show preferentially SE for the sub-horizontal foliations, and NE for the sub-vertical foliations, and the identified units show lava flow features, such as the presence of auto-breccias typical of flows combined with the absence of pyroclastic structures and textures, lithoclasts, crystalloclasts, shards and pumices.

According to Simões et al. (2018), the rheological homogeneity of the lava flows allows interpreting the magmatic flow directly from the magnetic foliations and the k_{\max} directions. In lavas, horizontal k_{\max} values are associated with flat magnetic foliations, which indicate a predominantly horizontal magmatic flow. In the conduits, a high dispersion of the axis data k_{\max} , k_{\min} and k_{int} resulting from the random orientation of the magnetic fabric is often found, and they can have a horizontal or locally vertical k_{\max} . Domes can exhibit almost vertical k_{\min} , high-angle k_{\max} and horizontal k_{\max} - k_{int} axes and can also show fabric zoning with high angle k_{\max} near the conduit zone and horizontal k_{\max} on the edges of the flow.

In samples PAS-41n e PAS-41b, which represent Unit I in this study, the k_{\max} is horizontal and the magnetic fabric is consistent with the flow orientations measured in the field. In sample PAS-38, which represents Unit III in this study, k_{\max} is horizontal, which could indicate a flow boundary, but can also indicate a predominantly horizontal magmatic flow. In samples PAS-06h, PAS-06v, PAS-17, which represent Unit IV in this study, a high dispersion of the k_{\max} , k_{\min} and k_{int} axis is observed, similar to the one observed in the conduits studied by Simões et al. (2018).

The units identified in this study are formed by dacites, rhyodacites, and rhyolites of tholeiitic affinities and metaluminous character. These units are chemically homogeneous, with the distinction based primarily on field structural aspects.

According to Polo et al. (2017a), a predominantly effusive model is consistent with the physical properties of the Serra Geral Group silicic magmas, such as higher temperatures (1010-930°C), lower water content (1-2% of weight) and lower viscosities (104-106 Pa.s), unlike typical silicic magmas.

High effusion rates could explain how large areas were covered by silicic lava flows since the distance traveled by lava can be directly proportional to the effusion rate (Walker 1973).

Regarding the structural difference shown in Units I and II (lava flows with magmatic foliation incipient to massifs vs. lava flows with sub-horizontal flow structures), this can be explained by the preserved area after erosion. The core, more central zone has a massive structure, while the peripheral zones, both in the upper and lower portions, present horizontal bedding, according to the model suggested by Nardy et al. (2008).

Unit III could be interpreted as a possible lava dome, due to the presence of flow foliations, auto-breccias, and characteristic textural variations, according to the model proposed by McPhie et al. (1993). The auto-brecciation could be explained by the non-explosive fragmentation of a lava flow, since the upper and lower portions of a lava flow present a faster heat loss when compared to its core, responding to stress in a fragile manner and causing the external fragmentation of the shell (McPhie et al. 1993). According to the endogenous dome model (Williams 1932 *apud* Newhall and Melson 1983), when the surface of the dome expands to accommodate the effusion of lava through the conduit, the external portions that are already cooled (base, top and front), break due to the great expansion pressure exerted on them and develop auto-breccias (the previously cooled shell, formed by massive obsidian, banded or pumice, is broken, generating angular clasts that are surrounded by a lava that stills in a plastic flow). The foliated edge around the solid core is caused by shearing of the fluid.

Unit IV is interpreted as a feeder conduit system. This unit shows a banding pattern and foliation attitudes similar to the results obtained by Simões et al. (2015), who investigated the occurrence of volcanic conduits in the northeastern region of Rio Grande do Sul. The foliations measured in the outcrops of Unit IV have two preferential directions. Foliations with sub-vertical dipping have a preferred NE-SW direction, while foliations with sub-horizontal dipping have a preferred SE-NW direction.

CONCLUSIONS

Among the landforms investigated in the Aparados da Serra region, there is a predominance of circular features, and the linear features are usually represented by elongated bodies of subordinate occurrence. The identified units are formed by dacites, rhyodacites, and rhyolites of tholeiitic affinities and metaluminous character. They are chemically homogeneous, which led to a new classification based on the present geological structures. They are: (i) lava flows with incipient magmatic foliation to massifs, (ii) lava flows with sub-horizontal flow structures, (iii) lava flows with dome flow structures, all associated with the circular features; (iv) lava flows with sub-vertical flow structures, associated with the linear features.

Unit I was confirmed by the AMS technique, which showed a flat arrangement of the magnetic foliation of the lavas, indicating a predominantly horizontal magmatic flow, characteristic of lavas flows. The landforms can also be explained by weathering processes that cause differential erosion, resulting in dome geomorphologies, and the structural difference between Units I and II is the result of the exposure of different portions of the lava flows. Thus, Unit I represents the core, most central zone of the effusion, while Unit II represents the peripheral zones, both in the upper and lower portions. The results obtained using the AMS technique were not conclusive to correlate the targets to volcanic domes in the samples of Unit III, such as the almost vertical k_{\min} , high-angle k_{\max} and horizontal k_{\max} - k_{int} axes. However, the circular features grouped in this unit may correspond to volcanic domes, due to field observations as the presence of auto-breccias, foliated edges surrounding massive cores and texture features such as the presence of highly vesicular breccias at the edges. The structures measured in the field in Unit IV were also confirmed by the AMS technique, which showed

horizontal or locally vertical k_{\max} and a greater dispersion of AMS data as a result of very complex, sometimes turbulent magmatic flow patterns, as expected for volcanic conduits. These feeder conduits are often associated with extensive lineaments.

Therefore, the circular landforms represented by Units I and II can be considered secondary and derived from the differential erosion associated with subsequent tectonism. With respect to Unit III, it is suggested that the circular feature and the dome morphology have a direct relationship with a volcanic morphology, due to its primary geological structures. The linear features represented by Unit IV can also be considered as primary structures related to feeder conduits and directly associated with primary volcanic processes.

ACKNOWLEDGMENTS

This work had partial financial support to C.A. Sommer and E.F. Lima from CNPq (400724/2014-6, 441766/2014-5, 302213/2012-0, 303584/2009-2, 473683/2007, 5470641/2008-8, 470203/2007-2, 471402/2012-5, 303038/2009-8 and 470505/2010-9), and from the Rio Grande do Sul State Research Foundation (FAPERGS) 1180/12-8, and PRONEX 10/0045-6. We also thank the laboratory support from the IGEO/UFRGS and Laboratory of Paleomagnetism and Geomagnetism of IAG-USP.

RESUMO

A Província Magmática Paraná-Etendeka está associada à tectônica distensiva que causou a ruptura do continente Gondwana durante o Cretáceo Inferior e gerou o intenso vulcanismo nas regiões do sul do Brasil. Esta sequência vulcânica é denominada Grupo Serra Geral na região do Sinclinal de Torres, que consiste predominantemente de basaltos e rochas ácidas subordinadas. Apesar das questões sobre os mecanismos de erupção, há um consenso de que complexos sistemas de condutos vulcânicos são considerados os principais alimentadores desses fluxos tabulares ácidos. O principal objetivo deste estudo é caracterizar as feições geomorfológicas observadas na região de Aparados da Serra, sul do Brasil, e avaliar a gênese e relação entre essas estruturas e os sistemas vulcânicos primários. A partir do processamento das imagens de satélite, as feições geomorfológicas foram divididas em grupos lineares e circulares, que foram reclassificados com base nas estruturas geológicas presentes, em quatro unidades. As unidades I e II correspondem aos fluxos de lava ácida ligados às erupções fissurais efusivas, apresentando uma morfologia dômica explicada pela erosão diferencial. As rochas da Unidade III podem corresponder a domos vulcânicos, enquanto as rochas da Unidade IV correspondem a condutos vulcânicos fissurais associados à extrusão de depósitos efusivos.

Palavras-chave: Anisotropia de susceptibilidade magnética; lavas ácidas; morfologias vulcânicas; processamento de imagens.

REFERENCES

- BARRETO CJS, LIMA EF, SCHERER CM AND ROSSETTI LMM. 2014. Lithofacies analysis of basic lava flows of the Paraná igneous province in the south hinge of Torres Syncline, Southern Brazil. *J Volcanol Geotherm Res* 285: 81-99.
- BELLIENI G, COMIN-CHIARAMONTI P, MARQUES LS, MELFI AJ, NARDY AJR, PICCIRILO EM AND ROISENBERG A. 1984a. High- and low-TiO₂ flood basalts from the Paraná plateau (Brazil): petrology and geochemical aspects bearing on their mantle origin.

Neues Jahrbuch für Mineralogie – Abhandlungen (Journal of Mineralogy and Geochemistry) 150: 276-306.

BELLIENI G, COMIN-CHIARAMONTI P, MARQUES LS, MARTINEZ LA, MELFI AJ, NARDY AJR, PAPATRECHAS C, PICCIRILLO E, ROISENBERG A AND STOLFA D. 1986b. Petrogenetic aspects of acid and basaltic lavas from the Paraná plateau (Brazil): geological, mineralogical and petrochemical relationships. *J Petrol* 27: 915-944.

BELLIENI G, PICCIRILLO EM, COMIN-CHIARAMONTI P, MELFI AJ AND ROIT P. 1988. Mineral chemistry of continental stratoid volcanics and related intrusives from the Paraná Basin (Brazil). In: PICCIRILLO EM AND MELFI AJ. (Ed). *The mesozoic flood volcanism of the Paraná Basin*. São Paulo: Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, [S.l.: s.n.].

BENITES S. 2015. *Investigação das estruturas associadas ao vulcanismo ácido da Formação Serra Geral na região de Aparados da Serra, RS*. Monografia de Conclusão de Curso, Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 155p.

BRYAN SE, PEATE IU, PEATE DW, SELF S, JERRAM DA, MAWBY MR, MARSH JS AND MILLER JA. 2010. The largest volcanic eruptions on Earth. *Earth Sci Rev* 102(3-4): 207-229.

COMIN-CHIARAMONTI P, BELLIENI G, PICCIRILLO EM AND MELFI AJ. 1988. Classification and petrography of continental stratoid volcanic and related intrusive from the Paraná Basin (Brazil). In: PICCIRILLO EM AND MELFI AJ. *The mesozoic flood volcanism of the Paraná Basin*. São Paulo: Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, p. 47-72.

DAY R, FULLER M AND SCHMIDT VA. 1977. Hysteresis properties of titanomagnetites: grain-size and compositional dependence, *Phys Earth Planet Inter* 13(4): 260-267.

DE LA ROCHE H, LETERRIER J, GRANDCLAUDE P AND MARCHAL M. 1980. A classification of volcanic and plutonic rocks using R_1R_2 -diagram and major element analyses – its relationships with current nomenclature. *Chem Geol* 29: 183-210.

DUNLOP DJ. 2002a. Theory and application of the Day plot (Mrs/Ms versus Hcr/Hc) 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data. *J Geophys Res* 107(B3).

DUNLOP DJ AND ÖZDEMIR Ö. 1997. *Rock Magnetism, fundamentals and frontiers*. Cambridge Studies in Magnetism Series, 689p.

ERNESTO M, RAPOSO MIB, MARQUES LS, RENNE PR, DIOGO LA AND DE MIM A. 1999. Paleomagnetism, geochemistry and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the North-eastern Paraná Magmatic Province: tectonic implication. *J Geodyn, Netherlands*, 28: 321-340.

ERNESTO M, MARQUES LS, PICCIRILLO EM, MOLINA EC, USAMI N AND BELLIENI G. 2002. Paraná Magmatic Province – Tristan da Cunha plume system: fixed versus mobile plume, petrogenetic considerations and alternative heat sources. *J Volcanol Geotherm Res* 118(1): 15-36.

EWART A, MILNER SC AND ARMSTRONG RA. 1998. Etendeka Volcanism of the Goboboseb Mountains and Messum Igneous Complex, Namibia. Part I: Geochemical

Evidence of Early Cretaceous Tristan Plume Melts and the Role of Crustal Contamination in the Parana-Etendeka CFB. *J Petrol* 39(2): 191–225.

EWART A, MARSH JS, MILNER SC, DUNCAN AR, KAMBER BS AND ARMSTRONG RA., 2004a. Petrology and geochemistry of Early Cretaceous bimodal continental flood volcanism of the NW Etendeka, Namibia, part 1: introduction, mafic lavas and reevaluation of mantle source components. *J Petrol* 45: 59–105.

FRANK HT. 2008. Gênese e padrões de distribuição de minerais secundários na Formação Serra Geral (Bacia do Paraná). Porto Alegre, 322p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

GARLAND F, HAWKESWORTH CJ AND MANTOVANI MSM. 1995. Description and petrogenesis of the Paraná Rhyolites [sic], Southern Brazil. *J Petrol* 36(5): 1193-1227.

GUIMARÃES LF, RAPOSO MIB, JANASI VA, CAÑÓN-TAPIA E AND POLO LA. 2018. An AMS study of different silicic units from the southern Paraná-Etendeka Magmatic Province in Brazil: implications for the identification of flow directions and local feeding. *J Volcanol Geotherm Res* 355: 304-318.

HENRY CD, PRICE JG, RUBIN JN, PARKER DF, WOLFF JA, SELF S, FRANKLIN R AND BARKER DS. 1988. Widespread, lava-like volcanic rocks of Trans-Pecos Texas. *Geology* 16: 509-512.

HENRY CD AND WOLFF JA. 1992. Distinguishing strongly rheomorphic tuffs from extensive silicic lavas. *Bull Volcanol* 54: 171-186.

JAIN S. 2013. *Fundamentals of Physical Geology*. Springer Science & Business Media. 488p.

JANASI VA, FREITAS VA AND HEAMAN LH. 2011. The onset of flood basalt volcanism, Northern Paraná Basin, Brazil: A precise U-Pb baddeleyite/zircon age for a Chapecó-type dacite. *Earth Planet Sci Lett* 302(1): 147-153.

JERRAM D, MOUNTNEY N, HOLZFORSTER F AND STOLLHOFEN H. 1999. Internal stratigraphic relationships in the Etendeka group in the Huab Basin, NW Namibia: understanding the onset of flood volcanism. *J Geodyn* 28(4-5): 393-418.

JERRAM DA, MOUNTNEY N, HOWELL J, LONG D AND STOLLHOFEN H. 2000. Death of a sandsea: an active aeolian erg systematically buried by the Etendeka flood basalts of NW Namibia. *J Geol Soc, London*, 157(3): 513–516.

LE BAS MJ, LE MAITRE RW, STRECKEISEN A AND ZANNETIN BA. 1986. Chemical classification of volcanic rocks based on total alkali-silica diagram. *J Petrol* 27: 745-750.

LIMA EF, PHILIPP RP, RIZZON GC, WAICHEL BL AND ROSSETTI LMM. 2012a. Sucessões vulcânicas e modelo de alimentação e geração de domos de lava ácidos da Formação Serra Geral na região de São Marcos-Antônio Prado (RS). *Geologia USP - Série Científica*, 12: 49-64.

LIMA EF, WAICHEL BL, ROSETTI LMM, VIANA AR, SCHERER CM, BUENO GV AND DUTRA G. 2012b. Morphology and petrographyc patterns of the pahoehoe and 'a'a flows of the Serra Geral Formation in the Torres Syncline, Rio Grande do Sul state, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 42: 744-753.

- LIMA EF, WAICHEL BL, ROSSETTI LMM, SOMMER CA AND SIMÕES MS. 2018. Feeder systems of acidic lava flows from the Paraná-Etendeka Igneous Province in southern Brazil and their implications for eruption style. *J S Am Earth Sci* 81: 1-9.
- LUCHETTI ACF, NARDY AJR, MACHADO FB, MADEIRA JEO AND ARNOSIO JM. 2014. New insights on the occurrence of peperites and sedimentary deposits within the silicic volcanics sequences of the Paraná Magmatic Province, Brazil. *Solid Earth* 5(1): 121-130.
- LUCHETTI ACF, GRAVLEY DM, GUALDA GAR AND NARDY AJR. 2018. Textural evidence for high-grade ignimbrites formed by low-explosivity eruptions, Paraná Magmatic Province, southern Brazil. *J Volcanol Geotherm Res* 355: 87-97.
- MANTOVANI MSM, MARQUES LS, SOUZA MA, ATALLA L, CIVETA L AND INONOCENTI F. 1985. Trace element and strontium isotope constrains of the origin and evolution of Paraná continental flood basalts of Santa Catarina State (Southern Brazil). *J Petrol* 26: 187-209.
- MARQUES LS, FIGUEIREDO AMG, SAIKI M AND VASCONCELLOS MBA. 1989. Geoquímica analítica dos elementos terras raras - aplicação da técnica de análise por ativação neutrônica. In: FORMOSO MLL, NARDY LVS, HARTMANN LA. (Ed.). *Geoquímica Dos Elementos Terras Raras No Brasil (15-20)*, CPRM/DNPM. Sociedade Brasileira de Geoquímica, Rio de Janeiro.
- MCPHIE J, DOYLE M AND ALLEN R. 1993. *Volcanic Textures: A guide to the interpretation of textures in volcanic rocks*. Tasmania, 191p.
- MELFI AJ. (ED.). 1988. The Mesozoic flood volcanism of the Paraná Basin: petrogenetic and geophysical aspects. In: PICCIRILLO EM. (Org.). São Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico, 600p.
- MILANI EJ. 2004. Comentários sobre a origem e a evolução tectônica da Bacia do Paraná. In: MANTESSO-NETO V, BARTORELLI A, CARNEIRO C AND NEVES B. (Ed.). *Geologia do continente sulamericano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo: Beca, 2004. p. 265-279.
- MILANI EJ, FERNANDES LA, FRANÇA AB, MELO JHG AND SOUZA PA. 2007. Bacia do Paraná. In: MILANI EJ. (Ed.). *Boletim de geociências da Petrobrás, Cartas estratigráficas*. Petrobrás, 15(2): 265-287.
- MILNER SC, DUNCAN AR AND EWART A. 1992. Quartz latite rheoignimbrites flows of the Etendeka Formation, north-western Namibia. *Bull Volcanol* 54: 200-219.
- MILNER SC, DUNCAN AR, WHITTINGHAM AM AND EWART A. 1995. TransAtlantic correlation of eruptive sequences and individual silicic volcanic units within Paraná- Etendeka Igneous Province. *J Volcanol Geotherm Res* 69: 137-157.
- MINCATO RL, ENZWEILER J AND SCHRANK A. 2003. Novas idades $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ e implicações na metalogênese dos depósitos de sulfetos magmáticos de Ni-Cu-EPG na Província Ígnea Continental do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, 9., Belém, Resumo Expandido, Belém/Pará, SBGq, p. 67-92.
- MOUNTNEY N, HOWELL J, FLINT S AND JERRAM D. 1998. Aeolian and alluvial deposition within the mesozoic Etjo sandstone formation, northwest Namibia. *J Afr Earth Sci* 27: 175-192.

- NAKAMURA N. 1974. Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 38(5): 757–775.
- NARDY AJR. 1995. Geologia e petrologia do vulcanismo mesozoico da região central da Bacia do Paraná. 316p. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, São Paulo.
- NARDY AJR, MACHADO FB AND OLIVEIRA MAF. 2008. As rochas vulcânicas mesozoicas ácidas da Bacia do Paraná: litoestratigrafia e considerações geoquímico-estratigráficas. *Revista Brasileira de Geociências* 38(1): 178-195.
- NEWHALL CG AND MELSON WG. 1983. Explosive activity associated with the growth of volcanic domes. *J Volcanol Geotherm Res* 17(1-4): 111-131.
- PEATE DW, HAWKESWORTH CJ AND MANTOVANI MSM. 1992. Chemical stratigraphy of the Paraná lavas (South América): classification of magma types and their spatial distribution. *Bull Volcanol* 55(1): 119-139.
- PEATE DW. 1997. The Paraná–Etendeka province. In: MAHONEY JJ AND COFFIN MF. (Ed.). *Large Igneous Provinces: Continental, Oceanic and Planetary Flood Volcanism*. Washington, DC: American Geophysical Union, p. 217-245.
- PETRINI R, CIVETTA L, IACUMIN P, LONGINELLI A, BELLIENE G, COMIN-CHIARAMONTI P, ERNESTO N, MARQUES LS, MELFI A, PACCA I AND PICCIRILLO EM. 1989. High temperature flood silicic lavas (?) from the Paraná Basin (Brasil). *New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resources Bulletin* 131: 213.
- PICCIRILLO EM, CIVETTA L, PETRINI R, LONGINELLI A, BELLIENI G, COMIN-CHIARAMONTI P, MARQUES LS AND MELFI AJ. 1989. Regional variations within the Paraná Flood Basalts (Southern Brazil): evidence for subcontinental mantle heterogeneity and crustal contamination. *Chem Geol* 75(1-2): 103-122.
- PICCIRILLO EM, BELLIENI G, CAVAZZINI G, COMIN-CHIARAMONTI P, PETRINI R, MELFI AJ, PINESE JPR, ZANTADESCHI R AND DE MIN A. 1990. Lower Cretaceous tholeiitic dyke swarms from the Ponta Grossa Arch (southeast Brazil): Petrology, Sr-Nd isotopes and genetic relationships with the Paraná flood volcanics. *Chem Geol* 89: 19-48.
- PINTO VM, HARTMANN LA, SANTOS JOS, MCNAUGHTON NJ AND WILDNER W. 2011. Zircon U-Pb geochronology from the Paraná bimodal volcanic province support a brief eruptive cycle at ~ 135 Ma. *Chem Geol* 281(1-2): 93-102.
- POLO LA. 2014. O vulcanismo ácido da Província Magmática Paraná-Etendeka, na região de Gramado Xavier, RS: estratigrafia, estruturas, petrogênese e modelo eruptivo. 340p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, SP.
- POLO LA, GIORDANO D, JANASI VA AND GUIMARÃES LF. 2017a. Effusive silicic volcanism in the Paraná Magmatic Province, South Brazil: Physico-chemical conditions of storage and eruption and considerations on the rheological behavior during emplacement. *J Volcanol Geotherm Res* 355: 115-135.
- POLO LA, JANASI VA, GIORDANO D, LIMA EF, CAÑÓN-TAPIA E AND ROVERATO M. 2017b. Effusive silicic volcanism in the Paraná Magmatic Province, South Brazil:

evidence for locally-fed lava flows and domes from detailed field work. *J Volcanol Geotherm Res* 355: 204-218.

POLO LA AND JANASI VA. 2014a. Volcanic stratigraphy of intermediate to silicic rocks in Southern Paraná Magmatic Province, Brazil. *Geologia USP - Série Científica*, 14: 83-100.

RENNE PR, ERNESTO M, PACCA IG, COE RS, GLEN JM, PRÉVOT M AND PERRIN M. 1992a. The age of Paraná flood volcanism, rifting of Gondwana land, and the Jurassic-Cretaceous boundary. *Science* 258: 975-979.

RENNE PR, DECKART K, ERNESTO M, FÉRAUD G AND PICCIRILLO EM. 1996a. Age of the Ponta Grossa dike swarm (Brazil) and implications to Paraná flood volcanism. *Earth Planet Sci Lett* 144: 199-212.

RENNE PR, GLEN JM, MILNER SC AND DUNCAN AR. 1996b. Age of Etendeka flood volcanism and associated intrusions in southwestern Africa. *Geology* 24: 659-662.

RICCOMINI C, SANT'ANNA LG AND FAMBRINI GL. 2016. The Early Cretaceous Jacuí Group, a newly discovered volcanoclastic-epiclastic accumulation at the top of the Paraná Basin, southern Brazil. *Cretac Res* 59: 111-128.

ROISENBERG A. 1989. *Petrologia e geoquímica do vulcanismo ácido mesozóico da Província Meridional da Bacia do Paraná*. 285p. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

ROSSETTI LMM, LIMA EF, WAICHEL BL, SCHERER CM AND BARRETO CJ. 2014. Stratigraphical framework of basaltic lavas in Torres Syncline main valley, southern Parana-Etendeka Volcanic Province. *J South Am Earth Sci* 56: 409-421.

SIMÕES MS, ROSSETTI LMM, LIMA EF, RIBEIRO BP. 2014. The role of viscosity in the emplacement of high-temperature silicic flows of Serra Geral Formation in Torres Syncline (Rio Grande do Sul State, Brazil). *Brazilian Journal of Geology* 44: 669-679.

SIMÕES MS, LIMA EF, SOMMER CA AND ROSSETTI LMM. 2015. Reconhecimento de condutos vulcânicos das rochas ácidas da PBC Paraná-Etendeka na porção NE do Rio Grande do Sul. In: VI SIMPÓSIO DE VULCANISMO E AMBIENTES ASSOCIADOS, 6., São Paulo, Anais, São Paulo, SP.

SIMÕES MS, LIMA EF, SOMMER CA AND ROSSETTI LMM. 2017. Structures and lithofacies of felsic volcanic feeder conduit systems in the Paraná-Etendeka LIP, southernmost Brazil. *J Volcanol Geotherm Res* 355: 319-336.

SIMÕES MS, RAPOSO MIB, LIMA EF AND SOMMER CA. 2018. Magmatic flow patterns in silicic feeder conduits and lava flows from 1 Paraná Etendeka LIP, southern Brazil: AMS fabric, magma transport properties and implications for emplacement. *Bull Volcanol*.

STEWART K, TURNER S, KELLEY S, HAWKESWORTH C, KIRSTEIN L AND MANTOVANI M. 1996. 3-D ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology in the Paraná continental flood basalt province. *Earth Planet Sci Lett* 143: 95-109.

TAUXE L, KYLSTRA N AND CONSTABLE C. 1991. Bootstrap statistics for paleomagnetic data. *J Geophys Res* 96(B7): 11723.

THIEDE DS AND VASCONCELOS PM. 2010. Paraná flood basalts: Rapid extrusion hypothesis confirmed by new $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ results. *Geology* 38(8): 747-750.

- TOMEK F, JIŘÍ Ž, KRYŠTOF V, FRANTIŠEK VH, JIŘÍ S, SCOTT RP AND VALBONE M. 2016. Mineral fabrics in high-level intrusions recording crustal strain and volcano–tectonic interactions: the Shellenbarger pluton, Sierra Nevada, California. *J Geol Soc*.
- TURNER S, REGELOUS M, KELLEY S, HAWKSWORTH C AND MANTOVANI MMS. 1994. Magmatism and continental break-up in the South Atlantic: high precision $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology. *Earth Planet Sci Lett* 121: 333-348.
- TURNER SP, PEATE DW, HAWKESWORTH CJ AND MANTOVANI MSM. 1999. Chemical stratigraphy of the Paraná basalt succession in western Uruguay: further evidence for the diachronous nature of the Paraná magma types. *J Geodyn* 28: 459-469.
- UMANN LV, LIMA EF, SOMMER CA AND LIZ JD. 2001. Vulcanismo ácido da região de Cambará do Sul; RS: litoquímica e discussão sobre a origem dos depósitos. *Revista Brasileira de Geociências* 31(3): 357-364.
- WAICHEL BL. 2006. Estruturação de derrames e interações lava-sedimento na porção central da Província Basáltica Continental do Paraná. Rio Grande do Sul. 123p. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- WAICHEL BL, LIMA EF, VIANA A, SCHERER CMS, BUENO G AND 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. *J Volcanol Geotherm Res* 215: 74-82.
- WALKER GPL. 1973. Lengths of lava flows. *Philos Trans Royal Soc* 274: 107-116.
- WERLANG MK. 2004. Configuração da rede de drenagem e modelado do relevo: Conformação da paisagem na zona de transição da Bacia do Paraná na Depressão Central do Rio Grande do Sul. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.
- WHITE RS AND MCKENZIE D. 1995. Mantle plume and flood basalts. *J Geophys Res* 100(b9): 17543-17585.
- WHITTINGHAM AM. 1989. Geological features and geochemistry of the acid units of the Serra Geral Formation, south Brazil. *Bull Volcanol - IAVCEI abstracts*, Santa Fé, New México, p. 293.
- WILDNER W, BRITO RSC, LICHT OAB AND ARIOLI EE. *Geologia e Recursos Minerais do Estado do Paraná: texto explicativo dos mapas geológico e de recursos minerais*. Curitiba: CPRM, 2006 (Convênio CPRM/MINEROPAR). 95p + mapas, Escala 1:200.000.
- WILLIAMS H. 1932. The history and character of volcanic domes. University of California publications. Department of Geological Sciences, Bulletin 21: 51-146.
- ZALÁN PV, WOLFF S, CONCEIÇÃO JCJ, ASTOLF M, VIEIRA I, APPI VT AND ZANOTTO OA. 1987. Tectônica e sedimentação da Bacia do Paraná. In: SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 3., Curitiba: SBGEO, v. 1, p. 441-473.
- ZALÁN PV, WOLF S, CONCEIÇÃO JC, ASTOLFÍ AM, VIEIRA IS, APPI VT, ZANOTTO OA AND MARQUES A. 1991. Tectonics and sedimentation of the Paraná Basin. In: ULBRICH, H.H.G.J. & ROCHA-CAMPOS, A.C. (Ed.). *Gondwana Seven*. São Paulo, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, p.83-117.

**ANEXO A – Tabela contendo os dados de
litoquímica**

Tabela 1: Resultados das análises químicas em rochas vulcânicas. Os elementos maiores são expressos em porcentagem (%), em peso, e os elementos traço e elementos terras raras, em ppm.

<i>Elemento</i>	<i>PAS-006D</i>	<i>PAS-006G</i>	<i>PAS-017A</i>	<i>PAS-017B</i>	<i>PAS-026B</i>	<i>PAS-032C</i>	<i>PAS-033</i>	<i>PAS-034</i>	<i>PAS-40A</i>	<i>PAS-41-1B</i>	<i>PAS-41-3C</i>	
<i>Elementos Maiores</i>	SiO ₂	66,77	67,03	67,23	67,10	67,25	68,1	67,71	65,62	66,65	66,98	67,55
	TiO ₂	1,05	1,01	1,02	1,03	0,93	0,93	0,99	0,95	1,04	1,01	0,91
	Al ₂ O ₃	12,85	12,53	12,48	12,58	12,50	12,35	12,35	12,82	12,40	12,47	12,25
	Fe ₂ O ₃	6,74	6,63	6,52	6,63	6,48	6,27	6,25	6,42	6,43	6,43	6,35
	MnO	0,08	0,09	0,12	0,13	0,11	0,11	0,1	0,11	0,11	0,15	0,11
	MgO	0,79	1,05	1,27	1,11	1,54	1,28	1,3	1,36	1,41	1,24	1,40
	CaO	2,33	2,71	2,98	2,98	2,84	3,06	2,89	3,51	3,00	2,98	2,89
	Na ₂ O	3,15	2,92	3,47	3,44	2,83	2,92	2,86	3,39	3,01	3,05	2,94
	K ₂ O	3,66	3,65	3,42	3,76	3,74	3,74	4,01	3,15	3,60	3,60	3,60
	P ₂ O ₅	0,31	0,30	0,30	0,31	0,26	0,24	0,25	0,25	0,30	0,30	0,25
	LOI	2,1	1,9	1,0	0,7	1,3	0,8	1	2,2	1,9	1,6	1,6
TOTAL	99,80	99,80	99,80	99,80	99,80	99,81	99,77	99,8	99,80	99,79	99,81	
<i>Elementos Traço</i>	Ba	626	611	562	598	609	621	605	620	577	756	596
	Rb	156,9	142,7	139,6	144,7	154,0	155,4	165,7	152,3	150,3	164,7	146,1
	Sr	137,2	130,1	140,1	138,4	132,8	150,9	148,9	168,7	127,5	135,2	137,4
	Ga	17,4	16,7	16,1	16,2	16,5	14,5	16,2	17,3	16,3	15,8	16,0
	Nb	20,5	20,2	20,5	19,5	19,4	17,9	20	19,9	19,8	19,7	18,3
	Zr	263,7	267,6	267,7	266,3	243,6	246,4	400	253,4	271,0	259,5	236,8
	Mo	1,4	1,1	1,5	1,6	1,2	1,2	1,3	0,6	1,3	0,8	0,8
	U	3,6	4,2	4,4	3,3	4,3	3,5	3,9	3,3	4,0	4,2	4,3
	Th	11,9	12,4	12,7	12,4	12,5	12,4	14,6	13,7	12,0	12,0	12,1
	Hf	7,0	6,8	6,9	7,1	6,5	6,7	13	6,7	7,0	7,1	6,2
	Cs	7,2	3,6	5,5	5,8	6,8	6,2	6,4	7,9	8,9	8,8	5,3
Ta	1,7	1,3	1,5	1,6	1,5	1,5	1,7	1,5	1,4	1,5	1,6	
<i>Elementos Terras Raras</i>	La	40,2	42,3	41,0	39,8	39,8	42,2	45,9	41,8	40,5	43,8	37,9
	Ce	78,1	84,8	79,6	80,4	78,0	82,5	90,9	83,4	76,2	88,7	75,7
	Pr	9,64	11,30	9,83	10,07	9,26	10,17	11,1	10,32	9,73	10,94	9,32
	Nd	37,5	44,0	37,7	39,6	36,0	38,8	43,2	40,6	39,6	43,4	35,7
	Sm	7,48	9,78	8,10	8,36	7,71	7,83	8,55	7,49	7,81	8,88	7,52
	Eu	1,76	2,10	1,66	1,82	1,54	1,59	1,65	1,52	1,64	1,81	1,56
	Gd	7,56	9,73	8,05	8,03	7,33	8,07	8,11	7,41	7,75	9,17	7,89
	Y	37,8	46,2	39,0	40,6	34,9	44,9	38,4	36,4	40,0	47,6	38,4
	Tb	1,20	1,55	1,34	1,31	1,15	1,28	1,27	1,23	1,26	1,44	1,22
	Dy	6,80	8,43	7,24	7,27	6,87	7,64	7,41	7,5	7,28	8,42	7,26
	Ho	1,33	1,69	1,42	1,43	1,36	1,45	1,4	1,42	1,43	1,67	1,47
	Er	3,70	5,02	4,18	4,41	3,70	3,94	3,98	3,71	4,10	5,07	4,00
	Tm	0,55	0,71	0,58	0,63	0,54	0,61	0,61	0,56	0,62	0,76	0,57
	Yb	3,47	4,45	3,79	3,86	3,69	3,98	3,95	3,77	4,01	4,78	3,57
Lu	0,51	0,64	0,61	0,60	0,52	0,57	0,6	0,52	0,58	0,69	0,56	

ANEXO B – Tabelas contendo os dados de ASM

Tabela 2: Medidas para ASM realizadas em campo.

Sítio	Ponto	Nº furos	Amostra	Azimute	Mergulho	B. Solar	Hora
Sítio 1	PAS-038	1	17PAS381	037º	68º	308º	15:34
		2	17PAS382	037º	62º	316º	15:58
		3	17PAS383	068º	44º	317º	16:14
		4	17PAS384	069º	43º	321º	16:40
		5	17PAS385	103º	45º	351º	16:22
		6	17PAS386	042º	72º	-	-
		7	17PAS387	043º	69º	-	-
		8	17PAS388	044º	76º	-	-
		9	17PAS389	046º	74º	-	-
		10	17PAS3810	047º	77º	-	-
		11	17PAS3811	047º	74º	-	-
Sítio 2	PAS-006v	1	17PAS0061	057º	21º	130º	9:27
		2	17PAS0062	069º	23º	-	-
		3	17PAS0063	168º	19º	230º	9:53
		4	17PAS0064	188º	09º	248º	10:05
		5	17PAS0065	070º	59º	-	-
		6	17PAS0066	078º	53º	-	-
		7	17PAS0067	073º	56º	-	-
		8	17PAS0068	M	M	M	-
		9	17PAS0069	017º	67º	-	-
		10	17PAS00610	001º	56º	-	-
		11	17PAS00611	007º	62º	-	-
		12	17PAS00612	005º	60º	-	-
		13	17PAS00613	008º	69º	-	-
Sítio 3	PAS-006h	1	17PAS00614	041º	14º	-	-
		2	17PAS00615	025º	17º	122º	12:02
		3	17PAS00616	337º	16º	-	-
		4	17PAS00617	025º	11º	-	-
		5	17PAS00618	298º	09º	30º	12:06
		6	17PAS00619	325º	07º	60º	12:09
		7	17PAS00620	309º	18º	51º	12:14
		8	17PAS00621	310º	12º	50º	12:17
		9	17PAS00622	339º	17º	85º	12:19
		10	17PAS00623	355º	10º	108º	12:23

Sítio	Ponto	Nº furos	Amostra	Azimute	Mergulho	B. Solar	Hora
Sítio 4	PAS-017	1	17PAS0171	006º	86º	215º	13:57
		2	17PAS0172	359º	71º	215º	14:01
		3	17PAS0173	354º	48º	218º	14:17
		4	17PAS0174	022º	53º	248º	14:25
		5	17PAS0175	055º	39º	-	-
		6	17PAS0176	059º	66º	-	-
		7	17PAS0177	046º	69º	-	-
		8	17PAS0178	033º	74º	-	-
		9	17PAS0179	033º	69º	-	-
Sítio 5	PAS-041b	1	PAS-0411	198º	12º	083º	16:40
		2	PAS-0412	160º	10º	061º	16:46
		3	PAS-0413	001º	14º	216º	16:50
		4	PAS-0414	029º	08º	006º	16:59
		5	PAS-0415	030º	10º	006º	17:04
		6	PAS-0416	017º	07º	325º	17:09
		7	PAS-0417	055º	11º	322º	17:13
		8	PAS-0418	081º	09º	343º	17:20
		9	PAS-0419	177º	08º	060º	17:27
		10	PAS-04110	127º	19º	015º	17:28
Sítio 6	PAS-041n	1	PAS-04111	220º	24º	035º	18:00
		2	PAS-04112	157º	11º	-	-
		3	PAS-04113	210º	16º	-	-
		4	PAS-04114	132º	07º	355º	18:17
		5	PAS-04115	212º	13º	270º	18:21
		6	PAS-04116	158º	08º	041º	18:24
		7	PAS-04117	001º	15º	330º	18:27
		8	PAS-04118	069º	10º	325º	18:30
		9	PAS-04119	119º	44º	033º	18:32
		10	PAS-04120	116º	01º	-	-
		11	PAS-04121	253º	22º	173º	18:40

PAS-038 (estrutura dômica), PAS-006v (estrutura de fluxo subvertical), PAS-006h (estrutura de fluxo sub-horizontal), PAS-017(estrutura de fluxo subvertical), PAS-041b (borda da feição composta) e PAS-041n (núcleo da feição composta). B. Solar: Bússola Solar.

Tabela 3: Dados de campo e parâmetros de ASM.

	Pontos	PAS06v	PAS06h	PAS017	PAS038	PAS41n	PAS41b
	N	26	22	26	39	39	33
Dados Escalares	km (10⁻³SI)	31,5	36,9	40,8	11,7	17,2	20,6
	P	1,036	1,023	1,017	1,009	1,011	1,007
	T	0,320	-0,075	-0,125	-0,490	0,240	0,142
	F	1,023	1,010	1,006	1,002	1,007	1,004
	L	1,013	1,013	1,011	1,007	1,004	1,003
Dados Direcionais	K₁	241/14	212/80	232/29	068/02	039/11	122/07
	e/z	32/12	37/17	34/24	33/9	68/24	37/13
	K₂	335/11	331/05	063/61	337/26	307/12	032/00
	e/z	32/11	36/33	52/29	44/32	68/20	37/19
	K₃	102/72	062/08	325/05	163/64	170/74	299/83
	e/z	14/9	34/17	52/29	44/9	26/18	20/13
Dados de Campo	Polo da Foliação	10/280	81/041	10/290	48/312	64/315	72/232

N: número de espécimes; km: susceptibilidade magnética média do local; P: grau de anisotropia; T: parâmetro de forma; F: foliação magnética; L: lineação magnética; K₁, K₂ e K₃: eixos de susceptibilidade magnética máximo, intermediário e mínimo; e/z: erro angular para as elipses máxima e mínima das estatísticas de Jelineck.

ANEXO I

Título da Dissertação/Tese:

" CARACTERIZAÇÃO DE ESTRUTURAS VULCÂNICAS ASSOCIADAS AO MAGMATISMO ÁCIDO DA PROVÍNCIA PARANÁ-ETENDEKA, NA REGIÃO DOS APARADOS DA SERRA, SUL DO BRASIL "

Área de Concentração: Geoquímica

Autor: **Susana Benites**

Orientador: Prof. Dr. Carlos Augusto Sommer

Examinador: Profa. Dra. Andréa Ritter Jelinek

Data: 01/10/2018

Conceito: A

PARECER:

A dissertação é estruturada na forma de artigo científico, que foi submetido à Revista Anais da Academia Brasileira de Ciências.

O objetivo principal foi caracterizar as feições geomorfológicas observadas na região dos Aparados da Serra, sul do Brasil e tecer considerações sobre a gênese e o vínculo destas estruturas aos sistemas vulcânicos primários.

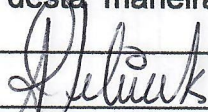
Tal objetivo foi buscado por meio de determinação das direções de fluxo magmático e magnético por meio do método de anisotropia de susceptibilidade magnética, que foram posteriormente integradas com aspectos geomorfológicos, petrológicos e geoquímicos das unidades previamente individualizadas.

Com base em características geomorfológicas foram identificadas feições lineares e circulares, as quais foram reclassificadas em quatro unidades com base nas estruturas geológicas. Duas delas, com morfologia dômica, são compostas por derrames de lavas ácidas vinculadas a erupções fissurais efusivas e são associadas à erosão diferencial. Uma terceira unidade é possivelmente composta por domos vulcânicos. A quarta unidade é composta por condutos vulcânicos fissurais, associados à extrusão de depósitos efusivos.

De maneira geral, a dissertação e o artigo científico estão bem redigidos, e ao final da leitura, é evidente o amadurecimento científico do autor.

Pode-se dizer que foram plenamente satisfeitos os objetivos pretendidos, justificando-se desta maneira, a obtenção do grau de Mestre com conceito A (excelente).

Assinatura:



Data: 01/10/2018

Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno:

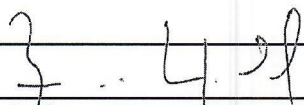
ANEXO I
Título da Dissertação/Tese:
" CARACTERIZAÇÃO DE ESTRUTURAS VULCÂNICAS ASSOCIADAS AO MAGMATISMO ÁCIDO DA PROVÍNCIA PARANÁ-ETENDEKA, NA REGIÃO DOS APARADOS DA SERRA, SUL DO BRASIL "
Área de Concentração: Geoquímica
Autor: Susana Benites
Orientador: Prof. Dr. Carlos Augusto Sommer
Examinador: Prof. Dr. Breno Leitão Waichel
Data: 13/11/2018
Conceito: B
PARECER:
<p>A dissertação de mestrado está bem estruturada e possui uma escrita que possibilita uma leitura agradável.</p> <p>A parte introdutória e de revisão abordam todos os aspectos relevantes ao tema.</p> <p>Cabe alguns comentários em relação ao artigo submetido, que é o ponto principal do trabalho.</p> <p>No resumo da dissertação é citado o uso do método de anisotropia de susceptibilidade magnética, no entanto isto não consta no abstract do artigo. Como este ponto é uma parte longa do texto deve ser citado no abstract, mesmo que os dados obtidos sejam discutíveis.</p> <p>Na figura 1- Colocar Brazil no mapa, Serra Geral Group. Materials- substituir "creation of thematic maps", em Geoprocessing também.</p> <p>Fg.3- um perfil topográfico abaixo de cada estrutura seria interessante.</p> <p>Fig 5- Luz natural? Nicóis cruzados??</p> <p>Fig-9 Estruturas lineares não são medidas em diâmetro.</p> <p>Discussões- No 5^o parágrafo da pagina 58 "According to Simões et al. (2018), the rheological homogeneity of the lava flows allows interpreting the magmatic flow directly from the magnetic foliations and the k_{max} directions. <i>In lavas, horizontal k_{max} values are associated with flat magnetic foliations, which indicate a predominantly horizontal magmatic flow. In the conduits, a high dispersion of the axis data k_{max}, k_{min} and k_{int}</i></p>

resulting from the random orientation of the magnetic fabric is often found, and they can have a horizontal or locally vertical k_{max} . Domes can exhibit almost vertical k_{min} , high-angle k_{max} and horizontal k_{max} - k_{int} axes and can also show fabric zoning with high angle k_{max} near the conduit zone and horizontal k_{max} on the edges of the flow.

Este trecho em itálico (grifo meu) se refere a referência Simões et al. Ou são dados teus? Não ficou claro.

Os dados direcionais de ASM foram pouco desenvolvidos na discussão e outros dados como mineralogia magnética, SEM (hábito dos cristais), curvas de histerese e de MRI sequer foram mencionadas.

Assinatura:



Data: 13/11/2018

Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno:

ANEXO I
Título da Dissertação/Tese:
" CARACTERIZAÇÃO DE ESTRUTURAS VULCÂNICAS ASSOCIADAS AO MAGMATISMO ÁCIDO DA PROVÍNCIA PARANÁ-ETENDEKA, NA REGIÃO DOS APARADOS DA SERRA, SUL DO BRASIL "
Área de Concentração: Geoquímica
Autor: Susana Benites
Orientador: Prof. Dr. Carlos Augusto Sommer
Examinador: Prof. Dr. Breno Leitão Waichel
Data: 13/11/2018
Conceito: B
PARECER:
<p>A dissertação de mestrado está bem estruturada e possui uma escrita que possibilita uma leitura agradável.</p> <p>A parte introdutória e de revisão abordam todos os aspectos relevantes ao tema.</p> <p>Cabe alguns comentários em relação ao artigo submetido, que é o ponto principal do trabalho.</p> <p>No resumo da dissertação é citado o uso do método de anisotropia de susceptibilidade magnética, no entanto isto não consta no abstract do artigo. Como este ponto é uma parte longa do texto deve ser citado no abstract, mesmo que os dados obtidos sejam discutíveis.</p> <p>Na figura 1- Colocar Brazil no mapa, Serra Geral Group. Materials- substituir "creation of thematic maps", em Geoprocessing também.</p> <p>Fg.3- um perfil topográfico abaixo de cada estrutura seria interessante.</p> <p>Fig 5- Luz natural? Nicóis cruzados??</p> <p>Fig-9 Estruturas lineares não são medidas em diâmetro.</p> <p>Discussões-</p> <p>No 5^o parágrafo da pagina 58 "According to Simões et al. (2018), the rheological homogeneity of the lava flows allows interpreting the magmatic flow directly from the magnetic foliations and the k_{max} directions. <i>In lavas, horizontal k_{max} values are associated with flat magnetic foliations, which indicate a predominantly horizontal magmatic flow. In the conduits, a high dispersion of the axis data k_{max}, k_{min} and k_{int}</i></p>

resulting from the random orientation of the magnetic fabric is often found, and they can have a horizontal or locally vertical k_{max} . Domes can exhibit almost vertical k_{min} , high-angle k_{max} and horizontal k_{max} - k_{int} axes and can also show fabric zoning with high angle k_{max} near the conduit zone and horizontal k_{max} on the edges of the flow. Este trecho em itálico (grifo meu) se refere a referência Simões et al. Ou são dados teus? Não ficou claro.

Os dados direcionais de ASM foram pouco desenvolvidos na discussão e outros dados como mineralogia magnética, SEM (hábito dos cristais), curvas de histerese e de MRI sequer foram mencionadas.

Assinatura:

3.4.21

Data: 13/11/2018

Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno: