

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

ARCABOUÇO ESTRATIGRÁFICO DAS ROCHAS VULCÂNICAS NA
SERRA DO RIO DO RASTRO - SC (GRUPO SERRA GERAL).

MARCIÉLI ELZIRA FROZZA

ORIENTADOR: PROF. DR. EVANDRO FERNANDES DE LIMA
CO-ORIENTADOR: PROF. DR. BRENO LEITÃO WAICHEL

PORTO ALEGRE - 2018

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

ARCABOUÇO ESTRATIGRÁFICO DAS ROCHAS VULCÂNICAS NA
SERRA DO RIO DO RASTRO - SC (GRUPO SERRA GERAL).

MARCIÉLI ELZIRA FROZZA

ORIENTADOR: PROF. DR. EVANDRO FERNANDES DE LIMA

COORIENTADOR: PROF. DR. BRENO LEITÃO WAICHEL

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Augusto Sommer – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Profa. Dra. Carla Joana Santos Barreto – Universidade Federal de Pernambuco

Profa. Dra. Eleonora Maria Gouvea Vasconcellos – Universidade Federal do Paraná

PORTO ALEGRE - 2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Rui Vicente Oppermann

Vice-Reitor: Jane Fraga Tutikian

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Diretor: André Sampaio Mexias

Vice-Diretor: Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Frozza, Marciéli Elzira

Arcabouço estratigráfico das rochas vulcânicas na Serra do Rio do Rastro - SC (Grupo Serra Geral). / Marciéli Elzira Frozza. - Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2018.

[99 f.] il.

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

Orientador(es): Evandro Fernandes De Lima

Coorientador(es): Breno Leitão Waichel

1. Geoquímica. 2. Grupo Serra Geral. 3. Província Paraná.

4. Morfologia de derrames. I. Título.

CDU 550.4

Catálogo na Publicação

Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS

Renata Cristina Grun

CRB 10/1113

*Dedico este trabalho às duas pessoas que mais me incentivaram
no caminho da geologia...*

*Gessé Evandro dos Santos, que me encorajou a acreditar e a
buscar essa profissão tão linda.*

*Breno Leitão Waichel, que desde a graduação até a finalização do
mestrado contribuiu para a minha permanência na Universidade .*

Agradecimentos

Nem sei como demonstrar em palavras a imensa gratidão que tenho pelo meu querido orientador e amigo Breno, o Dr. Peperito. Bom, vou começar com muito obrigada por ter sido este “pai amigo geológico”. Você não só acreditou em mim, como subsidiou de várias formas para que eu pudesse completar esta etapa. Você fez muita diferença na minha vida. É com muito orgulho e agradecimento sincero por você, que me tornarei mestre em Geociências... Quem diria! Agradecimento muito especial ao também orientador, prof. Evandro (Chinês) pelos ensinamentos e pela paciência com esta orientanda sumida do Vale. Muito obrigada pela orientação, oportunidade e pelo acolhimento na Pós-Graduação da UFRGS.

Um agradecimento especial ao Gessé que me incentivou, alimentou, deu café e chazinho nas horas necessárias, mas também cerveja e vinho nas outras ainda mais. Deu apoio moral, mas também bronca. Foi meu assistente de campo, ajudou a organizar tabelas. Ouviu minhas lamúrias e lamentações nos momentos difíceis, mas também riu junto e comemorou nas pequenas vitórias que foram surgindo. Isso tudo na fase do mestrado, porque se for falar em tudo o que passamos na vida, sairia um livro. Muito obrigada pelo companheirismo.

À minha família... mamis Merli, que me ensina o quanto temos que levantar a cabeça e seguir adiante, mesmo com todas as dificuldades que surgem. Minhas irmãs Marciane e Michele, que estão sempre torcendo por mim. Ao pai, que mesmo distante, sei e sinto o carinho que sente por mim. Amo vocês! À Iva, que participou de todas as fases da minha vida desde os 15 anos, sendo mais que sogra, uma segunda mãe... Gratidão!

Agradeço muito às minhas amigas que a geologia trouxe. Nosso grupo de Beldades: Milena, Gabi, Dany, Bela e Ingrid (minha companheira de apê em Poa). Obrigada por todo apoio e carinho que sempre me deram, sinto-me extremamente acolhida por vocês. Aos amigos que sempre me deram pouso quando precisei, Maiara (Mamá) e Matheus(inho), vocês são muito especiais e espero que nossos caminhos cruzem muitas vezes. Muito obrigada pela disponibilização dos seus lares!

Aos estrangeiros em Poa: Nati, Carla, Aurélio, Pedro, Larissa, Rayane, Isaque, Fernando, Érico, Vivi, Yolanda, Luíza, e outros que foram surgindo... Vocês deixaram tudo mais leve e interessante. Amei conhecer todos.

Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), onde tive oportunidade de conhecer excelentes professores e aulas maravilhosas. Aos funcionários do Anexo do IGEO-UFRGS pelo auxílio na preparação das amostras.

Agradeço à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), pelo espaço e material disponibilizado e pela convivência com os amigos e colegas do antigo LAB-LAM, atual Lab. de Geoquímica e grupo ESPEPETRO. Camila, Regiane, Carol (Miss Muller), Ana, Bruna, Douglas, Luiza, Debatin, Matheus, Henrique (Manga), João, Marcon, agradeço os cafés, jantares, barzinhos, conversas e risadas. E um agradecimento especial ao Lucas Del Mouro que junto com o Breno ajuda todos os estudantes desesperados, faz essa roda girar e coloca essa galera pra trabalhar. Gratidão...

Resumo: A abordagem na pesquisa da Província Paraná-Etendeka (PPE) que considera a arquitetura (interna e externa) das sucessões vulcânicas está sendo amplamente discutida. O vulcanismo que gerou a PPE cobriu cerca de 75% de toda a Bacia do Paraná e atualmente é denominado de Grupo Serra Geral. Na região da Serra do Rio do Rastro, em Santa Catarina, afloram rochas sedimentares e vulcânicas da Bacia do Paraná. A boa exposição do pacote vulcânico permitiu o trabalho em escala local para o reconhecimento das mudanças na arquitetura, petrografia e geoquímica dos derrames. A sucessão vulcânica é marcada pela intercalação de derrames *pahoehoe* e *rubblly pahoehoe*, com predomínio de *rubblly pahoehoe*, indicando variações na taxa de efusão com predomínio de taxas mais elevadas que geraram os derrames *rubblly pahoehoe*. Os derrames foram divididos em cinco associações de fácies: *pahoehoe ponded*, simples *pahoehoe*, *pahoehoe* composto, *rubblly pahoehoe* e derrames ácidos. A alternância no estilo eruptivo na evolução do vulcanismo propiciou o estabelecimento de 9 unidades vulcânicas nas 3 fases do vulcanismo. A composição mineralógica principal é: plagioclásio, augita, minerais opacos, e subordinadamente apatita e olivina. Nos derrames *pahoehoe* a principal textura é intergranular, enquanto nos derrames *rubblly* a textura hipocrystalina e afanítica e a abundância de micrólitos de plagioclásio na matriz são comuns. Os derrames ácidos são caracterizados por pitchstones com textura holohialina na base e granófiros com núcleo maciço e textura sal e pimenta no topo. As análises geoquímicas mostram dois grupos de conteúdo de titânio: alto TiO_2 (ATi, >2%peso) e (BTi, <2%peso), com predomínio do último. As rochas ATi são do magma-tipo tipo Urubici e o BTi predomina no tipo Gramado com uma unidade pertencente ao Ribeira. Cinco formações do Grupo Serra Geral foram separadas no perfil: Formação Torres, Formação Vale do Sol, Formação Urubici, Formação Ribeira e Formação Palmas. A intercalação da morfologia e arquitetura dos derrames mostram variações no modelo de colocação das lavas, seja pela mudança na paleotopografia, taxa de efusão e viscosidade do magma, bem como a geoquímica mostra diferentes fontes para as rochas que geraram os magmas. Entretanto estes os contrastes não são uma relação de causa e efeito porque não se observa controle químico nas diferentes morfologias.

Palavras chave: Província Paraná-Etendeka, Grupo Serra Geral, Colocação de lavas, Estratigrafia, Vulcanologia.

Abstract: The approach in the research of Paraná-Etendeka Province (PEP), which considers the architectures (external and internal) for volcanic successions, has been widely discussed. The volcanism that originated the PEP covered about 75% of the entire Paraná Basin and is currently known as the Serra Geral Group. In the Serra do Rio do Rastro region, sedimentary and volcanic rocks of the Paraná Basin with good exposure of the volcanic package allowed the work on a local scale to recognize the changes in the architecture, petrography, and geochemistry of the flows. The volcanic succession is marked by the intercalation of the pahoehoe and rubbly pahoehoe flows, with predominance of rubbly pahoehoe. The lava flows are divided into five facies associations: ponded pahoehoe, simple pahoehoe, compound pahoehoe, rubbly pahoehoe, and acidic flows. The interchange in the eruptive style along the evolution of the volcanism allowed the establishment of the nine volcanic units during three phases of the volcanism that indicate many types of emplacement and changes in paleotopography. The mineralogical composition is mainly: plagioclase, augite, opaque minerals and, subordinately apatite and olivine. In the pahoehoe flows, the intergranular texture with plagioclase-phyric basalts are common, while in the rubbly flows the presence of the hypocrystalline and aphanitic textures and abundance of the plagioclase microlites. In the acidic flows, the facies are characterized by pitchstones with holohyaline texture at the base and granophyres with massive core in the top. The geochemistry analyses demonstrate two groups of TiO_2 contents: high TiO_2 (HTi, > 2%) and low TiO_2 (LTi, < 2%), with a predominance of the latter. The rocks HTi are Urubici magma-type, and the LTi predominates in the Gramado type with a unit belong to the Ribeira type. Five formations of Serra Geral Group are separate: Torres Formation (TF), Vale do Sol Formation (VDS), Urubici Formation (UF), Ribeira Formation (RF) and Palmas Formation (PF). The intercalation of the morphologies and architecture shows variation in the lava emplacement model, either by the change in paleotopography, effusion rate and magma viscosity, as well as geochemistry shows different sources for the rocks that generated distinct magma compositions. Nevertheless, these contrasts are not a cause-and-effect relationship because there is no control of the chemical types in the different flow morphologies

Keywords: Paraná-Etendeka Province, Serra Geral Group, Lava emplacement, Stratigraphy, Volcanology.

Estrutura da Dissertação

Esta dissertação de mestrado está estruturada em torno de um artigo submetido em periódico e segue a Norma 103 de Submissão de Teses e Dissertações do Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. A seguir serão apresentados três capítulos que compreendem as seguintes partes principais:

- a) Capítulo I: Introdução sobre o tema e descrição do objeto da pesquisa de mestrado. A justificativa e os objetivos (gerais e específicos) da pesquisa desenvolvida com a localização da área. O estado da arte sobre o tema contemplando o contexto geológico e os materiais e métodos aplicados.
- b) Capítulo II: Apresentação do artigo científico submetido a periódico com corpo editorial permanente e revisores independentes, escrito pelo autor durante o desenvolvimento do Mestrado. O artigo é intitulado: STRATIGRAPHICAL FRAMEWORK OF VOLCANIC ROCKS OF SERRA GERAL GROUP IN SERRA DO RIO DO RASTRO, SANTA CATARINA STATE, BRAZIL, e foi submetido à revista JOURNAL OF AMERICAN EARTH SCIENCE, conforme confirmação de recebimento enviada pelo Editor do periódico e anexada junto a este capítulo.
- c) Capítulo III: Sumarização das conclusões e referências bibliográficas.

Lista de Figuras

CAPÍTULO I

FIGURA 1: MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	18
FIGURA 2: LOCALIZAÇÃO DAS PROVÍNCIAS MAGMÁTICAS: PARANÁ NA AMÉRICA DO SUL; ETENDEKA NA ÁFRICA DO SUL. (ADAPTADO DE PEATE ET AL., 1999 POR POLO, 2010).....	21
FIGURA 3: MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA BACIA DO PARANÁ COM DESTAQUE PARA O VULCANISMO SERRA GERAL DA SUPERSEQUÊNCIA GONDWANA III. ADAPTADO DE PEATE (1992) E JANASI ET AL (2011).....	22
FIGURA 4: DISTRIBUIÇÃO REGIONAL E ESTRATIGRÁFICA DOS MAGMAS-TIPO SEGUNDO PEATE ET AL. (1992) E PEATE (1997).....	26
FIGURA 5: MODELO DE LAVAS ÁCIDAS DO TIPO SR, PROPOSTO POR BRANNEY ET AL (2008). LAVAS COM BAIXAS RAZÕES DE ASPECTO (<i>LOW ASPECT RATIIONS</i>), RAZÕES DE ALTURA VS EXTENSÃO. EXTRAÍDO DE POLO (2014).....	31
FIGURA 6: ARQUITETURA DE FÁCIES VULCÂNICAS DESCRITAS POR WAICHEL ET AL. (2012), NA PORÇÃO SUL DA PBC PARANÁ. (TRADUZIDA POR BERRETO ET AL., 2014).....	33

CAPÍTULO II

FIG. 1: SIMPLIFIED GEOLOGICAL MAP OF THE PARANA BASIN WITH THE DISTRIBUTION OF THE VOLCANIC ROCK OF THE SERRA GERAL GROUP AND AND LOLOCATION OF THE STUDY AREA IN THE PORTION EAST OF THE BASIN (ADAPTED AFTER PEATE ET AL., 1992; STEWART ET AL., 1996; HAWKESWORTH ET AL., 2000) AND MODIFIED FROM WAICHEL ET AL., 2012).....	42
FIG. 2: A) SITUATION MAP WITH THE LOCATION OF VISITED POINTS ALONG DE SECTION. B) GEOLOGICAL MAP OF THE SERRA GERAL GROUP, IN SERRA DO RIO DO RASTRO REGION.	45
FIG. 3: PROFILE SHOWING THE CHARACTERISTICS OF THE DIFFERENT MORPHOLOGIES AND LITHOFACIES CODE DESCRIBED ALONG THE VOLCANIC SEQUENCE IN SERRA DO RIO DO RASTRO. THE CIRCLES INDICATED THE NUMBER OF THE FIGURES THAT WILL SHOW THE SET OF CHARACTERISTICS OF EACH FACIES ASSOCIATION DESCRIBED BELOW. THE COLOR OF THE CIRCLES IS ACCORDING TO THE COLLOR USED TO ILLUSTRATE THE DIFFERENTS MORPHOLOGIES AND FACIOLOGIES OF THE FLOWS.....	53
FIG. 4: REPRESENTATIVE SCHEME WITH THE MAIN DESCRIPTIONS AND INTERPRETATIONS OF THE FACIES ASSOCIATIONS IN SERRA DO RIO DO RASTRO.....	54
FIG. 5: PHOTOS SHOWING THE LITHOFACIES IN PONDED LAVA BETWEEN ELEVATIONS OF 760-865 M, OVERLAPPING THE SANDSTONES OF BOTUCATU FORMATION. A) CONTACT BETWEEN BOTUCATU SANDSTONE AND BASALTIC LAVA FLOWS, SHOW-STRETCHED VESICLES (BVES). A CHILLED MARGIN IN THE CONTACT IS HIGHLIGHTED BETWEEN THE RED LINES AND THE BLACK ARROW SHOW THE TRUNCATED CONTACT OF THE SANDSTONE; B) LOCALLY COARSER GRANULATION THAT CHARACTERIZES A PEGMATITE (BMVP) AND THE MORE PHANERITIC TEXTURE C) MASSIVE OR SPARSELY VESICULATED BASALT WITH IRREGULAR COLUMNAR JOINTING (BMCJ); D) VEINS OF SANDY (BVSV); E) HIGHLY VESICULAR AND AMYGDALOIDAL ZONE FROM THE FLOW TOPS (BV); F) DISCONTINUOUS AND THIN SHEETS OF SAND (SL).	56
FIG. 6: LOG SHOWING CHARACTERISTICS OF THE LITHOFACIES IN THE SIMPLE PAHOEHOE FACIES ASSOCIATION ALONG OF THE PROFILE THAT CROPS OUT BETWEEN ELEVATIONS OF 865 AND 1180 M. A) THE CONTACT BETWEEN TWO SIMPLE PAHOEHOE FLOW (DOTTED RED LINE) AND THE LOCALIZATION OF LITHOFACIES CODE (BHVL, BV, BMVPH) ALONG OF THE FLOWS; B) PODS WITH	

- SEGREGATION OF VESICLES (BPOD); C) VESICLE LAYERING (BHVL); D) BASAL SECTION OF A VESICLE CYLINDER (BVC); E) GIANT VESICLES / AMYGDALES (BGV) IN THE UPPER CRUST. 58
- FIG. 7: LOG SHOWING CHARACTERISTICS OF THE LITHOFACIES IN THE COMPOUND PAHOEHOE FACIES ASSOCIATION ALONG OF THE PROFILE THAT CROPS OUT BETWEEN ELEVATIONS OF 1285 – 1.300 M. A) STACKED LOBES WITH 0,5-2 M THICKNESS. B) WELL DISTRIBUTED VESICLES IN THE SMALL S-TYPE LOBE (BMV). THE YELLOW ARROW SHOWS THE THIN CHILLED MARGIN IN SOME CONTACTS OF THE LOBES; C) RED LINES SHOWING A CONTINUOUS SANDY LAYER THAT DIVIDED THE CONTACT BETWEEN UPPER CRUST OF THE COMPOUND PAHOEHOE AND THE BASE OF THE FLOW ABOVE; D) DETAIL OF THE SANDY LAYER (BETWEEN RED LINES) AND THE VITREOUS FRAGMENTS (YELLOW ARROW); E) SAMPLE OF THE SEDIMENTARY LAYER. DETAIL FOR THE ORIENTED VITREOUS FRAGMENTS ON THE SEDIMENTARY ROCK. 60
- FIG. 8: LOG SHOWING CHARACTERISTICS OF THE LITHOFACIES IN THE RUBBLY PAHOEHOE LITHOFACIES ASSOCIATION ALONG OF THE PROFILE THAT CROPS OUT BETWEEN ELEVATIONS OF 890 – 1.440 M. A) SUB-HORIZONTAL FLOW STRUCTURES (BSF); B) APHANITIC BASALT (BAM) WITH BLACK COLORATION AND ASPECT OF FRACTURING BLOCKED PATTERN; C) FLOW-TOP BRECCIA ENVELOPED MASSIVE CORE OF THE FLOW; D) SPACES BETWEEN FRAGMENTS FILLED WITH SEDIMENTS (BBSM); E) CHAOTIC ASSEMBLAGE OF FRAGMENTS AND REDDISH OXIDIZED COLORATION WITH FRACTURES AND GAP BETWEEN THE FRAGMENTS FILLED BY ZEOLITES. 62
- FIG. 9: LOG SHOWING CHARACTERISTICS OF THE LITHOFACIES IN THE ACIDIC LITHOFACIES ASSOCIATION ALONG OF THE PROFILE THAT CROPS OUT BETWEEN ELEVATIONS OF 1.440 – 1.500 M. A) GENERAL VIEW OF THE PLATEAU GEOMORPHOLOGY IN THE TOP OF THE SERRA DO RIO RASTRO. THE ROCKS OUTCROP AS BLOCKS AND BOULDERS; B) PITCHSTONES WITH BLACK COLORATION, CONCHOIDAL FRACTURES AND SPARSE MILLIMETRIC VESICLES (PMV); D) BLOCK OF ROCK WITH REDDISH COLORATION AND TABULAR STRUCTURE BANDING (GTS). 63
- FIG. 10: PHOTOMICROGRAPHS OF THE CONTACT BETWEEN BOTUCATU SANDSTONE AND THE VOLCANIC ROCKS OF THE SERRA GERAL GROUP. A) SANDSTONE WITH MEDIUM-GRAINS OF ROUNDED QUARTZ, CROSSED POLARISERS. B) GRAINS OF QUARTZ DETACHED AND INVOLVED BY THE LAVA, PARALLEL POLARISERS. 64
- FIG. 11: PHOTOMICROGRAPHS OF THE PONDED PAHOEHOE FLOW. A) INTERGRANULAR TEXTURE, CROSSED POLARISERS; B) DIKTYTAXITIC TEXTURE WITH CLAY MINERALS OF REDDISH-BROWN COLORATION, PARALLEL POLARISERS; C) PSEUDOMORPHO OF OLIVINE, PARALLEL POLARISERS. D) ZONATION AND SIEVE TEXTURE IN THE PLAGIOCLASE, CROSSED POLARISERS. 66
- FIG. 12: PHOTOMICROGRAPHS OF THE SIMPLE PAHOEHOE FLOWS. A) PORPHYRITIC TEXTURES AND ISOLATED PLAGIOCLASES, CROSSED POLARISERS; B) AGLOMERATIONS OF PLAGIOCLASES AND ALTERED OLIVINES, PARALLEL POLARISERS. C) APATITES AGLOMERATED IN THE CORE OF THE SIMPLE PAHOEHOE FLOWS, CROSSED POLARISERS. E) PLAGIOCLASE CRYSTALS WITH REABSORPTION FEATURES, CROSSED POLARISERS. 67
- FIG. 13: PHOTOMICROGRAPHS OF THE COMPOUND PAHOEHOE FLOWS. A) INTERGRANULAR TEXTURE IN THE INNER CORE OF THE THICKER UNIT OF LOBES, CROSSED POLARISERS. B) AMYGDALES FILLED BY CHALCEDONY IN THE INNER AND CELADONITE (GREEN COLLOR) IN THE EDGE OF THE AMYGDALE, PARALLEL POLARISERS. C) HOLOHYALLINE TEXTURE IN THE EDGE OF THE LOBES UNITS, CROSSED POLARISERS. D) SKELETAL MORPHOLOGIE IN PLAGIOCLASES CRYSTALS, CROSSED POLARISERS. 69
- FIG. 14: PHOTOMICROGRAPHS OF THE RUBBLY PAHOEHOE FLOWS. A) INTERGRANULAR TEXTURE WITH A CRYPTOCRYSTALLINE MATRIX, CROSSED POLARISERS. B) ROUNDED VESICLE/AMYGDALE BY CHALCEDONY IN THE BASE OF THE RUBBLY PAHOEHOE FLOWS, CROSSED POLARISERS. C) DIKTYTAXITIC TEXTURE IN THE INTERGRANULAR SPACES OCCUPIED BY CELADONITE, SMECTITE AND DISSOLUTION OF THE IRON OXIDE, PARALLEL POLARISERS. D) TRACKITIC TEXTURE WHERE THE PLAGIOCLASES PRESENTS PREFERENTIAL DIRECTION, CROSSED POLARISERS; E) VESICLES/AMYGDALES FILLED BY OPAL AND CHALCEDONY, PARALLEL

POLARISERS. F) AGREGATES OF OLIVINE CRYSTALS ALTERED TO IDdingsITE (REDDISH-BROWN COLOR) AND BOWLLINGITE (GREEN COLOR).	71
FIG. 15: PHOTOMICROGRAPHS OF THE ACIDIC FLOWS. A) HOLOHYALINE TEXTURE IN THE PITCHSTONE, WHIT SKELETAL AND MICROLITES OF PLAGIOCLASE AND PYROXENES, CROSSED POLARISERS. B) ROUNDED TO SUB-ROUNDED AMYGDALES IN THE VITROPHYRES, PARALLEL POLARISERS. C AND D) HIPOCRYSTALLINE MATRIX WITH INTERSTITIAL TURBID MASS AND MICROCRYSTALLINE AGGREGATE OF ALTERED FELDSPARS AND HYDRATED MINERALS, PARALLEL POLARISERS IN C AND CROSSED POLARISERS IN D...	72
FIG. 16: CLASSIFICATION DIAGRAM. A) TOTAL ALKALI VS SILICA DIAGRAM CLASSIFICATION (LE BAS ET AL., 1986). B) FeO^*/MgO VERSUS SiO_2 (MIYASHIRO, 1974). C) AFM DIAGRAM OF TOLETIC AND CALCIUM-ALKALINE SERIES DISCRIMINATION OF THE BASALTS INVESTIGATED IN THIS STUDY (IRVINE & BARAGAR, 1971).	73
FIG. 17: PROFILE OF THE SERRA DO RIO DO RASTRO SECTION SHOWING THE MORPHOLOGY TYPES ALONG THE RESPECTIVE ALTITUDES (M), VOLCANIC UNIT AND THE FORMATIONS CORRESPONDENT. THE STARS MARK THE ANALYZED SAMPLES.	75
FIG. 18: LARGER ELEMENTS IN THE FORM OF OXIDES (%) VERSUS MgO (%) FOR THE ACID AND BASIC FLOWS IN THE SERRA DO RIO DO RASTRO SECTION.	77
FIG. 19: VARIATION DIAGRAMS OF TRACE ELEMENT CONCENTRATION (PPM) VS. Zr (PPM) FROM ROCKS IN THE SERRA DO RIO DO RASTRO SECTION.	79
FIG. 20: MULTI-ELEMENT PLOT WITH PATTERNS OF RARE EARTH ELEMENTS NORMALIZED TO CHONDRITE (BOYNTON, 1984).	80
FIG. 21: CLASSIFICATION DIAGRAMS OF THE MAGMA-TYPES EXISTING IN THE SERRA DO RIO DO RASTRO PROFILE. A) Ti/Y VERSUS Ti/Zr ; C) P_2O_5 VERSUS TiO_2 FOR THE LTI ACID ROCKS SHOWING THE FIELDS OF THE SUBGROUPS OF THE PALMAS GROUP. ADAPTED FROM PEATE (1992).	81

Lista de Tabelas

CAPÍTULO I

TABELA 1: CLASSIFICAÇÃO DAS LIPS SEGUNDO BRYAN E ERNST (2006).	19
TABELA 2: CRITÉRIOS DE CLASSIFICAÇÃO DE MAGMAS-TIPO SEGUNDO PEATE ET AL. (1992).	25
TABELA 3: TIPOS DE DERRAMES BASÁLTICOS E MORFOLOGIAS. ADAPTADO DE DURAISWAMI ET AL., (2014).	28

CAPÍTULO II

TABLE 1: GEOCHEMICAL DATA OF VOLCANIC ROCKS FROM SERRA DO RIO DO RASTRO REGION.	48
TABLE 2: LITHOFACIES DESCRIPTION AND INTERPRETATION OF THE LAVA FLOWS OF THE SERRA GERAL SECTION.	50

Sumário

Estrutura da Dissertação	9
CAPÍTULO I	15
1. Introdução	15
1.1 Justificativa.....	15
1.2 Objetivos	17
1.2.1 Geral.....	17
1.2.2 Específicos	17
1.3 Localização	18
2. Estado da Arte e / ou Contexto Geológico da Área de Estudo.....	18
2.1 Grandes Províncias Ígneas (LIPs – Large Igneous Provinces).....	18
2.2 Províncias Basálticas Continentais (PBCs).....	19
2.3 Bacia do Paraná.....	21
2.3.1 Grupo Serra Geral	22
Aspectos Petrográficos.....	23
Aspectos geoquímicos das rochas básicas e intermediárias.....	24
Aspectos geoquímicos das rochas ácidas.....	26
Idade e duração do vulcanismo.....	27
Morfologia dos derrames subaéreos	27
Lavas ácidas.....	30
Arquitetura de fácies vulcânicas	31
3. Materiais e Métodos.....	33
CAPÍTULO II	37
4. Artigo Submetido.....	37
1. Introduction	40
2. Geological setting.....	41
2.1 Paraná Basin.....	41
2.2 . Basaltic lava flows	43
2.3 Geological setting of the Serra do Rio do Rastro region.	43
3. Study area and methodology	44
3.1 Field mapping.....	46
3.2 Petrography.....	46
3.3 Whole-rock geochemistry.....	47
4. Lithofacies analysis and morphology of the flows	50
4.1 Facies association of the pahoehoe flow fields	54
4.1.1 Poned lava (PL) facies association.....	54

4.1.2	Simple pahoehoe (SP) facies associations.....	56
4.1.3	Compound pahoehoe (CP) facies association.....	58
4.2	Facies association of the rubbly pahoehoe flows	60
4.3	Facies association of the acidic flows.....	62
5.	Petrography.....	63
5.1	Petrography of the contact zone of the Botucatu sandstone and the lavas of the Serra Geral Group	64
5.2	Pahoehoe lava flows.....	65
5.2.1	Ponded pahoehoe flow.....	65
5.2.2	Simple pahoehoe flows	66
5.2.3	Compound pahoehoe flows.....	68
5.3	Rubbly pahoehoe flows.....	69
5.4	Acidic flows	71
6.	Whole-rock Geochemistry	72
6.1	Major elements.....	74
6.2	Trace elements	77
6.3	Correlation with geochemical magma-types	80
7.	Discussion.....	81
7.1	Emplacement of lava flows at the Serra do Rio do Rastro and the relationship with the facies association	81
7.2	Petrography and volcanic textures.....	85
7.3	Defining formations of Serra Geral Group in Serra do Rio do Rastro profile....	86
8.	Conclusions and considerations.....	88
9.	Acknowledgments	90
10.	References	90
CAPÍTULO III		94
5.	Conclusões e considerações finais	94
6.	Referências	96

CAPÍTULO I

1. Introdução

Os eventos vulcânicos relacionados às Províncias Basálticas Continentais (PBCs) representam os maiores derrames de magma da história da Terra. Estes eventos são importantes, pois evidenciam a dinâmica interna do planeta (Mahoney e Coffin, 1997), bem como a história evolutiva do mesmo, através dos ciclos de construção e fragmentação dos supercontinentes. Também auxiliam na reconstrução de paleoambientes (Jolley, 1997) e contribuem para o entendimento dos efeitos que o vulcanismo exerce sobre a hidrosfera e a atmosfera (Jerram e Widdowson, 2005) e, conseqüentemente, os efeitos relacionados aos grandes eventos de extinção em massa registrados na história da Terra.

Ao longo da Serra do Rio do Rastro afloram rochas sedimentares e vulcânicas da Bacia do Paraná. Esta seqüência de rochas foi descrita pela primeira vez pelo geólogo americano Israel C. White, em 1908, quando da publicação do Relatório Final da “Comissão de Estudos das Minas de Carvão de Pedra do Brasil”. Os estudos realizados resultaram num amplo acervo de dados sobre o carvão sul-brasileiro, estratigrafia e paleontologia da Bacia Sedimentar do Paraná. Os dados levantados ao longo da Serra do Rio do Rastro resultaram na definição de uma coluna estratigráfica, consagrada como Coluna White, em homenagem àquele pioneiro. A seção ocorre ao longo da rodovia SC-390 no município de Lauro Muller, SC. Tem seu início por volta da altitude de 200 m, onde predominam rochas sedimentares, e se estende até cerca de 1.500 m no topo dos derrames vulcânicos.

Apesar da exposição e importância na estratigrafia da Bacia do Paraná nesta região (White, 1908), estudos de detalhe abordando a estratigrafia e a arquitetura de fácies nas rochas vulcânicas ainda não havia sido realizado. Com isso, o propósito deste estudo é o levantamento da estratigrafia, com enfoque na arquitetura de fácies, petrografia, caracterização geoquímica e gamaespectrometria das rochas vulcânicas presentes na Serra do Rio do Rastro, que podem ser lateralmente correlacionadas e auxiliar na compreensão da história evolutiva do magmatismo bem como os principais processos que atuaram na construção desta seqüência.

1.1 Justificativa

Estudos estratigráficos têm papel importante na investigação das Províncias Basálticas Continentais (PBCs) por revelar a estrutura interna e o desenvolvimento sequencial dos derrames. Isto é essencial para a compreensão de como as fontes e os processos magmáticos variaram durante a evolução da Província (Peate *et al.*, 1992).

Uma das maiores províncias magmáticas do planeta é a PBC Paraná-Etendeka, que teve importante contribuição para a geração da crosta continental (Milani *et al.*, 1995). Esta província ocorre na América do Sul e África, sendo que cerca de 90% está localizada no continente americano, no qual é preservada em uma área de aproximadamente $1,2 \times 10^6$ Km² e abrange Brasil, Paraguai, Uruguai e Argentina (Cordani e Vandomos, 1967).

No Brasil, o vulcanismo que originou a PBC Paraná, cobriu cerca de 75% de toda a Bacia do Paraná e atualmente é denominado de Grupo Serra Geral (Rossetti *et al.*, 2018). A grande extensão areal e volumétrica, juntamente com a concepção original sobre o arcabouço estratigráfico desta PBC que considerava os fluxos basálticos como sucessões de pacotes tabulares e espessos de lava sem levar em conta as taxas de efusão e tipos de derrames, contribuíram para o mapeamento com controle estratigráfico regional balizado principalmente em dados geoquímicos.

Atualmente, a abordagem na pesquisa das PBCs que considera as arquiteturas externas e internas para as sucessões vulcânicas está cada vez mais bem estabelecida. Com isso, houve significativo avanço na investigação da vulcanologia física, que passou a ser abordada de maneira sistemática, aonde diferentes técnicas vêm sendo utilizadas para a construção de um arcabouço que visa uma melhor compreensão dos processos evolutivos das PBCs e as relações de taxas de efusão e mecanismos de *emplacement* em escala local.

Os estudos atuais aliam técnicas já consagradas na estratigrafia da PBC Paraná como a geoquímica (Piccirillo *et al.*, 1987; Piccirillo e Melfi, 1988; Peate, 1992; 1999; Nardy *et al.*, 2008) e a vulcanologia física (Jerram e Stollhofen, 2002; Waichel, 2006; Duraiswami *et al.*, 2008; Waichel *et al.*, 2012; Lima *et al.*, 2012).

Trabalhos recentes com análises em escala local (Rossetti *et al.*, 2014; Barreto *et al.*, 2014; Barreto *et al.*, 2016) através da integração dos métodos de análise de fácies, petrografia, geoquímica e geofísica têm permitido uma melhor compreensão dos pacotes de lava e uma subdivisão mais detalhada de cada unidade vulcânica.

A heterogeneidade nos diferentes pacotes de lava levou à proposta da elevação hierárquica da Formação Serra Geral para Grupo Serra Geral, sendo até o momento reconhecidas quatro novas Formações (Formação Torres, Formação Vale do Sol, Formação Palmas, Formação Esmeralda) para os basaltos baixo TiO_2 na ombreira sul da Calha de Torres (RS) (Rossetti *et al.*, 2018). Para a continuação e evolução no entendimento da PBC Paraná, torna-se necessário o estudo da estratigrafia das diferentes arquiteturas de fácies aliados a dados petrográficos, geoquímicos e geofísicos em escala local que irão compor um sólido arcabouço estratigráfico para a definição das formações que constituirão o Grupo Serra Geral.

1.2 Objetivos

1.2.1 Geral

O objetivo geral deste trabalho é realizar a organização da sucessão estratigráfica dos derrames em escala de detalhe ao longo da Serra do Rio do Rastro e fornecer dados para a construção de um arcabouço estratigráfico na área de estudo levando em conta os aspectos vulcanológicos, padrões petrográficos, litogeoquímicos e gamaespectrométricos.

1.2.2 Específicos

- Determinar os tipos de derrames presentes na sequência com base nos aspectos estruturais e texturais e determinar a distribuição espacial dos mesmos.
- Aplicar o método de análise de fácies em sequências vulcânicas de platô continental, utilizando o esquema de litofácies para a organização dos derrames vulcânicos com base nas estruturas de segregação, texturas e características de superfície conforme proposto por Barreto *et al* (2014).
- Definir a associação de fácies baseada na análise das litofácies e na distribuição das diferentes arquiteturas.
- Construir o perfil estratigráfico do vulcanismo Serra Geral no perfil ao longo da Serra do Rio do Rastro – SC.
- Descrever as características petrográficas dos derrames e correlacionar aos aspectos vulcanológicos.

- Determinar a variação geoquímica nos derrames através das composições de elementos maiores, menores, traços e terras raras ao longo da sequência vulcânica para fazer a discriminação dos magmas-tipo na região estudada.

1.3 Localização

A seção ocorre na rodovia SC-390, popularmente conhecida como Serra do Rio do Rastro, no município de Lauro Muller – SC. Os pontos descritos começam a partir da cota 760 metros, no contato do Arenito Botucatu com as rochas vulcânicas, até cerca de 1.500 metros, já no município de Bom Jardim da Serra - SC (Figura 1).

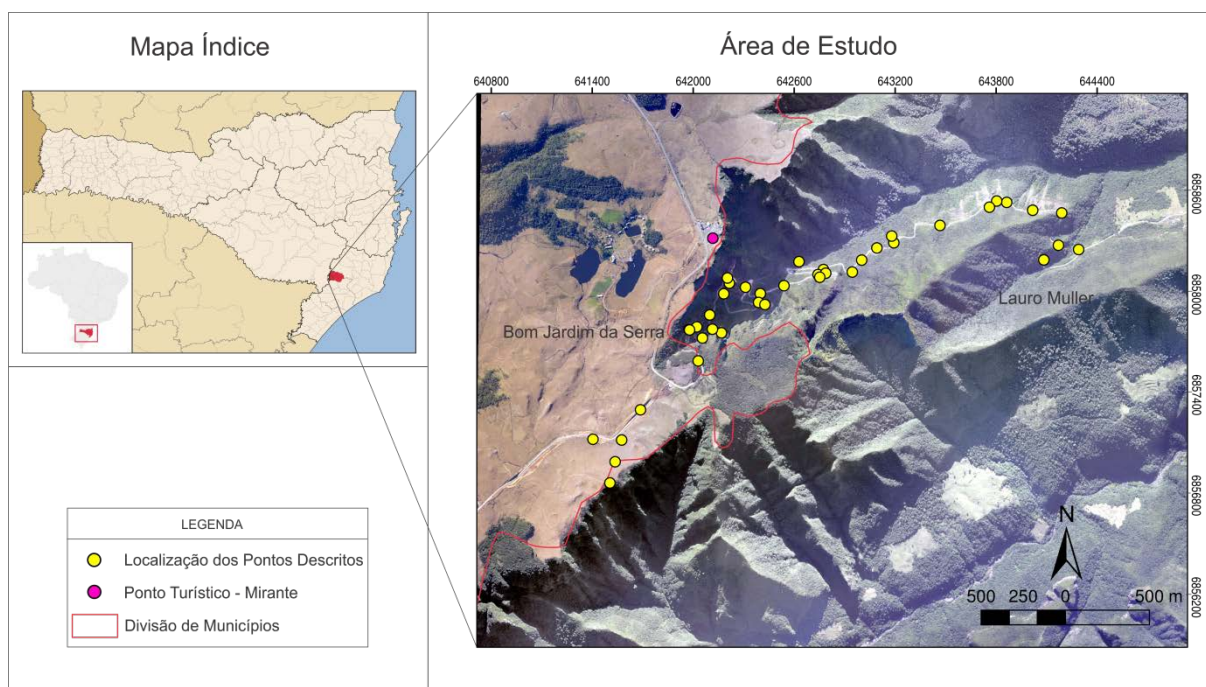


Figura 1: Mapa de localização da área de estudo.

2. Estado da Arte e / ou Contexto Geológico da Área de Estudo

2.1 Grandes Províncias Ígneas (LIPs – Large Igneous Provinces).

As LIPs são formadas a partir de eventos ígneos atípicos, comumente associados à presença de anomalias térmicas nas porções superiores do manto. A extrusão do magma se dá através de sistemas fissurais relacionados a esforços distensivos na crosta (Coffin e Eldholm, 1994). Estes eventos ocorrem durante um período relativamente curto na duração de colocação (<1-5 Ma), e geram grandes

volumes de lava (> 1000 Km³) de rochas extrusivas e intrusivas (Bryan e Ernest, 2008). As LiPs são divididas, segundo um conjunto de critérios que vão além da extensão, tempo e volume do material gerado. A classificação é baseada levando em consideração: Idade (Arqueano, Proterozoico, Fanerozoico); Volume; Contexto crustal (continental ou oceânico); Contexto tectônico; Duração de colocação do magma; Caráter intrusivo ou extrusivo (Sheth, 2007); Composição - ácidas ou básicas (Bryan e Ernst, 2006). A Tabela 1 mostra a classificação das LIPs segundo (Bryan e Ernst, 2008), na qual as Províncias Basálticas Continentais (PBCs) fazem parte das grandes províncias ígneas formadas no contexto Continental.

Tabela 1: Classificação das LIPs segundo Bryan e Ernst (2006).

LIP	CONTINENTAL	<ul style="list-style-type: none"> • PROVÍNCIAS BASÁLTICAS CONTINENTAIS (PBCs). Ex. Siberain, Karoo, Paraná-Etendeka, Deccan, Afro-Arabia, Columbia River. • ENXAME DE DIQUES CONTINENTAIS, SILLS E COMPLEXOS INTRUSIVOS MÁFICOS-ULTRAMÁFICOS. Ex. Mackenzie, Warakurna, Bushveld. • GREENSTONE BELTS ARQUEANOS (Associações Toleíticas-Komatiíticas). Ex. Superior, Tilgarn, Bulawayan, Era. • MARGENS DE RIFTS VULCÂNICOS. Ex. India-Western Austrália, Atlântico Norte. • ÁCIDAS. Ex. Whitsunday, Chon Aike, Sierra Madre Ocidental.
	OCEÂNICA	<ul style="list-style-type: none"> • PLATÔS OCEÂNICOS. Ex. Ontong Java-Manihiki-Hikurangi, Kerguelen, Caribe – Colômbia, Magellan Rise. • BASALTOS DE ASSOALHO OCEÂNICO. Ex. Bacia Nauru, Mariana Leste, Pigafetta.

2.2 Províncias Basálticas Continentais (PBCs)

Devido à localização em terras emersas, as PBCs são as províncias ígneas mais estudadas. A origem do magmatismo das PBCs é amplamente discutida e diversos modelos foram propostos. Richards *et al* (1989) destacaram que a gênese das PBCs está relacionada com a atuação de plumas mantélicas de forma ativa, ou seja, a geração do magma basáltico não estaria necessariamente relacionada ao

mecanismo de distensão da litosfera. Para White e McKenzie (1989), os processos distensivos ocasionam o alívio da pressão em regiões de plumas mantélicas, havendo então a atuação da anomalia térmica de forma passiva. Já o modelo proposto por Anderson (1994) aponta que o aquecimento no manto é causado pelo espessamento crustal devido ao desenvolvimento de supercontinentes, como agente desencadeador de uma expansão térmica, o que resulta em domeamento, fragmentação dos continentes e desenvolvimento de magmatismo de rifte.

As PBCs estão distribuídas em diversas regiões do globo, sendo as do Deccan, Paraná-Etendeka, Columbia River, Siberian Traps e Karoo as principais (Tabela 1).

Os magmas das PBCs geralmente apresentam caráter toleítico e conteúdos relativamente baixos de MgO, Ni e #Mg, sendo sua composição mais evoluída, apresentando intenso fracionamento de magmas picríticos (Garfunkel, 2008). Rochas de composição ácida e/ou alcalina também são registradas em algumas províncias, como os dacitos e riolitos presentes na PBC Paraná-Etendeka (Bellieni *et al.*, 1983)

Os estágios evolutivos das PBCs são estudados conforme a estruturação interna dos depósitos gerados durante o magmatismo. Para isso, diversos parâmetros como: padrões de empilhamento, assinaturas geoquímicas, e variações nos volumes e estilos eruptivos são analisados. O reconhecimento e correlação de erupções individuais dentro dos pacotes vulcânicos são fundamentais para determinar a sobreposição estratigráfica (Bryan *et al.*, 2010).

Para os padrões de fluxos e taxas de erupção, as PBCs do Columbia River Basalts e do Deccan fundamentaram os modelos propostos quanto à geração dos basaltos continentais. Altas taxas de erupção gerariam fluxos simples, já fluxos compostos derivam de baixas taxas (Walker, 1971). Porém, Bondre e Duraiswami (2004) registraram tanto fluxos simples como compostos na PBC do Deccan e isso indica que para a geração das PBCs pode haver, portanto, mais de um mecanismo de erupção.

Uma das maiores províncias magmáticas do planeta ocorre na América do Sul e em uma porção remanescente na África. Esta província, denominada de Província Magmática Paraná-Etendeka (Figura 2), antecedeu a abertura do Atlântico Sul e o magmatismo está associado à fragmentação do supercontinente Gondwana, durante o Cretáceo Inferior. No Brasil, a Província Magmática Paraná (PMP) abrange 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. Esta província constitui parte do arcabouço estratigráfico da Bacia do Paraná, e é denominado de Grupo Serra Geral (Rossetti et al., 2018).



Figura 2: Localizao das Províncias Magmáticas: Paraná na América do Sul; Etendeka na África do sul. (adaptado de Peate et al., 1999 por Polo, 2010).

2.3 Bacia do Paraná

A bacia intracratônica do Paraná localiza-se na Plataforma Sul Americana e, segundo Quintas et al., (1997) abrange cerca de 1.100.000 km² no Brasil e mais de 300.000 km² no Paraguai, Argentina e Uruguai. A bacia possui formato alongado na direo NNE – SSW e foi desenvolvida completamente sobre a crosta continental, preenchida por rochas sedimentares e vulcânicas, cujas idades variam entre o Siluriano e o Cretáceo (Zalán et al., 1990).

O arcabouço estratigráfico da Bacia do Paraná  constituído por seis unidades de ampla escala (Milani e Ramos, 1998), ou supersequências no conceito de Vail et al., (1977). Destas, três representam ciclos transgressivos-regressivos do Paleozóico: (Rio Ivaí (Caradociano- Landoveriano), Paraná (Lockoviano- Frasniano), Gondwana I (Westfaliano- Scythiano), e outras três que representam pacotes sedimentares continentais e rochas ígneas associadas: Gondwana II (Anisiano-Noriano), Gondwana III (Neojurássico- Berriasiano) e Bauru (Aptiano-Maestrichtiano). O registro completo do arcabouço constitui o intervalo de 450 a 65

Ma (Milani e Ramos, 1998), e grande parte do tempo encontra-se condensado em hiatos que separam as supersequências.

O vulcanismo da Bacia do Paraná consta na Supersequência Gondwana III e compreende o intervalo do registro estratigráfico em que situam os sedimentos eólicos da Formação Botucatu e os derrames vulcânicos do Grupo Serra Geral (Figura 3).

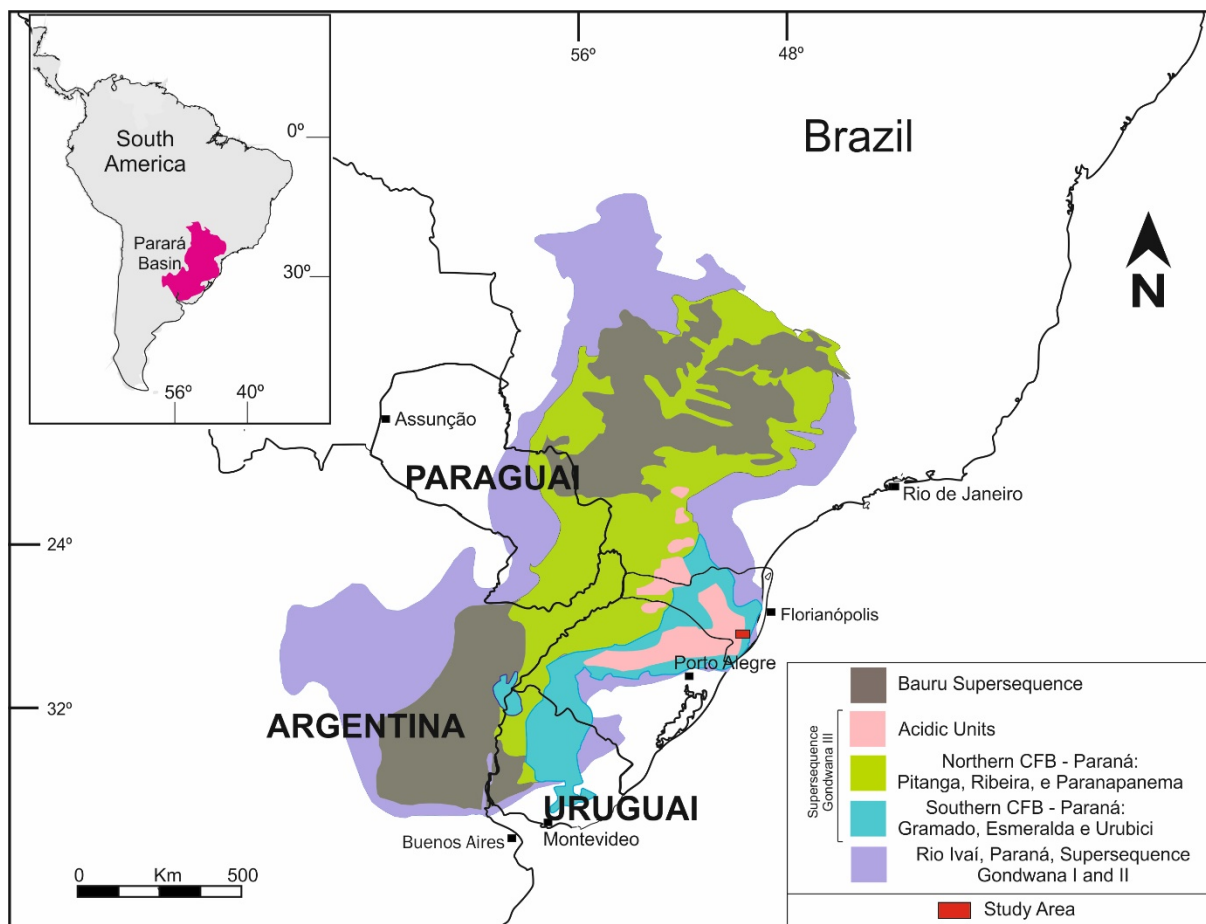


Figura 3: Mapa de Localização da Bacia do Paraná com destaque para o vulcanismo Serra Geral da Supersequência Gondwana III. Adaptado de Peate (1992) e Janasi et al (2011).

2.3.1 Grupo Serra Geral

A sequência vulcânica da Bacia do Paraná foi denominada de “Eruptivas Serra Geral” por White (1908) e posteriormente de Formação Serra Geral por Gordon (1947). Atualmente, foi proposto por Rossetti *et al.* (2018) uma nova hierarquia para esta unidade que passou de Formação para Grupo Serra Geral.

A sucessão de derrames das rochas vulcânicas Serra Geral possui uma espessura máxima de cerca de 1.700 metros (Almeida *et al.*, 1986), nos quais predominam basaltos de afinidade toleítica (Melfi *et al.*, 1988) em aproximadamente

90% do volume total da pilha vulcânica. As rochas vulcânicas intermediárias representam 7 % e as ácidas aproximadamente 3%, (Bellieni *et al.*, 1984, 1986).

Além dos derrames, importantes volumes de rochas ígneas intrusivas, também de natureza toleítica, ocorrem sob a forma de soleiras e diques. As soleiras afloram principalmente na parte nordeste da Bacia do Paraná. Os diques se concentram em três principais enxames: O enxame do Arco de Ponta Grossa (com direção NW), da Serra do Mar (direção NE) e de Florianópolis (direção NNE). Os enxames de diques estão distribuídos em geometria radial (Almeida *et al.*, 2012), que pode ser interpretada como uma junção tríplice (Coutinho, 2008).

Os derrames do GSG estão sob o embasamento cristalino quando localizados mais ao norte da Bacia do Paraná. Já na porção sul, eles ocorrem sobrepostos ao Arenito Botucatu, sendo que em alguns locais é possível a visualização da morfologia original das dunas (Scherer, 2002). Ainda ao sul, na ausência do Arenito Botucatu, os derrames recobrem os sedimentos lacustres e triássicos da Formação Santa Maria (Machado, 2005).

A caracterização estratigráfica do vulcanismo foi diferenciada pelos aspectos petrográficos e, principalmente, geoquímicos e são divididos em três litotipos principais (Bellieni *et al.*, 1984, 1986): rochas básicas a intermediárias (basaltos, andesito-basaltos e andesitos); rochas ácidas tipo Chapecó (ATC), dacitos, riódacidos, e riolitos; e as rochas ácidas tipo Palmas (ATP), riolitos e riódacitos.

Aspectos Petrográficos

As rochas básicas a intermediárias apresentam textura principalmente intergranular, com cristais ripiformes de plagioclásio, com piroxênios e minerais opacos nos interstícios. Ocorre também, algumas variações com a textura intersetal e hialofílica (Nardy *et al.*, 2008).

As rochas básicas são compostas essencialmente de: "*fenocristais e/ou microfenocristais (0,2 a 0,5 mm) de augita, plagioclásio, pigeonita, pequenas proporções de titanomagnetita e rara olivina (completamente alterada), em matriz composta essencialmente por estes mesmos minerais*" (Marques e Ernesto, 2004, p.248). Nos termos intermediários (andesi-basaltos e andesitos), os mesmos autores descrevem que possuem os mesmos minerais contituíntes nas rochas básicas, exceto olivina, e indicam a presença de quartzo e ilmenita na matriz.

Nardy (1995) verificou que tanto os basaltos, como os andesito-basaltos possuem coloração escura (cinza a negra), apresentam estruturas maciças e também vesicular/amigdalóide e podem ocorrer como lavas afíricas a sub-afíricas (Bellieni *et al.*, 1986).

As rochas ácidas tipo Palmas são afíricas, possuem textura hipo a holohialina e aspecto sal-e-pimenta (Nardy *et al.*, 2008), que se destacam quando a rocha se altera. Apresentam coloração cinza clara e por vezes, vermelho acastanhada. De acordo com os autores, a matriz é granofírica, composta por material semivítreo de coloração castanha escura, com intercrescimento de micrólitos de quartzo e feldspato alcalino. Nardy *et al.*, (2008) denotam ainda que essas rochas, quando constituídas por mais de 90% de vidro (holohialinas), exibem coloração negra e fratura conchoidal. Devido à natureza amorfa, alteram-se facilmente sendo comum afloramentos totalmente intemperizados, onde é possível verificar vesículas e amígdalas (até 1 cm), preenchidas por quartzo. Segundo Machado (2005), a mineralogia principal destas rochas é: plagioclásio, augita, pigeonita, opacos e apatita. A mesóstase completa o volume da rocha e caracteriza-se por ter aspecto microgranular, com microcristais de plagioclásio com morfologia do tipo “cauda de andorinha”, característica de resfriamento rápido (Nardy *et al.*, 2008).

As rochas ácidas Tipo Chapecó possuem textura porfirítica, com fenocristais de plagioclásio (<2cm) que podem representar até 30% do volume da rocha. Textura glomeroporfirítica também é observada. A matriz é afanítica com coloração que varia de cinza esverdeada (fresca) a castanho-avermelhada (alterada) e é constituída por quartzo, feldspato alcalino, plagioclásio, piroxênio, Ti-magnetita e ilmenita (Bellieni *et al.*, 1986). Segundo Machado (2005), a composição mineralógica é composta principalmente de plagioclásio, augita, pigeonita, opacos e apatita, respectivamente. Presença de mesóstase vítrea completa a composição.

Aspectos geoquímicos das rochas básicas e intermediárias.

Diversos trabalhos com enfoque em estudos geoquímicos reforçaram os critérios de composição necessários para designar um tipo específico de magma. Isto permitiu a organização e a classificação dos basaltos através de uma abordagem regional no posicionamento estratigráfico da sequência vulcânica na Bacia do Paraná, com enfoque em magmas-tipo (Bellieni *et al.*, 1984; 1986; Mantovani *et al.*, 1985; Piccirillo e Melfi, 1988; Piccirillo *et al.*, 1987, 1988; Marques,

1988; Marques *et al.*, 1989; Peate *et al.*, 1992; Peate, 1997; Nardy, 1995; Nardy *et al.*, 2008).

As rochas básicas e intermediárias foram primeiramente divididas em dois grupos diferenciados pelos teores de titânio e elementos incompatíveis (Bellieni *et al.*, 1984; Mantovani *et al.*, 1985; Melfi *et al.*, 1988). Na proposta geral de classificação geoquímica para os basaltos e andesito-basaltos da PMP, os litotipos que apresentam baixo titânio (BTi - $\text{TiO}_2 < 2\%$) possuem baixas concentrações de elementos menores e traços incompatíveis (P, Ba, Sr, Zr Hf, Ta, Y e terras raras leves), se comparado com os que apresentam alto titânio (ATi – $\text{TiO}_2 > 2\%$).

Seis tipos de magmas foram reconhecidos para as rochas basálticas Província Magmática Paraná (PMP) com base na abundância de elementos maiores, menores e traços. Os elementos com alta densidade de carga (Ti, Zr e Y) ganharam maior relevância por serem, geralmente, imóveis nos processos de alteração hidrotermal e intemperismo (Peate *et al.*, 1992). Os magmas ATi foram subdivididos nos tipos Urubici, Pitanga e Paranapanema, e os de BTi nos magmas-tipo Gramado, Esmeralda e Ribeira.

Esta classificação em tipos de magma marcou mudanças importantes na natureza dos grupos geoquímicos da PMP. A Tabela 2 mostra os valores de referência para a classificação segundo a composição de elementos e/ou relações específicas dentro de cada tipo de magma que foram utilizados por Peate *et al.*, (1992). Os autores apontam que, embora a divisão de alto e baixo-Ti esteja enraizada na literatura, o comportamento de TiO_2 durante o fracionamento de cristais mostra que o mesmo não pode ser usado como o único discriminante entre os tipos de magma. Portanto, para essa divisão, aplicou-se razões de elementos incompatíveis no intuito de reduzir o efeito da mudança composicional causada por variados graus de cristalização fracionada.

Tabela 2: Critérios de classificação de magmas-tipo segundo Peate et al. (1992).

	Alto-Ti			Baixo-Ti		
(%)	Urubici	Pitanga	Paranapanema	Ribeira	Esmeralda	Gramado
SiO_2	>49	>47	48-53	49 - 52	48 - 55	49 - 60
TiO_2	>3,3	>2,8	1,7 - 3,2	1,5 - 2,3	1,1 - 2,3	0,7 - 2,0
P_2O_5	>0,45	>0,35	0,2 - 0,8	0,15 - 0,50	0,1 - 0,35	0,05 - 0,40
$\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{t})$	<14,5	12,5 - 18	12,5 - 17	12 - 16	12 - 17	9 - 16
(ppm)						
Sr	>550	>350	200 - 450	200 - 375	<250	140 - 400

Ba	>500	>200	200 – 650	200 – 600	90 – 400	100 - 700
Zr	>250	>200	120 – 250	100 – 200	65 – 210	65 - 275
Ti/Zr	>57	>60	>65	>65	>60	<70
Ti/Y	>500	>350	>300	<330	<330	
Zr/Y	>6,5	>5,5	4,0 – 7,0	3,5 – 7,0	2,0 – 5,0	3,5 – 6,5
Sr/Y	>14	>8	4,5 – 15	5 – 17	<9	<13
Ba/Y	>14	>9	5 – 19	6 – 19	<12	<19

Com base nestes dados foi construída uma estratigrafia geoquímica regional (Figura 4), aonde na porção sul predomina uma província de baixo-Ti/Y (<300) onde ocorrem magmas do tipo Gramado na base, recobertos por dacitos e riolitos do tipo Palmas e sucedidos por basaltos do tipo esmeralda. O magma-tipo alto-Ti/Y Urubici ocorre intercalado ao tipo esmeralda no limite nordeste da escarpa Serra Geral no sul do Brasil. Na porção norte a província alto-Ti/Y (>300) ocorre derrames basálticos do tipo Pitanga na base sucedido por Paranapanema. O tipo Ribeira aparece numa zona de transição na porção central e estratigraficamente abaixo do pitanga.

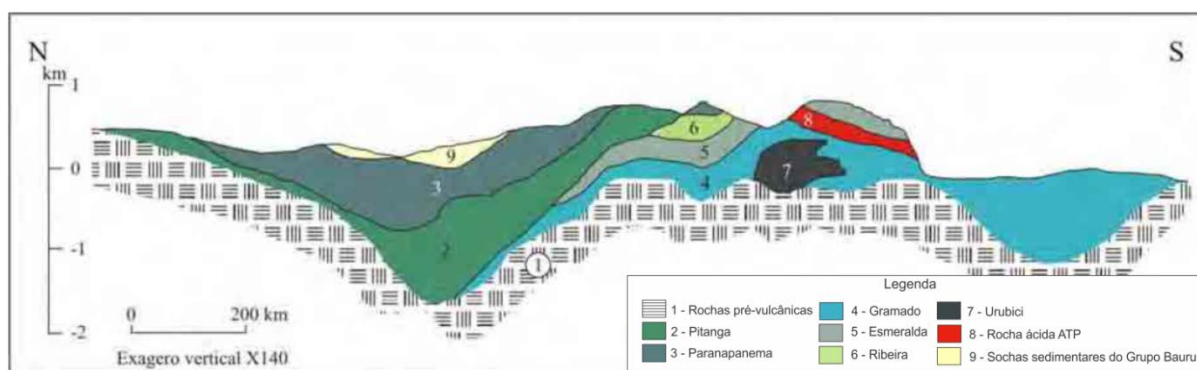


Figura 4: Distribuição regional e estratigráfica dos magmas-tipo segundo Peate et al. (1992) e Peate (1997).

Aspectos geoquímicos das rochas ácidas

Para as rochas ácidas, Bellieni *et al.*, (1984, 1986) e Mantovani *et al.*, (1985) denominaram de tipo Palmas e Chapecó, e também atribuíram diferenças geoquímicas significativas, que estão associadas ao litotipo BTi e ATi, respectivamente.

Peate *et al.*,(1992) subdividiram o tipo Palmas nos grupos Santa Maria e Caxias do Sul e o tipo Chapecó nos grupos Guarapuava e Ourinhos. O principal fator de distinção destes grupos é a abundância de elementos incompatíveis. O

grupo Chapecó apresenta valores de Zr > 500ppm, Ba > 900 ppm e Sr >250 ppm. No grupo Palmas os valores são: Zr < 400 ppm, Ba < 800 ppm e Sr < 170 ppm (Peate *et al.*, 1992).

As rochas ácidas tipo Palmas (ATP) são associadas aos magmas BTi (Bellieni *et al.*, 1986; Piccirillo *et al.*, 1988; Nardy.,1995) e são derivadas da fusão parcial de basaltos do tipo Gramado (Garland *et al.*, 1995). Este litotipo apresenta volume superior às rochas ácidas tipo Chapecó (ATC), correspondendo a 80% do volume total das ácidas e a 2,5% do volume total do magmatismo da PMP (Nardy *et al.*, 2008).

Idade e duração do vulcanismo

A idade do GSG foi primeiramente determinada pelo método K/Ar, que atestou um intervalo temporal de 147 a 119 Ma (Amaral *et al.*, 1967; Cordani *et al.*, 1984). Técnicas utilizando Ar/Ar (Renne *et al.*, 1992), mostraram que o magmatismo na porção sul da Bacia do Paraná situa-se entre $131,4 \pm 1,6$ e $132,9$ Ma, e mais jovens nas regiões norte e central da Bacia ($129,9 \pm 0,1$ e $131,9 \pm 0,9$ Ma). Idade pela sistemática U-Pb (em badeleíta/zircão) realizada em dacito do Grupo Chapecó obteve idade de $134,3 \pm 0,8$ Ma (Janasi *et al.*, 2011), sendo um pouco mais velho do que os basaltos alto-Ti/Y acima ($133,6$ - $131,5$ Ma) e recobrimdo o embasamento ao norte da bacia. Estes dados indicam um período de tempo ~ 3 Ma para a construção da sequência alto-Ti da Bacia do Paraná.

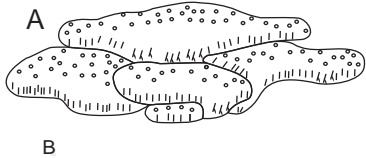
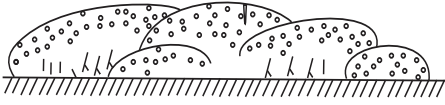
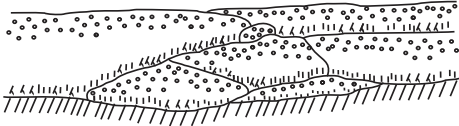
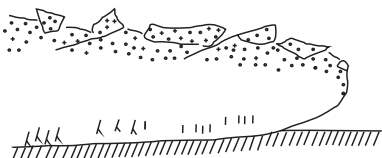
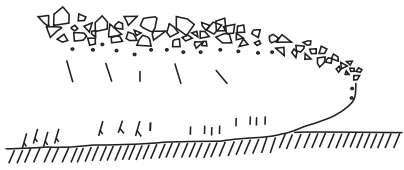
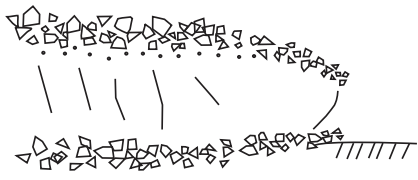
Morfologia dos derrames subaéreos

Os derrames basálticos são os mais comuns na crosta terrestre e são identificados a partir de feições de superfície e das estruturas presentes (Macdonald, 1953). Os derrames de lava podem se apresentar como unidades de fluxo únicos, denominados de derrames simples e estão associados à taxas de efusão elevadas. Ou como derrames compostos que são caracterizados por diversas unidades de fluxo, geralmente pequenos e pouco espessos, sobrepostos uns em relação aos outros e que se resfriaram simultaneamente.

As feições de superfície que caracterizam a morfologia dos derrames basálticos foram primeiramente descritas por Macdonald (1953) em *pahoehoe*, *á'ā* e lava em bloco. Há também os derrames transicionais, que correspondem a estágios de viscosidade intermediários entre lavas *pahoehoe* e *á'ā* (Nunes, 2002;

Duraiswami *et al.*, 2003; 2008). A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta a definição dos principais tipos morfológicos dos derrames subaéreos.

Tabela 3: *Tipos de derrames basálticos e morfologias. Adaptado de Duraiswami et al., (2014).*

Tipo	Desenho Esquemático	Definição
<i>Pahoehoe</i>		<p>Termo havaiano que significa “em forma de corda”. Possuem superfícies lisas, onduladas ou em corda. Podem ter muitas unidades - (<i>pahoehoe</i> composto (A), ou uma única unidade - <i>pahoehoe</i> simples (B).</p>
<i>Hummoky pahoehoe</i>		<p>Compreende lavas com pequenos lobos, superfície suave tipo <i>hummocky</i>. Forma fluxos compostos devido à baixa taxa de efluxão e paleotopografia ondulada.</p>
<i>Sheet pahoehoe</i>		<p>Variedade de <i>pahoehoe</i> que consiste em grandes lobos tabulares e camadas grossas. As unidades são empilhadas uma por cima da outra, formando uma superfície plana e geometria tabular.</p>
<i>Slaby pahoehoe</i>		<p>Contém uma série de placas espaçadas, com alguns metros de diâmetro e centímetros de espessura, que são quebradas e inclinadas pelo movimento da lava. Derrame gradacional entre <i>pahoehoe</i> e ‘a’ā, com características predominantes de <i>pahoehoe</i>, mas com a crosta “quebrada”.</p>
<i>Rubbly pahoehoe</i>		<p>Fluxos de lava com base preservada e topo escoriáceo (brechado). Derrame transicional entre <i>pahoehoe</i> e ‘a’ā, colocadas com uma taxa de erupção maior que a <i>pahoehoe</i>.</p>
<i>‘a’ā</i>		<p>Topo e a base escoriáceos, um núcleo maciço com vesículas alongadas. São mais viscosos que o <i>pahoehoe</i> e por isso avançam mais devagar em uma mesma superfície.</p>

- Derrames *pahoehoe*: possuem superfícies lisas, onduladas ou em corda. Na dinâmica dos fluxos *pahoehoe*, observa-se primeiramente um avanço da lava na forma de lobos com pequena espessura, a crosta superior é então formada rapidamente quando em contato com o meio, isolando o

sistema interno do fluxo. Essa crosta preserva a estrutura interna do sistema (em geral 1100° C), com uma baixa perda de calor por condução (~1° C/Km) (Keszthelyi, 1995). A crosta superior é inflada pela pressão interna dos voláteis e então ocorre o espalhamento, espessamento e o transporte que pode chegar a longas distâncias. Para isso, o processo de inflação depende da baixa inclinação da superfície de base (<5° de declividade) e de uma baixa taxa de efusão.

Em seção vertical, os derrames *pahoehoe* são divididos em crosta superior, núcleo e crosta inferior (Macdonald, 1953). Sendo que a porção basal é caracterizada por uma zona vesiculada, o núcleo maciço e com granulação média, e a crosta superior com uma zona vesicular de espessura que geralmente possui a metade da espessura total do fluxo (Aubele *et al.*, 1988).

- Derrames *ʻaʻā*: as principais características que definem este tipo de derrame são o topo e a base escoriáceos, um núcleo maciço e vesículas alongadas. Lavas do tipo *ʻaʻā* são típicas de resfriamento rápido, taxas de erupção mais elevadas e topografia mais inclinada quando comparadas aos derrames *pahoehoe* (Macdonald, 1953; Rowland e Walker, 1990). Os derrames *ʻaʻā* não atingem grandes distâncias da fonte, pois são transportados em canais abertos, o que causa uma elevação na perda de calor e, conseqüentemente, um aumento na viscosidade e na taxa de deformação durante o avanço do fluxo (Lima *et al.*, 2012). Outro fator que acelera o resfriamento é que a crosta escoriácea é parcialmente misturada com a porção central quando o fluxo avança.

Estes derrames estão associados a altas taxas de efusão (Macdonald, 1953; Rowland e Walker, 1990) e relevos com topografia inclinada que contribui para a deformação durante o fluxo (Hon *et al.*, 2003). A rápida perda de calor de 2°C/km a 5°C/km aumenta a viscosidade aparente e a taxa de deformação por cisalhamento durante o escoamento (Loocks *et al.*, 2010). Isso contribui para uma maior cristalinidade (quantidade de cristais) nos seus núcleos (MacDonald, 1953).

- Derrames *rubbly pahoehoe*: É um tipo de derrame transicional, entre *pahoehoe* e *ʻaʻā*. Suas características definidoras são a base vesicular pouco

espessa preservada, núcleo maciço e crosta superior vesicular e topo brechado (Keszthelyi, 2002; Duraiswami *et al.*, 2014). Estes fluxos possuem uma base lisa que é típico de pahoehoe.

No GSG, derrames *rubbly pahoehoe* foram identificados na porção sul da sinclinal de Torres (Barreto *et al.*, 2014; Rosseti *et al.*, 2014). Os autores descreveram que a espessura destes derrames varia entre 40 e 50 metros e que possuem geometria tabular.

Lavas ácidas

A manifestação do magmatismo ácido na superfície pode se dar de duas formas: efusão de lavas, na qual se manifesta em forma de derrames ou domos vulcânicos; erupção explosiva através do acúmulo de material piroclástico.

Fluxos ácidos coerentes geram derrames de lavas (fluxos laminares) em situações específicas controladas principalmente pela viscosidade (Polo, 2014). Ou seja, a viscosidade é o principal fator que controla o comportamento dos magmas durante a sua colocação em superfície. As lavas riolíticas tendem a ser mais viscosas e a se movimentarem lentamente. Estruturas de fluxo são comuns em rochas vulcânicas ácidas e refletem a combinação de alta viscosidade e fluxo laminar (Fink e Pollard, 1983).

Nas grandes províncias ígneas, os depósitos vulcânicos são associados a erupções de muito alta temperatura (>1000°C) e foram descritos na província *Snake River*, por isso a denominação riolito tipo SR (Branney *et al.*, 2008). Estes tipos de depósitos de lava de composição riolítica ocorrem em extensos derrames na qual a distribuição horizontal é maior do que a espessura (*low aspect ratios*), o que geralmente é associado à lavas basálticas, mas neste caso devido às altas temperaturas magmáticas é possível que ocorra nas lavas ácidas (**Figura 5**).

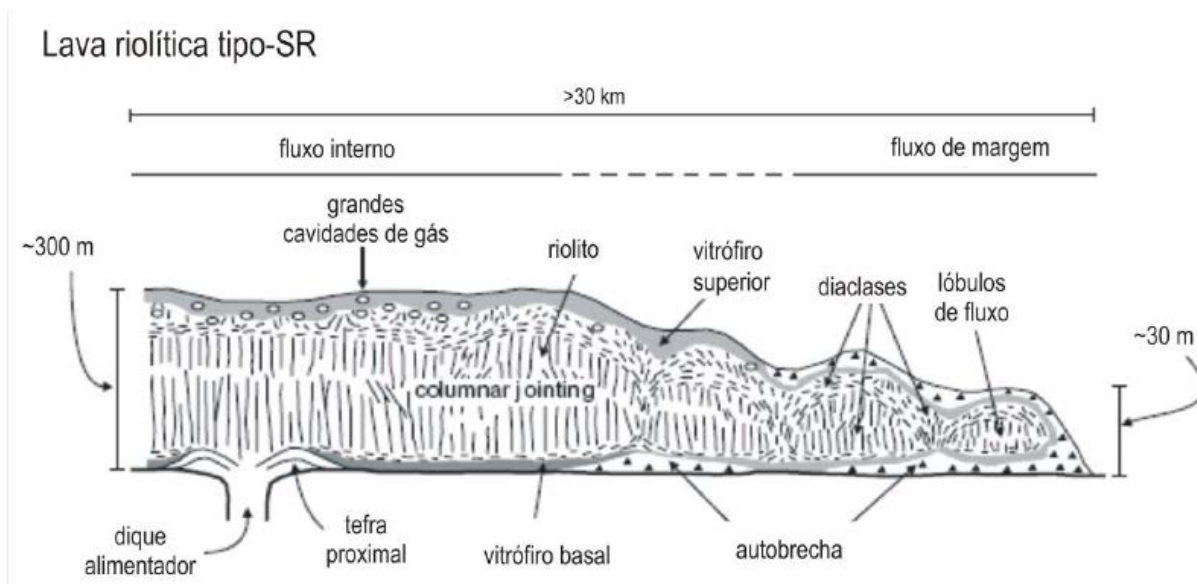


Figura 5: Modelo de lavas ácidas do tipo SR, proposto por Branney *et al* (2008). Lavas com baixas razões de aspecto (*low aspect ratios*), razões de altura vs extensão. Extraído de Polo (2014).

Arquitetura de fácies vulcânicas

Walker (1971) correlacionou as taxas de erupção como um importante fator no controle da morfologia das lavas, sendo que a distância percorrida por uma lava pode ser diretamente proporcional à taxa de efusão. Geralmente, as taxas de efusão de lavas básicas são maiores do que nas intermediárias e ácidas. Deste modo, pode-se perceber que as lavas *pahoehoe* e *'a'ā* são muitas vezes emitidas de um mesmo centro eruptivo, sendo estes fatores: taxa de efusão, viscosidade do magma, morfologia e a inclinação da superfície de escoamento, que determinam o aspecto superficial do derrame. Outros fatores que influenciam nas propriedades das lavas e contribuem para mudanças nas feições de superfície são o teor de voláteis e o modo de resfriamento (Macdonald 1953; Peterson e Tilling 1980).

Jerram (2002) considerou que a arquitetura de fácies em basaltos subaéreos possui dois membros finais definidos como fácies tabular clássica e fácies composta anastomosada. A fácies tabular clássica compreende a arquitetura clássica, com um fluxo simples e geometria em camada tabular que é separada por paleossolos e outros indicadores tais como níveis clásticos (Walker, 1971). Primeiramente este tipo de fluxo foi interpretado como resultante de erupções rápidas e com taxas de efusão extremamente elevada (Shaw e Swanson, 1970; Walker, 1971; 1973). Porém, esta natureza turbulenta, indicada para a geração de fluxos simples foi questionada em trabalhos realizados nos basaltos do Columbia River (Self *et al.*, 1998). Estes

autores indicam que os fluxos são na realidade compostos, estabelecidos sob condições não turbulentas e baixas taxas de efusão, denominados de *pahoehoe* inflados. Fluxos *pahoehoe* inflados têm sido identificados na PBC Paraná-Etendeka (Jerram *et al.*, 2000; Waichel *et al.*, 2006; Bondre *et al.*, 2004; Waichel *et al.*, 2012; Barreto *et al.*, 2014; Rossetti *et al.*, 2014). A fácies do tipo composto anastomosado consiste de vários fluxos *pahoehoe* formado por pequenos corpos de lava, gerados em condições de taxas de efusão bem mais baixas (Walker, 1973; Jerram, 2002).

De uma maneira geral, a arquitetura de facies composta anastomosada e tabular clássica propostas por Jerram (2002) correspondem aos termos composto e simples de Walker (1971), respectivamente.

O que se pode perceber, é que os estudos pioneiros sobre as sequências vulcânicas geradas pelo magmatismo das PBCs consideravam os derrames basálticos como pacotes tabulares e espessos de lava (Piccirillo e Melfi, 1988). Self *et al.*, (1998) passaram a considerar os aspectos vulcanológicos e promoveram uma melhor compreensão da dinâmica destas províncias ígneas. Trabalhos posteriores empregaram estes estudos na organização estratigráfica e a arquitetura de fácies vulcânicas (Jolley, 1997; Jerram e Stollhofen, 2002; Single e Jerram, 2004; Waichel, 2006; Waichel *et al.*, 2012; Barreto *et al.*, 2014; Rossetti *et al.*, 2014; 2018). O estudo da morfologia das lavas basálticas associado à arquitetura de fácies vulcânicas nos platôs continentais, bem como na PBC Paraná têm apontado características que auxiliam no entendimento dos mecanismos e taxas de efusão, permitindo uma melhor compreensão sobre a distribuição geográfica e “empilhamento” dos derrames.

No GSG, as fácies vulcânicas descritas por Jerram (2002) foram primeiramente reconhecidas por Waichel *et al.* (2012) nas sucessões vulcânicas da Sinclinal de Torres, sul da Província Paraná (Figura 6), além das fácies composta/anastomosada e tabular/simples, mais dois membros finais descritas como fácies lobada/escoriácea (lavas a'ã, posteriormente descritas como lavas rubbly *pahoehoe* simples por Rossetti *et al.* (2014) e Barreto *et al.* (2014) e fácies de domo de lava (domos ácidos).

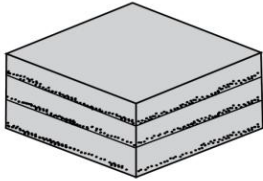
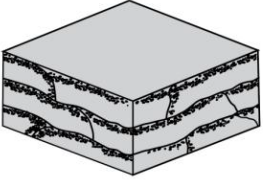
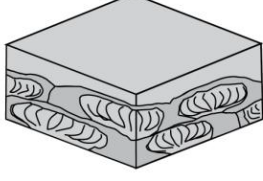
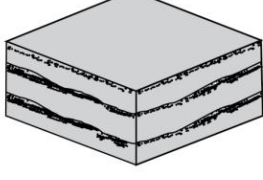
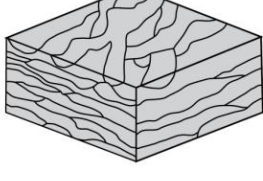
Arquitetura da Fácies Vulcânica	Bloco Diagrama	Tipo de Derrame (Predominante)	Espessura Média (por derrame)	Espessura máxima
Derrames Tabulares		derrames tabulares ácidos	~20 m	~150m
Tabular/ Lobular Escoreácea		derrames 'a'a	10 -15 m	~250 m
Domos de Lava		domos ácidos	até 30 m	~150 m
Tabular Clássica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

Figura 6: Arquitetura de fácies vulcânicas descritas por Waichel *et al.* (2012), na porção sul da PBC Paraná. (Traduzida por Berreto *et al.*, 2014).

3. Materiais e Métodos

A aquisição das informações referentes à área envolveu trabalhos de campo, análise petrográfica, geoquímica de rocha total e levantamento geofísico gamaespectrométrico. A integração dos diferentes métodos permitiu o detalhamento do arcabouço estratigráfico das rochas vulcânicas que ocorrem na região de estudo.

A seguir, serão descritos os materiais e métodos aplicados para a elaboração deste trabalho.

3.1 Levantamento Bibliográfico

A busca de informações acerca da geologia, petrografia, geoquímica e gamaespectrometria sobre a área e o tema abordado foram o objetivo na etapa de pesquisa bibliográfica. Sendo fundamental para o desenvolvimento do trabalho, a mesma seguiu durante todas as etapas subsequentes.

A revisão bibliográfica teve como foco principal os conceitos sobre o vulcanismo da Bacia do Paraná, tanto nos estudos de caracterização geoquímica, quanto da vulcanologia física aplicados na estratigrafia de derrames de lavas.

Nesta etapa também foi revisada informações sobre conceitos e a utilização da gamaespectrometria de potássio (K) urânio (U) e tório (TH) empregado em rochas vulcânicas.

O levantamento incluiu teses, dissertações, trabalhos de conclusão de curso, capítulos de livros e artigos científicos, necessários para o entendimento do contexto geológico regional e local da área de estudo, bem como informações úteis sobre os métodos a serem utilizados no decorrer do trabalho.

3.2 Trabalho de Campo

Os trabalhos de campo foram realizados em 3 (duas) etapas.

A primeira etapa consistiu do levantamento da seção e identificação de texturas e estruturas que permitiu reconhecer os tipos de derrames existentes no perfil e delimitar os contatos entre eles. Nesta etapa foram coletadas amostras para análise petrográfica e geoquímica de rocha total.

A segunda etapa consistiu em um adensamento na coleta de amostras para análises laboratoriais e a complementação dos dados da coluna estratigráfica, elaborada ao final da primeira etapa.

Foi realizado maior detalhamento das feições e estruturas e a viabilidade da elaboração de um código de litofácies. Os códigos utilizados nesse estudo, basearam-se no trabalho de Barreto *et al.* (2014) que adaptou as metodologias de McPhie *et al.* (1993), Branney & Kokelaar (2002) e Caroff *et al.* (2000).

As observações ocorreram desde a base da pilha vulcânica em contato com o Arenito Botucatu, até o topo da sequência aonde afloram rochas vulcânicas ácidas,

sendo coletadas 38 amostras representativas em cada tipo de derrame para análises laboratoriais.

3.1 Petrografia

Na realização dos estudos petrográficos, primeiramente foram selecionadas as amostras coletadas em campo que fossem representativas de cada tipo de derrame através da identificação de texturas e estruturas macroscópicas vistas em campo. A partir disto, foram confeccionadas 19 lâminas delgadas no Laboratório de Laminação (LABLAM) do Departamento de Geociências da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Após a segunda etapa de campo e adensamento na coleta de dados, foram selecionadas mais 18 amostras para a confecção de lâminas delgadas. Estas, foram produzidas no laboratório de laminação de rochas (LAMIR) da Universidade Federal do Paraná (UFPR) e foram impregnadas com resina de cloração azul, através do sistema de impregnação de amostras Struers, no intuito de identificar e quantificar poros existentes nas amostras.

As lâminas delgadas foram analisadas e descritas em microscópios de luz transmitida modelo *Olympus BX4*, e foram obtidas fotomicrografias com câmera *Olympus DP25*, acoplada ao microscópio. O software utilizado para a captação das imagens foi o *AnalySIS Imager* da Olympus.

Os critérios para as descrições petrográficas tais como texturas, grau de cristalinidade e visibilidade, tamanhos relativos dos cristais, forma geométrica, arranjo (trama), e a identificação dos minerais basearam-se na compilação de Wernick (2003), Bard (1980), Mackenzie e Guilford (1980), Dorado (1989).

Para a classificação das rochas, devido a presença de matriz criptocristalina e material mesostático, optou-se pela utilização de geoquímica de rocha total em detrimento da quantificação modal da mineralogia.

3.4 Geoquímica de rocha total

As análises químicas de rocha são importantes para o reconhecimento dos tipos e grupos geoquímicos que pertencem os derrames estudados. No caso de

rochas de textura fina e/ou afanítica, os dados geoquímicos são essenciais para investigação e classificação destas.

As análises químicas foram feitas em 37 amostras, coletadas em diferentes tipos de derrames. A preparação das amostras ocorreu no Anexo do Laboratório de Geologia Isotópica do IG/UFRGS, envolvendo as seguintes etapas: lavagem das amostras; moagem das amostras em prensa hidráulica; redução da granulometria das amostras em gral de ágata; moagem das amostras em moinho de bolas até a obtenção da fração pó; pesagem de 10 g de amostra em balança analítica com quatro casas decimais de precisão; acondicionamento e envio das amostras para análise no laboratório *Acme Analytical Laboratories Ltd.* (Vancouver, Canadá).

As análises geoquímicas foram realizadas pelo método *Inductively Coupled Plasma – Emission Spectrometry* (ICP-ES) para elementos maiores e menores em rotina 4A, e por *Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry* (ICP-MS) para os elementos traços, incluindo elementos terras raras, em rotina 4B.

Para a elaboração dos diagramas de caracterização e classificação que utilizam os dados geoquímicos, foi utilizado o software GCDKit (Janoušek; Farrow; Erban, 2006), versão 3.00.

CAPÍTULO II

4. Artigo Submetido

Neste capítulo serão apresentados os resultados e discussões abordados na forma de artigo científico submetido à revista *Journal of South American Earth Science*

E-mail de confirmação de recebimento da submissão do artigo sob o título: Stratigraphical framework of volcanic rocks in Serra do Rio do Rastro - SC (Serra Geral Group).



Marciéli Frozza <marcielifrozza@gmail.com>

Successfully received: submission STRATIGRAPHICAL FRAMEWORK OF VOLCANIC ROCKS OF SERRA GERAL GROUP IN SERRA DO RIO DO RASTRO, SANTA CATARINA STATE, BRAZIL. for Journal of South American Earth Sciences

1 mensagem

Journal of South American Earth Sciences <EvisSupport@elsevier.com> 22 de novembro de 2018 23:44
Responder a: sames@elsevier.com
Para: marcielifrozza@gmail.com

This message was sent automatically. Please do not reply.

Ref: SAMES_2018_425
Title: STRATIGRAPHICAL FRAMEWORK OF VOLCANIC ROCKS OF SERRA GERAL GROUP IN SERRA DO RIO DO RASTRO, SANTA CATARINA STATE, BRAZIL.
Journal: Journal of South American Earth Sciences

Dear Miss. Elzira Frozza,

Thank you for submitting your manuscript for consideration for publication in Journal of South American Earth Sciences. Your submission was received in good order.

To track the status of your manuscript, please log into EVISE® at: http://www.evise.com/evise/faces/pages/navigation/NavController.jspx?JRNL_ACR=SAMES and locate your submission under the header 'My Submissions with Journal' on your 'My Author Tasks' view.

Thank you for submitting your work to this journal.

Kind regards,

Journal of South American Earth Sciences

Have questions or need assistance?

For further assistance, please visit our [Customer Support](#) site. Here you can search for solutions on a range of topics, find answers to frequently asked questions, and learn more about EVISE® via interactive tutorials. You can also talk 24/5 to our customer support team by phone and 24/7 by live chat and email.

Copyright © 2018 Elsevier B.V. | [Privacy Policy](#)

Elsevier B.V., Radarweg 29, 1043 NX Amsterdam, The Netherlands, Reg. No. 33156677.

STRATIGRAPHICAL FRAMEWORK OF VOLCANIC ROCKS OF SERRA GERAL GROUP IN SERRA DO RIO DO RASTRO, SANTA CATARINA STATE, BRAZIL.

Marciéli E. Frozza ^{a,*}, Breno L. Waichel ^b, Evandro F. Lima ^a

^a Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500, Prédio 43136, Caixa Postal 15001, Agronomia, CEP: 91501-970 Porto Alegre, RS, Brazil.

^b Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Campus Universitário Trindade, CEP 88.040-900 Florianópolis, Santa Catarina, Brazil.

*Corresponding author. E-mail: marcielifrozza@gmail.com

ABSTRACT: The approach in the research of Paraná-Etendeka Province (PEP), which considers the architectures (external and internal) for volcanic successions, has been widely discussed. The volcanism that originated the PEP covered about 75% of the entire Paraná Basin and is currently known as the Serra Geral Group. Several works have contributed to the construction of a framework that aims a better understanding of the evolutionary processes of PIP, as well as the relations of effusion rates and emplacement mechanisms. In the Serra do Rio do Rastro region, sedimentary and volcanic rocks of the Paraná Basin with good exposure of the volcanic package allowed the work on a local scale to recognize the changes in the architecture, petrography, and geochemistry of the flows. The volcanic succession is marked by the intercalation of the pahoehoe and rubbly pahoehoe flows, with predominance of rubbly pahoehoe., indicating variations in the effusion rate with predominance of higher rates which generated the rubbly flows. The lava flows are divided into five facies associations: ponded pahoehoe, simple pahoehoe, compound pahoehoe, rubbly pahoehoe, and acidic flows. The interchange in the eruptive style along de evolution of the volcanism allowed the establishment of the nine volcanic units during three phases of the volcanism that indicate many types of emplacement and changes in paleotopography. The mineralogical composition is mainly: plagioclase, augite, opaque minerals and, subordinately apatite and olivine. In the pahoehoe flows, the intergranular texture with plagioclase-phyric basalts are common, while in the rubbly flows the presence of the hypocrySTALLINE and aphanitic textures and abundance of the plagioclase microlites. In the acidic flows, the facies are characterized by pitchstones with holohyaline texture at the base and granophyres with massive core in the top. The geochemistry analyses demonstrate two groups of TiO₂ contents: high TiO₂ (HTi, > 2%) and low TiO₂ (LTi, <2%), with a predominance of the latter. The rocks ATi are Urubici magma-type, and the BTi predominates in the Gramado type with a unit belong to the Ribeira type. According to designation of new formations for the Serra Geral Group, Five formations are separate: Torres Formation (TF), Vale do Sol Formation (VDS), Urubici Formation (UF), Ribeira Formation (RF) and Palmas Formation (PF). The intercalation of the morphologies and architecture shows variation in the lava emplacement model, either by the change in paleotopography, effusion rate and magma viscosity, as well as geochemistry shows different sources for the rocks that generated distinct magmas compositions. Nevertheless, these contrasts are not a cause-and-effect relationship because there is no control of the chemical types in the different flow morphologies.

Keywords: PARANÁ-ETENDEKA PROVINCE, SERRA GERAL GROUP, LAVA EMPLACEMENT, STRATIGRAPHY, VOLCANOLOGY.

1. Introduction

The Large Igneous Provinces (LIPs) represent one of the largest igneous events in Earth's history. These events are important as they mark the internal dynamics of the planet, as well as the evolutionary history of the planet through the cycles of construction and fragmentation of the supercontinents (Mahoney and Coffin, 1997). They also aid in the paleoenvironmental reconstructions contribute to the understanding of the effects of volcanism on the hydrosphere and the atmosphere and consequently, the possible relation between LIPs and the large mass extinction events (Jolley, 1997; Jerram and Widdowson, 2005; Ernst, 2014). The large igneous provinces include the continental flood basalts (CFBs), oceanic plateaus and some volcanic rifts. The CFBs occur in emergent lands and due to this fact they are the most studied igneous provinces. These studies are essential for understanding how magmatic sources and processes varied during the evolution of the provinces.

One of the largest magmatic provinces in Earth is the Paraná-Etendeka Province (PEP), which had an important contribution to the continental crust generation (Milani et al., 1995). This province occurs in South America and Africa, with about 90% being located in the American continent, where it is preserved in an area of approximately 1.2×10^6 Km² and covers Brazil, Paraguay, Uruguay and Argentina (Cordani and Vidoros, 1967). The volcanism that originated PEP in Brazil, covered about 75% of the entire Paraná basin and was called Serra Geral Formation (Gordon, 1947). Recently, a new proposal to elevate the hierarchy of the Serra Geral Formation to Serra Geral Group was suggested by Rossetti *et al* (2018). The new formal stratigraphic framework proposed by Rossetti *et al* (2018), four formations was defined in the south of the Paraná-Etendeka Province, in Brazil. The Torres Formation (TF), formed by lava toes, lobes and thicker sheet-like lobes define a compound braided facies architecture that overlies the sandstones and and represent the onset of the volcanic activity. The Vale do Sol Formation (VSF) overlies the TF and is characterized by the vertically stacked sheet-like lava flows of rubbly pahoehoe morphology. The Palmas Formation (PF) groups the acidic rocks that contains dacitic and rhyolitic tabular flows, lava domes and complex conduit systems. The upper stratigraphic unit is the Esmeralda Formation (EF) that comprises pahoehoe flows with a compound braided facies architecture and their occurrence is restricted.

To improve the understanding of the PEP is necessary determinate the stratigraphy of the different volcanic facies allied to petrographic and geochemical data at a local scale, that will form a solid stratigraphic framework for the definition of the formations that will constitute the Serra Geral Group.

The main goal of this work is define the stratigraphic succession of the volcanic pile along the Serra do Rio do Rastro using volcanic facies architecture, petrography, geochemistry to provide new data to contribute for the construction of the new stratigraphic framework of the Serra Geral Group. For this, we presents the facies association for the Serra do Rio do Rastro section, based on a simple and useful volcanic lithofacies scheme for the volcanic rocks in a detailed scale. The discussion about morphologies and emplacement mechanism of the lava flows, as well as the evolution of the volcanism for the area also will be taken into account.

2. Geological setting

2.1 Paraná Basin

The intracratonic Paraná Basin has an elongated shape with NNE - SSW direction and was developed completely on the continental crust, filled by sedimentary and volcanic rocks whose ages vary between the Silurian and the Cretaceous (Zalan et al., 1990) (Fig. 1). The stratigraphic framework of the Paraná Basin consists of six large-scale units (Milani and Ramos, 1998), or supersequences according to Vail et al. (1977) concepts. The complete record of the framework is a range of 450 to 65 Ma (Milani and Ramos, 1998).

The volcanism of the Paraná Basin is included in the Gondwana III Supersequence and comprises the range of the stratigraphic record between the Botucatu Formation eolic sediments and the volcanic flows of the Serra Geral Group. The magmatic episodes represent the rift phase related to tensional fields that led to the fragmentation of the Pangea Supercontinent (Milani and Melo, 2007). The volcanic succession of the Serra Geral Group has a maximum thickness of about 1,700 meters (Almeida et al., 1986), in which the basalts of toleitic affinity (Melfi et al., 1988) predominate in approximately 90% of the total volume of the volcanic pile.

The age of the volcanism was first determined by the K/Ar method, which showed a temporal interval of 147 to 119 Ma (Amaral et al., 1967; Cordani et al., 1984). More current techniques using Ar / Ar (Renne et al., 1992) showed that the most part of the

magmatism occurred in a relatively short interval (135 Ma - 131 Ma). The southern portion of the Paraná Basin is stratigraphically older, between 131.4 ± 1.6 and 132.9 Ma (Renne et al., 1992; Thiede and Vasconcelos, 2010). The northern and central volcanism is relatively younger than the southern, with ages between 129.9 ± 0.1 and 131.9 ± 0.9 Ma (Renne et al., 1992).

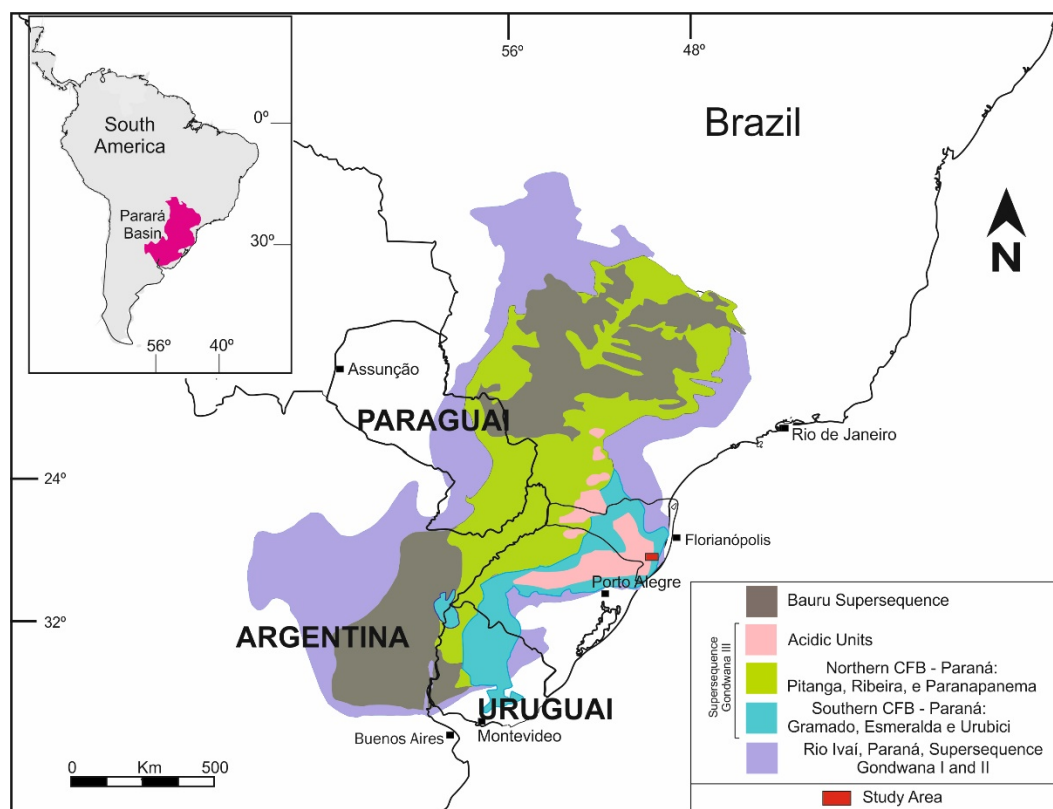


Fig. 1: Simplified geological map of the Parana Basin with the distribution of the volcanic rock of the Serra Geral Group and location of the study area in the portion east of the basin (adapted after Peate et al., 1992; Stewart et al., 1996; Hawkesworth et al., 2000) and modified from Waichel et al., 2012).

The rocks of PEP were first divided into two groups differentiated by titanium dioxide (TiO_2) content and incompatible elements (Mantovani et al., 1985; Piccirillo et al., 1988). The lithotypes that present low-Ti (LTi - $\text{TiO}_2 < 2\%$) have low concentrations of minor elements and incompatible traces (P, Ba, Sr, Zr, Hf, Ta, Y and rare earth elements), when compared with those with high-Ti (HTi - $\text{TiO}_2 > 2\%$). The rocks with HTi contents were subdivided into the types Urubici, Pitanga and Paranapanema, and those of LTi in Gramado, Esmeralda and Ribeira types. Acid rocks were named Palmas (LTi) and Chapecó (HTi) (Bellieni et al., 1984; Piccirillo et al., 1987). Based on chemical composition and trace elements abundances Palmas type rocks were subdivided into five subgroups: Caxias do Sul, Santa Maria, Anita Garibaldi, Jacuí and Clevelândia (Peate et al., 1992; Nardy et al., 2008).

The approach that considers the external and internal architectures for volcanic successions of CFBs is increasingly well established (Self et al., 1997; Bondre et al., 2004, Jeremy et al., 1999; Jerram et al., 1999; 2005; Waichel et al., 2006; Waichel et al., 2012).

With this, there was a significant advance in the investigation of physical volcanology in the Serra Geral Group, which began to be approached in a systematic way, where different techniques have been used to the construction of a framework that aims at a better understanding of evolutionary processes and the relations of effusion rates and emplacement mechanisms at local scale.

2.2. Basaltic lava flows

The recognition of the flow morphologies and the faciological analysis of the volcanic units have allowed a better understanding of the lava packages and evolution history of the Paraná-Etendeka Province (Jerram, 2002). Lava flows can be product of a single flow units, called simple flow which are associated with elevated effusion rates, or as compound flows that are characterized by several units, usually small and thin, and minor effusion rates.

The surface features that characterize the morphology of basaltic flows were first described in pahoehoe and 'a'ā by Macdonald (1953). However, some transitional lavas between pahoehoe and 'a'ā occur (rubbly pahoehoe, slab pahoehoe and toothpaste) (Keszthelyi et al., 2001; Duraiswami et al., 2014).

Walker (1971) correlated eruption rates as an important factor in controlling lava morphology. The distance traveled by the lava can be directly proportional to the effusion rate. These results are consistent with the results obtained by Bryan et al. (2010). The lavas that occur as rubbly pahoehoe flows where short-lived pulses at higher effusion rates, potentially up to $10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Keszthelyi et al., 2006). Already, the lavas were emplaced as inflated pahoehoe sheet flows are emplaced at low effusion rates of $10^3\text{--}10^4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Bryan et al., 2010).

2.3 Geological setting of the Serra do Rio do Rastro region.

A thick sequence of sedimentary and volcanic rocks of the Paraná Basin outcrops along the Serra do Rio do Rastro. This sequence of rocks was first

described by the american geologist Israel C. White in 1908 at the time of the publication of the Final Report of the "Commission for the Study of Brazilian Stone Mines". The studies carried out resulted in a large collection of data on South-Brazilian coal, stratigraphy and paleontology of the Paraná Sedimentary Basin. The data collected along the Serra do Rio do Rastro resulted on the definition of a stratigraphic column, consecrated as White Column. The section occurs along the road SC-390 in Lauro Muller, SC. The section beginning around the altitude of 200 m where sedimentary rocks predominates, and extends until about 1.500 m at the top of the volcanic flows.

Despite the good exposure and stratigraphic importance of the volcanic sequence along the Serra do Rio do Rastro, detailed studies which take into account stratigraphy and volcanic facies architecture in the region were never performed.

3. Study area and methodology

The section occurs along the road SC-390, known as Serra do Rio do Rastro, located between Lauro Muller and Bom Jardim da Serra cities in Santa Catarina. The points described start from 760 m a.s.l., where is the contact of Botucatu Sandstone with volcanic rocks, up to about 1.500 m a.s.l. (**Fig. 2A**). The mapping of the lava flows allows the construction of an isopach geologic map at a 1:20.000 scale. The contacts of different volcanic facies defined in these work and classified on the map according with the elevation curves (**Fig. 2B**).

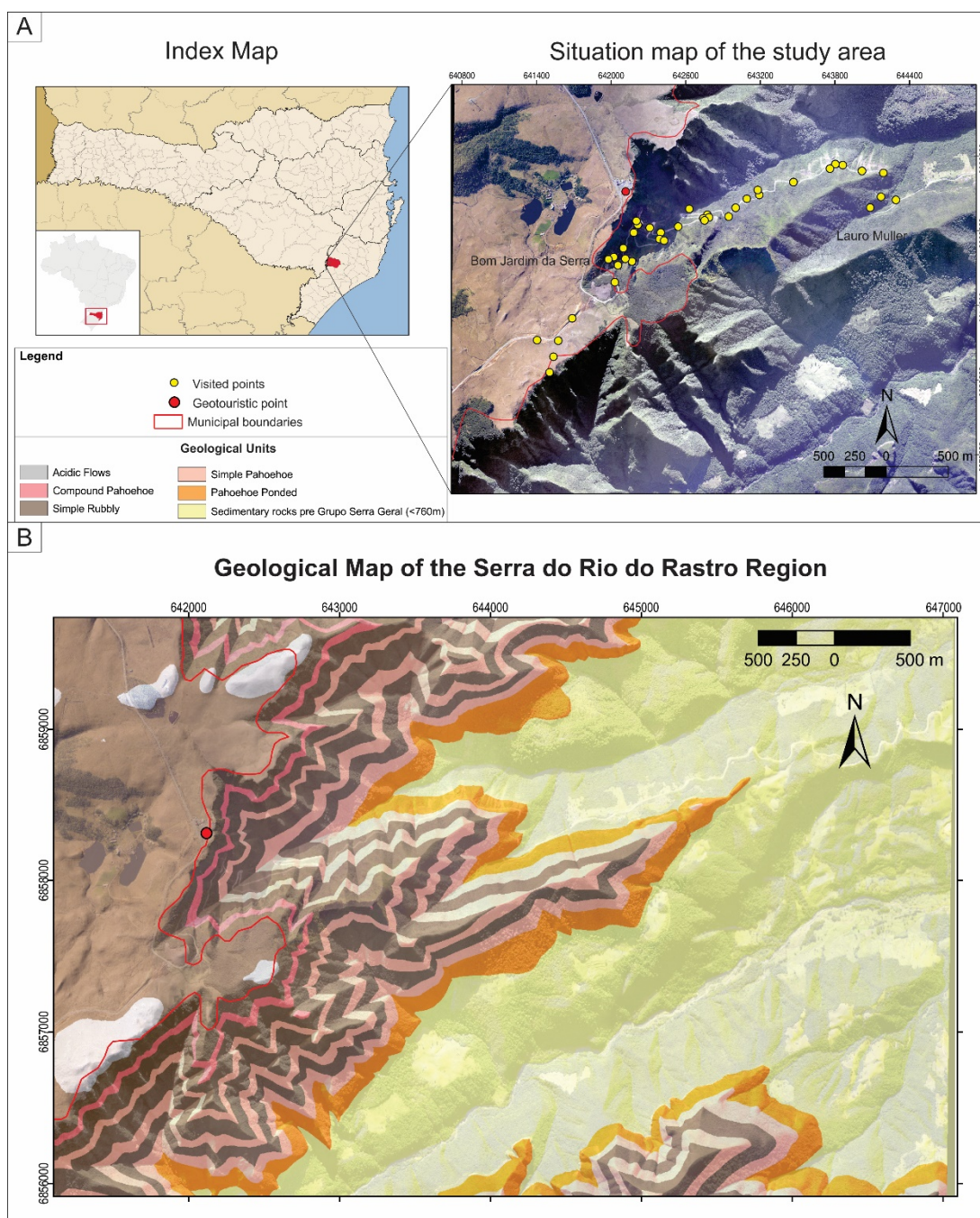


Fig. 2: A) Situation map with the location of visited points along de section. B) Geological map of the Serra Geral Group, in Serra do Rio do Rastro region.

The acquisition of data involved fieldwork, petrographic analysis and whole rock geochemistry. The integration of the different methods allowed the detailing of the stratigraphic framework of the volcanic rocks in the study area.

3.1 Field mapping

Fieldworks occurred to accomplish the survey of the section with the identification of textures and structures that allowed to recognize the types of flows existing in the profile and to delimit the contacts between them. In this stage, samples were collected for petrographic analysis and whole-rock geochemistry.

The facies described were grouped in association of facies, which allowed paleogeographic interpretations, models of lava placement and the evolution of volcanism in the region. A litofacies code was elaborated based on the work of Barreto et al., (2014) that adapted the methodology of McPhie et al., (1993) and Branney and Kokelaar (2002) for the volcanic succession rocks.

3.2 Petrography

The petrographic studies of 37 thin sections from representative samples of each type of the flow, were made at the Lamination Laboratory (LABLAM) of the Department of Geosciences of the Federal University of Santa Catarina (UFSC) and the rock lamination laboratory (LAMIR) of the University Federal of Paraná (UFPR).

The mineralogical and textural identification and description in the pahoehoe, rubbly pahoehoe and acid flows have been described in the different portions of the flows, which in cross-section represents the base, core and top of each flow.

3.3 Whole-rock geochemistry

The 37 whole-rock chemical analyzes were performed at the Acme Analytical Laboratories Ltd. (Vancouver, Canada). The geochemical analyzes were performed by Inductively Coupled Plasma - Emission Spectrometry (ICP - ES) for major and minor elements in routine 4A, and by Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry (ICP - MS) for trace elements, including rare earth elements in routine 4B. In both routines, 0.2 to 0.3 g of rock powders were used. The results of the chemical analyzes are presented in **Table 1**. The GCDKit software (Janoušek; Farrow; Erban, 2006), version 5.00 in R 3.4.3 was used for the elaboration of the characterization and classification diagrams for geochemical data.

Table 1: Geochemical data of volcanic rocks from Serra do Rio do Rastro region.

		Major elements															
Sample		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ (t)	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total	FeOt/MgO	Ti/Zr	Ti/Y	
Unit 1	ponded pahoehoe	MF01A	51.64	1.34	14.59	12.9	0.18	4.9	8.73	2.6	1.37	0.2	1.3	99.74	2.37	45.23	246.42
		RR02	52.72	1.04	14.63	11.4	0.18	5.94	9.41	2.31	1.2	0.13	0.8	99.77	1.74	48.26	273.45
Unit 3	simple pahoehoe	RR03B	52.6	0.97	14.74	11.13	0.17	6.11	9.43	2.3	1.18	0.12	1	99.77	1.64	46.63	251.74
		MF06	51.59	1.02	15.62	11.56	0.18	5.5	9.42	2.49	1.25	0.12	1.0	99.79	1.89	58.78	272.98
		RR07	49.88	0.96	15.16	10.95	0.17	5.44	9.95	2.07	0.71	0.1	4.4	99.79	1.82	56.15	280.74
		MF09	51.23	3.46	13.42	12.22	0.15	4.36	7.69	2.66	2.27	0.48	1.7	99.67	2.5	72.78	626.66
		RR08	51.31	3.48	13.42	12.3	0.15	4.38	8.01	2.53	2.22	0.49	1.3	99.69	2.53	71.20	660.21
		RR14A	47.78	3.81	13.39	13.57	0.16	4.67	8.73	2.36	1.57	0.5	3	99.67	2.61	76.93	700.64
Unit 5	simple pahoehoe	MF18B	52.11	3.66	12.73	13.08	0.15	4.11	7.98	2.48	1.88	0.49	1.0	99.65	2.86	77.94	654.97
		MF19A	48.85	3.78	13.02	13.3	0.16	4.66	8.49	2.32	1.68	0.51	2.8	99.61	2.57	71.46	649.31
		RR14C	50.29	3.66	12.77	13.39	0.16	4.56	7.99	2.35	2.03	0.46	1.9	99.67	2.64	76.8	689.99
		MF23B	50.00	1.49	14.2	11.74	0.18	6.32	10.18	2.53	0.39	0.22	2.5	99.78	1.67	66.22	381.73
Unit 7	compound pahoehoe	RR20	48.64	1.22	14.11	12.07	0.16	6.63	10.19	2.25	0.94	0.16	3.3	99.76	1.64	68.48	326.51
		MF23C	49.54	0.91	14.6	10.23	0.16	7.85	10.99	2.26	0.61	0.12	2.5	99.83	1.17	72.74	324.73
		MF29B	54.62	1.73	13.36	13.03	0.18	3.73	5.84	3.31	2.5	0.28	1.2	99.73	1.56	46.76	265.93
Unit 2	rubbly pahoehoe	MF31A	60.03	1.35	13.21	9.76	0.15	2.45	5.5	3.12	1.89	0.27	2.0	99.74	3.58	34.75	210.76
		MF31B	54.97	1.71	13.49	12.45	0.18	3.13	5.42	3.24	3.13	0.27	1.8	99.74	3.58	45.62	258.87
Unit 4	rubbly pahoehoe	RR25C	58.34	1.58	12.88	11.66	0.16	2.83	5.86	2.63	2.56	0.26	1	99.79	3.71	43.65	253.94
		RR09	50.05	0.92	14.51	11.02	0.16	6.9	10.11	2.36	1	0.1	2.6	99.76	1.44	58.17	290.28
		RR10	51.33	0.94	14.37	11.08	0.18	7.07	10.02	2.29	0.94	0.1	1.4	99.75	1.41	56.92	284.61
		MF13	51.94	0.92	14.4	10.75	0.18	7.01	10.18	2.15	0.81	0.11	1.3	99.81	1.38	58.18	275.77
		RR12	50	0.79	15.13	9.89	0.16	8.34	11.23	1.93	0.52	0.08	1.6	99.74	1.07	67.37	299.75
		MF20	51.64	3.71	12.82	12.68	0.16	4.4	7.83	2.51	1.74	0.5	1.6	99.62	2.59	78.79	690.73
Unit 6	rubbly pahoehoe	RR15	50.62	3.78	12.94	13.1	0.17	4.54	8.17	2.47	1.86	0.48	1.5	99.69	2.60	78.85	742.98
		MF21	49.00	3.65	13.21	13.63	0.15	4.54	8.13	2.6	1.6	0.49	2.6	99.63	2.70	75.09	626.98
		MF22	54.7	1.66	13.00	13.29	0.17	3.82	6.99	2.43	2.27	0.24	1.2	99.75	3.13	63.10	327.36
		RR18	52.49	1.67	13.35	13.22	0.18	4.05	8.01	2.55	1.32	0.22	2.6	99.75	2.94	61.23	328.25
Unit 8	rubbly pahoehoe	MF24	50.6	1.67	13.3	13.67	0.2	4.59	8.78	2.48	1.12	0.28	3.0	99.73	2.68	55.99	319.86
		RR21	51.83	1.74	13.12	14.27	0.21	4.15	8.24	2.89	0.77	0.24	2.2	99.74	3.09	53.44	317.06
		RR22	51.83	1.56	13.62	13.66	0.21	4.85	8.74	2.53	1.09	0.21	1.4	99.75	2.53	57.69	322.49
		RR25A	51.17	1.42	13.82	12.82	0.17	5.27	7.16	2.69	2.03	0.17	3	99.76	2.19	55.75	289.55
		MF32B	51.48	1.35	13.79	13.45	0.2	5.39	9.26	2.45	0.78	0.18	1.4	99.77	2.24	64.13	306.56
Unit 9	acidic flows	RR26	52.93	1.35	13.57	12.58	0.19	5	8.91	2.45	0.79	0.17	1.8	99.77	2.26	61.78	297.54
		MF33B	52.9	1.33	13.75	12.45	0.21	4.79	8.44	2.51	1.18	0.2	2.0	99.78	2.34	57.65	284.76
		MF33C	65.9	0.9	12.66	5.92	0.13	1.26	3.68	2.67	3.31	0.27	3.1	99.78	4.23	21.92	121.24
		RR29A	65.93	0.88	12.68	5.97	0.11	1.23	3.55	3.17	2.3	0.25	3.7	99.85	4.37	21.49	137.38
		RR29B	66.56	0.95	12.8	6.49	0.1	1.38	2.71	2.81	3.8	0.25	2	99.85	4.23	23.54	162.26

Continuation of table 1.

Sample		Minor elements																																
		Ba	Co	Ni	Sc	Rb	Sr	Ta	Nb	Th	U	Zr	Y	Pb	Hf	Ga	Cs	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu			
Unit 1	ponded pahoehoe	MF01A	406	41.0	22.9	36	38.7	302.7	0.7	12.2	6.1	1.0	177.6	32.6	4.1	4.3	19.5	0.5	29.8	58.6	7.21	32.5	6.27	1.72	6.34	1.06	6.38	1.1	3.11	0.51	3.35	0.4		
		RR02	346	46.6	18.6	36	35.9	252.6	0.5	9.4	4.6	0.7	129.2	22.8	2.4	3.6	19.1	0.5	21	42.5	5.05	20	4.52	1.32	4.6	0.75	4.44	0.91	2.73	0.39	2.59	0.39		
		RR03B	325	46.9	19	36	35.1	256.9	0.5	8.9	4.4	0.8	124.7	23.1	2.1	3.3	18.3	0.6	20.1	41.4	4.98	20.1	4.45	1.33	4.57	0.75	4.57	0.95	2.78	0.4	2.66	0.38		
		MF06	260	46.1	19.9	37	33.6	235.1	0.3	6.7	3.3	0.6	104.0	22.4	1.9	3.8	17.4	0.5	17.1	34.3	3.96	15.5	4.3	1.31	4.03	0.8	3.99	0.9	2.51	0.34	2.05	0.34		
		RR07	201	43.1	16.6	34	19	221.7	0.4	6.6	3.5	0.7	102.5	20.5	5.1	2.8	16.3	1	14.7	30.3	3.71	15.4	3.49	1.11	3.77	0.64	3.94	0.84	2.34	0.32	2.19	0.32		
	MF09	478	35.8	21.6	22	55.2	654.0	1.9	24.2	4.3	0.9	285.0	33.1	2.2	8.6	24.4	0.4	40.6	92.6	11.54	54.0	11.26	3.3	9.66	1.39	7.15	1.28	3.54	0.44	2.82	0.32			
	RR08	833	34.9	17.4	21	51.4	602.6	1.4	25.2	4.1	1	293	31.6	3	7.2	20.7	0.5	41.6	85.6	10.99	45.5	9.54	3.07	9.08	1.33	7.42	1.3	3.4	0.46	2.77	0.36			
	RR14A	593	40.4	25.1	23	18.8	677.9	1.8	25.6	4.1	1	296.9	32.6	3.6	7.8	21.2	0.1	41.5	87.5	11.18	47.8	10.04	3.1	9.34	1.37	7.27	1.38	3.49	0.45	2.73	0.38			
	MF18B	603	37.5	18.9	23	30.5	795.3	1.6	24.3	3.7	0.9	281.5	33.5	2.5	6.8	21.4	0.2	40.3	87.7	10.68	44.3	9.71	2.99	9.84	1.42	7.61	1.12	3.06	0.4	2.54	0.32			
Unit 3	simple pahoehoe	MF19A	599	37.8	21.0	23	28.6	876.7	2.0	27.1	3.9	0.8	317.1	34.9	3.3	6.7	23.0	0.1	40.7	89.3	10.84	49.7	11.08	3.65	9.85	1.52	7.06	1.29	3.77	0.49	3.16	0.36		
		RR14C	548	39.1	23.2	23	37.2	718.1	1.7	25.1	3.7	0.9	285.7	31.8	3.4	7.7	20.4	0.2	39.1	83.1	10.46	44.6	9.37	3	9.01	1.3	6.99	1.33	3.23	0.43	2.66	0.37		
		MF23B	218	38.6	13.6	37	6.6	398.6	0.8	11.7	3.1	0.8	134.9	23.4	3.6	3.6	18.1	0.8	18.6	36.6	4.74	23.6	4.76	1.67	4.77	0.8	4.28	0.9	2.66	0.37	2.41	0.33		
		RR20	232	44.4	20.5	37	41.6	216.2	0.6	8.3	2.8	0.6	106.8	22.4	4.1	2.9	14.1	1.1	15	30.9	3.89	16.8	3.95	1.24	4.14	0.72	4.41	0.87	2.68	0.37	2.36	0.36		
		MF23C	199	43.1	34.8	38	11.8	228.0	0.4	5.1	1.8	0.4	75.0	16.8	1.8	2.3	14.9	0.8	10.3	22.2	2.75	9.2	3.18	0.96	3.68	0.58	4.41	0.74	2.13	0.26	1.83	0.28		
		MF29B	491	35.3	8.4	32	82.3	197.0	0.9	16.8	8.9	2.0	221.8	39.0	5.1	5.2	18.8	1.5	34.0	67.3	8.1	30.1	7.82	1.84	7.38	1.3	7.47	1.54	3.58	0.63	3.97	0.58		
		MF31A	572	26.6	2.3	24	110.5	196.9	1.5	17.7	11.5	3.5	232.9	38.4	2.4	6.7	20.6	7.3	41.3	86.9	10.11	40.8	8.74	1.78	7.85	1.28	7.11	1.68	3.98	0.56	3.94	0.56		
		MF31B	472	33.1	8.0	30	122.3	141.7	1.1	16.6	9.6	2.4	224.7	39.6	4.9	5.5	19.7	2.4	33.8	73.1	8.45	38.2	6.97	1.59	7.54	1.19	6.6	1.44	3.8	0.58	3.5	0.48		
		RR25C	492	30.9	5.8	27	87.6	169.3	1.1	16.6	9.8	2.8	217	37.3	6.3	6	18.7	1.9	37	70.3	8.55	34.4	7.29	1.68	7.22	1.16	6.54	1.37	4.09	0.57	3.66	0.57		
Unit 2	rubbly pahoehoe	RR09	208	43.8	33.9	37	22.2	189.7	0.3	5.9	3.2	0.6	94.8	19	2.9	2.6	16.2	0.2	14.2	26.7	3.47	14	3.22	0.98	3.53	0.58	3.69	0.8	2.4	0.32	2.06	0.28		
		RR10	217	45.9	17.7	37	25.8	296.4	0.4	6.4	3.2	0.6	99	19.8	3.5	2.8	15.2	0.3	14.8	29.3	3.6	14.1	3.27	1.05	3.71	0.63	3.78	0.8	2.14	0.32	2.12	0.3		
		MF13	180	40.7	19.8	38	20.3	262.2	0.3	5.9	2.7	0.5	94.8	20.0	2.9	2.6	15.1	0.1	15.0	24.9	3.35	11.4	3.28	1.14	3.35	0.66	3.68	0.81	2.4	0.32	2.03	0.24		
		RR12	124	44.9	40	36	11.8	197.3	0.3	4.1	2.5	0.3	70.3	15.8	2	2.1	14.4	0.1	9.1	19.1	2.4	10.2	2.31	0.77	2.78	0.46	2.95	0.64	1.64	0.25	1.64	0.24		
		MF20	583	38.1	17.0	23	34.3	806.3	1.3	23.9	4.1	0.7	282.3	32.2	3.1	6.9	22.9	0.4	41.1	88.1	10.9	41.5	10.66	3.32	9.83	1.54	7.21	1.43	3.56	0.37	2.92	0.32		
		RR15	475	37.5	24.3	23	30.7	613.1	1.5	24.5	4.1	1	287.4	30.5	2.3	7.3	21.4	0.1	39.9	84.2	10.72	46.4	10.01	2.98	9.18	1.35	7.06	1.31	3.46	0.45	2.64	0.36		
		MF21	601	40.2	22.2	24	28.2	806.0	1.8	25.5	4.6	1.0	291.4	34.9	3.0	8.7	24.2	0.2	41.5	86.5	11.36	47.7	10.44	3.2	9.22	1.41	7.46	1.38	3.24	0.5	1.98	0.31		
		MF22	372	39.3	8.0	33	71.9	211.5	1.0	12.1	6.9	2.1	157.7	30.4	2.6	5.1	21.8	1.0	24.2	52.7	6.17	24.3	5.33	1.43	5.83	0.99	6.54	1.2	3.4	0.52	3.1	0.44		
		RR18	373	38.6	6.5	33	36.8	294.4	0.9	13.4	6.5	1.8	163.5	30.5	6.5	4.4	17.4	1.8	24.9	51.4	6.13	25	5.27	1.46	5.59	0.96	5.65	1.15	3.34	0.48	3.05	0.45		
Unit 4	rubbly pahoehoe	MF24	440	39.8	13.2	35	34.0	315.1	1.4	17.8	4.8	1.1	178.8	31.3	3.9	5.9	19.7	2.4	27.4	56.0	6.97	31.1	6.36	1.58	5.86	1.05	5.64	1.37	3.82	0.53	3.15	0.43		
		RR21	448	40.4	12.6	34	36	282	1.1	19.1	5.7	1.2	195.2	32.9	2.6	5.2	18.1	1.9	30.9	61.3	7.28	29.2	6.55	1.75	6.65	1.07	6.37	1.35	3.96	0.55	3.37	0.5		
		RR22	351	41.4	17.4	34	35	257.4	0.8	13.4	5.2	1.1	162.1	29	3.1	4.7	17.9	1.3	24.5	50.8	6.06	25.8	5.18	1.58	5.83	0.94	5.82	1.15	3.45	0.45	3.05	0.46		
		RR25A	351	41.6	15.9	34	71.6	172.9	0.8	11	5.5	1.4	152.7	29.4	4.1	3.9	19.7	0.3	22	45.2	5.65	23.8	5.01	1.5	5.51	0.95	5.28	1.14	3.37	0.47	3.06	0.43		
		MF32B	263	43.6	10.8	37	30.3	223.6	0.6	9.1	4.5	1.2	126.2	26.4	2.4	2.9	18.5	2.2	18.6	36.6	4.84	22.4	4.04	1.24	4.8	0.8	5.39	1.14	2.42	0.45	2.67	0.37		
		RR26	243	39.7	8	33	18.3	211.4	0.5	9.7	4.6	1.3	131	27.2	5.1	3.8	17.3	2	20.1	39.5	4.96	20.4	4.67	1.39	5.28	0.85	5.18	1.11	3.14	0.42	2.74	0.41		
		MF33B	274	37.4	6.9	35	34.3	208.9	0.4	9.8	5.4	1.5	138.3	28.0	4.3	4.6	16.2	1.9	19.0	42.5	4.99	23.3	4.89	1.38	5.15	0.84	5.32	0.94	2.81	0.41	2.54	0.38		
		Unit 9	acidic flows	MF33C	599	12.0	2.4	17	151.4	168.5	1.6	19.2	12.6	4.8	246.1	44.5	4.0	7.4	16.1	10.3	42.8	81.8	9.53	38.0	7.82	1.68	8.22	1.26	7.62	1.47	4.49	0.51	3.65	0.55
				RR29A	584	10.6	2.3	16	237.5	161.6	1.6	19.4	14.2	5.1	245.5	38.4	3.8	6.8	16.2	12.9	44	87.2	10.19	39	7.63	1.46	7.48	1.17	7.11	1.42	3.99	0.56	3.52	0.54
RR29B	532			11.8	2.6	17	161.3	119.1	1.5	19.6	13.5	4.8	241.9	35.1	6.9	6.6	15.1	4.7	42.7	83.6	10.03	38.2	8.17	1.71	7.57	1.18	7.06	1.33	4.02	0.58	3.54	0.53		

4. Lithofacies analysis and morphology of the flows

The terminology used to characterize the lithofacies in this work was based in Barreto (2014) that adapted the definition of lithofacies initially proposed by Miall (2000) for sedimentary rocks for the volcanic rocks of Serra Geral Group. The internal structure and texture of each unit, including internal flow boundaries, vesicle zones (vesicle size, shape, segregation material), and color are observed.

The lithological, textural and structural attributes observed in outcropping scale can be interpreted in terms of effusion rate and eruption conditions or emplacement styles (Walker, 1984; Cas and Wright, 1987). **Table 2** presents the codes and descriptions of the lithofacies defined for the Serra do Rio do Rastro section in this work.

Table 2: Lithofacies description and interpretation of the lava flows of the Serra Geral section.

Lithofacies Code	Description of the lithofacies	Position Within Lava Flow	Interpretation
Bves	Vesiculated basaltic flow with elongated and stretched vesicles	Base	Smooth emplacement of lavas.
Bmcj	Massive basaltic flow with columnar joints	Lower half of lava flow	Ponded lava in interdune setting.
Bmvph	Microvesiculated basaltic lava with phaneritic texture	Lower half of the lava flow	Slower crystallization. Mechanism of endogenous transfer (inflation) within a viscoelastic crust in an insulated environment, which is responsible by the coarser granular texture.
Bmvp	Microvesiculated basaltic flow with pegmatites	Core	Form during the final stage of a magma's crystallization.
Bvsd	Vesiculated basaltic flow with millimetric veins of sand	Core of thick flows	The lava flows that covered the aeolian dunes contributed to the increasing of the lithostatic pressure on the dunes and locally formed sand injection.
Bv	Vesiculated basaltic flow	Base, core and upper crust	The skin confines just below it gas bubbles risen from the underlying fluid.
Sl	Sandy layer.	Upper crust	Sheets of sandstone indicating periods of quiescence on the volcanism.
Bhvl	Basaltic lava with horizontal vesicle layers	Upper half of the core	The gases that move inside the lava tend to rise but the crystallized crust does not allow them to leave the system. Form only after the flow has stagnated and is no longer inflating.

Bvc	Basaltic lava with vesicle cylinder	Upper half of the core	Residual liquids generated within the lower solidification zone move into vesicle-rich low-density areas, through of gas filter-pressing mechanisms that migrate toward the top of the flow after the host lava ceased all movement.
Bpod	Basaltic rock with pods filled by segregation vesicles	Lower half of the core	Accumulation zone of segregation vesicles frozen-in gas bubbles.
Bgv	Basaltic lava flow with giant vesicles	Upper half of the core and	Coalescence of bubbles of different sizes by mass transfer above the lower solidification front.
Bmv	Microvesiculated basaltic rock	Core	Homogeneous distribution of vesicles. Vesicle coalescence in static lava. Vesicle ascent was prevented by the rapid development of yield strength through the whole thickness of static lava, suggesting thixotropic behavior.
Bbsm	Fragments of the brecciated top in the sandy matrix	Upper crust	Unconsolidated sediments filled de fractures of the breccias.
Bsvb	Slighter vesiculated flow base with elongated and stretched vesicles	Base lower half of the core	Smooth emplacement of lavas over flat surface.
Bfs	Basaltic lava with primary flow structure	Base and lower half of the core	Generated from the propagation of a magmatic flow on the existing surface.
Bam	Aphanitic and hypocristaline massive basaltic rock	Core	Faster cooling and crystallization with degassing. Initial emplacement through.
Bab	Basaltic Autobreccia	Upper crust	Inflation and accumulation of volatiles due to tensile stresses led to degassing and rupturing, while the increase in the effusion rates promote brecciation. Broken flow top of rubbly flow.
Pmv	Pitchstone (vitrophyre) with sparse millimetric vesicles	Base and core of the acidic flows	The presence of preserved glass (vitrophyres) indicates zones of high cooling rate.
Gts	Granophyre with massive core and tabular structures	Top of acidic flows	Reflect varying degrees of undercooling and devitrification. Advanced devitrification process forming a granophyric matrix texture.

The organization of the different structures and textures in lithofacies is a useful tool for field description and classification (Rosseti et al. 2014; Barreto et al., 2014) however, it should be clear that it has no direct genetic connotation because different processes can produce similar lithofacies. For a possible paleoenvironmental reconstruction and the relationship of the emplacement of the flows with the effusion rates, it is necessary to join lithofacies feature in facies associations and the identification of the morphologies of the flows in the volcanic

sequence considering products generated by one lava flow or during a single eruptive event.

The primary basis for the flow classification and identification of the morphologic types are the characteristics on the surface of the flow (unit boundaries as glassy, or rubbly flow tops, weathered zones), as well the textures and vesicles along of a transversal section of the flows (MacDonald, 1953).

In the volcanic sequence of the Serra do Rio do Rastro different morphologies are identified in the mafic and acidic rocks. The stratigraphic column begins with the thick pahoehoe flows in the base (760 to 890 m), followed by an intermediate portion where there is intercalation of the pahoehoe and rubbly pahoehoe flows between the elevation of 890 and 1330 m in a variety of thickness of volcanic units. Near the top of the profile is a thick lava flows of rubbly pahoehoe morphology that crop out between ~1330-1440 m. Acidic flows are distributed in the upper portion of the volcanic sequence (about 1440~1,500 m a.s.l.). The **Fig. 3** shows the main features of the different morphologies and lithofacies code described along the Serra do Rio do Rastro profile.

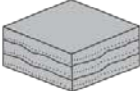
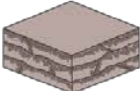
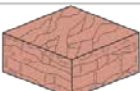
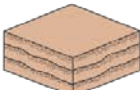
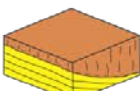
Flow Morphologies	Geometry/Architecture	Facies Association	Description	Schematic Figure	Interpretation
Acidic Flow	Tabular Classic	Acidic Tabular Flows (AT)	Commonly these flows are associated by plateau – shaped topography. These acidic flows are composed of obsidian and occurs vitrophyres with massive or banded features at the base, that grade upwards to granophyres with marked sub-horizontal flow-related foliation which can also present flow structures.		Emplaced in anomalous high crystallization temperatures promote the emplacement as acidic lava flows
Rubblly Pahoehoe	Tabular Brecciated	Simple Rubblly (SR)	Thick lava flows with tabular geometry. Simple rubblly pahoehoe flows with the internal structure divided into four parts: a smooth vesiculated base, aphanitic massive core, upper vesiculated portion, and a brecciated rubblly top.		Initially accommodated endogenously within the sheets, enabling them thicken. Such lavas are transported in open channels. Tensile stresses in the upper crusts related to inflation and accumulation of volatiles led to degassing and rupturing. Rubblly pahoehoe flows are emplaced at higher effusion rates and/or with a higher declivity of the terrain as compared to typical pahoehoe flows.
Pahoehoe	Compound Braided	Compound Pahoehoe (CP)	Compound flows consisting of numerous anastomosing small lobes of pahoehoe lava stacked in a complex pattern.		Emplaced under low effusion rate in small volume flows, with intermittent lava supply, and minimum inflation.
	Tabular Classic	Simple Pahoehoe (SP)	Tabular-classic volcanic facies architecture composed predominantly by simple (sheet) pahoehoe flows. Tabular geometry with an internal structure constituted of basal zone, massive core and upper vesicular zone.		Low volumetric flow rate or discharge. Their emplacement results in flat terrains. Pahoehoe flow starts with the advance of thin lobes and rapid formation of the upper zone by the contact of the lava with the surface. This crust is inflated by the internal pressure of volatiles. The pahoehoe flows are generated in close systems, which maintain a very slow heat loss (by conduction). Inflation process is dominant and coalescence of pahoehoe lobes.
	Tabular Classic	Ponded Lava (PL)	Thick pahoehoe lava flows with a tabular geometry and irregular to well developed columnar joints		Thick pahoehoe lava flows confined in the interdune setting. Low and continuous effusion rate.

Fig. 4: Representative scheme with the main descriptions and interpretations of the facies associations in Serra do Rio do Rastro.

According to the alternation in the eruptive styles of the 5 facies established, 9 volcanic units were defined. Unit 1 corresponds to pahoehoe flows (both ponded and simple). Packages with simple pahoehoe are also in units 3 and 5. The facies association of the simple rubblly flows correspond to units 2, 4, 6 and 8. The facies of compound pahoehoe make up unit 7 and the acid flows complete the profile in the unit 9 (Fig. 3). These units will be useful to the understanding and discussion of the evolution of the volcanism.

4.1 Facies association of the pahoehoe flow fields

Pahoehoe lava flow fields occur in the basal and intermediary portion of the volcanic succession. The different architecture and succession of the pahoehoe flows form ponded lavas facies association (PL), simple pahoehoe facies association and compound pahoehoe facies association (CP) that will be described below.

4.1.1 Ponded lava (PL) facies association

Ponded lava (PL) facies association is up to ~100 m thick and are characterized by simple pahoehoe flows with tabular geometry. The pahoehoe flows occurs in the basal portion of the Rio do Rastro volcanic section and covers the main erg of the Botucatu Formation. These pahoehoe flows are confined by the paleotopography in the interdunes. The contact with the eolic sandstone and the first pahoehoe flows is sharp and occurs at an altitude of 760m. A thin massive margin (2 cm) characterizes this contact (**Fig. 5A**). In the basal portion of the first flow with 20 cm thick is exhibit stretched vesicles (2 mm – 3 cm length) that indicate the flow direction to East-west (**Bves**) (**Fig. 5A**)

PL facies association is composed of basalts with phaneritic texture (**Bmvph**) and locally is a presence of pegmatites (**Bmvp**) (**Fig. 5B**). The interface base-core is marked by columnar joints (**Bmcj**) (**Fig. 5C**). Veins of sand (**Bvsd**) about 1 cm occurs at the base and core, and sometimes they are connected (**Fig. 5D**). The flow tops are highly vesicular (or amygdaloidal) (**Bv**) with a large range of vesicle shapes and sizes (1 mm – 3 cm), filled with zeolite (**Fig. 5E**). In the upper portion of the PL occurs discontinuous and thin sheets of sand (**SI**), indicating short periods of quiescence of volcanism and the continuous sedimentation that generated inter-lava deposits (**Fig. 5F**).

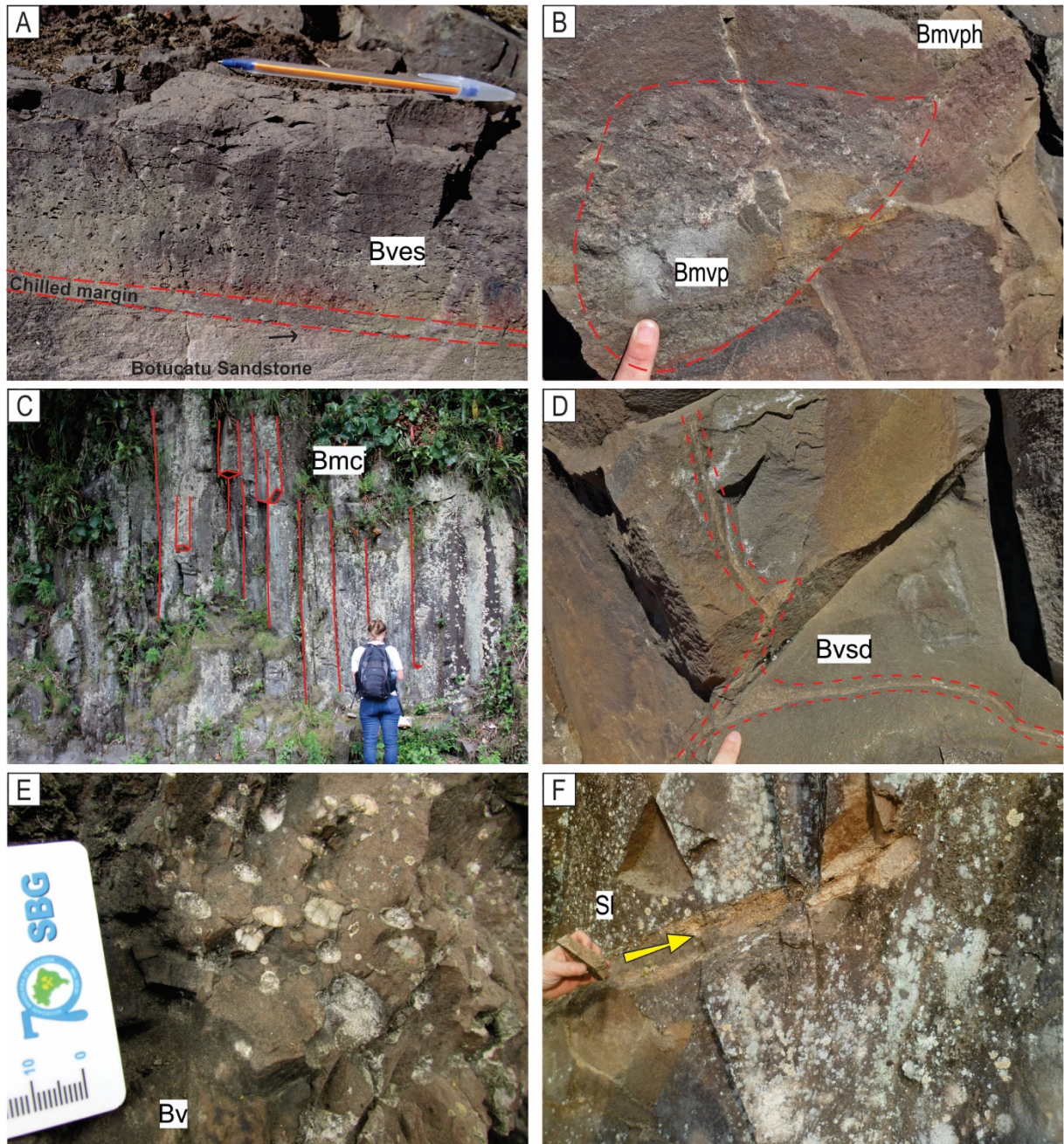


Fig. 5: Photos showing the lithofacies in poned lava between elevations of 760-865 m, overlapping the sandstones of Botucatu Formation. A) contact between Botucatu sandstone and basaltic lava flows, show-stretched vesicles (Bves). A chilled margin in the contact is highlighted Between the red lines and the black arrow show the truncated contact of the sandstone; B) Locally coarser granulation that characterizes a pegmatite (Bmvp) and the more phaneritic texture C) Massive or sparsely vesiculated basalt with irregular columnar jointing (Bmcj); D) Veins of sandy (Bvsv); E) Highly vesicular and amygdaloidal zone from the flow tops (Bv); F) Discontinuous and thin sheets of sand (SI).

4.1.2 Simple pahoehoe (SP) facies associations

The SP facies association occurs in the intermediary portion of the section and consists of tabular flows with an average thickness between 10 and 30 m. The

internal structure of this facies association is characterized by a vesicular basal zone (**Bv**), a coarse-grained microvesicular core (**Bmvph**) and vesicular upper crust (**Bv**) **Fig. 6A**.

In the basal portion, most of the vesicles are spherical (2 – 5 mm), while subordinately some vesicles are slightly elongated (0.5 – 2 cm). The interface base-core is marked by pods with a concentration of segregation vesicles (**Bpod**) (**Fig. 6B**). Near the lava core, some portions developed irregular columnar joints (**Bmcj**). The coarse-grained massive core with several vesiculation and amygdaloidal patterns that varies in size (0.1 to 2 cm) and shapes most vesicles are spherical (**Bv**) and some are flat and elongated (**Bves**).

The upper half of the core is characterized by a vesicle layer (**Bhvl**) with about 5 cm thickness (**Fig. 6A** and **C**). In these layers, the vesicles are spherical and range in diameter from 0.2 mm to 2 cm. Segregation vesicles with form rounded occur near the top crust and were interpreted as the basal section of vesicle cylinders (**Bvc**) (**Fig. 6D**).

The upper vesiculated crust (**Bv**) of the SP facies association is locally marked by giant vesicles that characterize geodes that measure about 5 - 20 cm diameter (**Bgv**), partially or completely filled by quartz (amygdales).



Fig. 6: Log showing characteristics of the lithofacies in the simple pahoehoe facies association along of the profile that crops out between elevations of 865 and 1180 m. A) The contact between two simple pahoehoe flow (dotted red line) and the localization of lithofacies code (Bhvl, Bv, Bmvph) along of the flows; B) Pods with segregation of vesicles (Bpod); C) Vesicle layering (Bhvl); D) Basal section of a vesicle cylinder (Bvc); E) Giant vesicles / amygdales (Bgv) in the upper crust.

4.1.3 Compound pahoehoe (CP) facies association

Compound pahoehoe facies association outcrops between 1280 – 1330 m a.s.l. and the base of the CP flows package is in contact with rubbly pahoehoe flows. These facies association are formed by several units of flows called lobes. CP flows were identified in the intermediate portion of the profile and are characterized by S-

type lobes (spongy, Walker, 1989), with 0.2 - 2 m thickness and stacked vertically (**Fig. 7A**). The contacts between lobes are marked by thin chilled margin. The interior of the lobes is characterized by a lack of pipe vesicles and by a microvesiculated massive cores (**Bmv**) (**Fig. 7B**).

In the uppermost portions of CP facies association, the lobes are larger (~ 3 m) and the contacts between the lobes are difficult to recognize (**Fig. 7C**). The vesicles (**Bv**) occurs in various sizes (0.1 mm - 3 cm), shapes (rounded and drawn) and sometimes are filled by zeolites (amygdales).

The flow tops of the CP lithofacies association are marked by the presence of a sandstone layer (**SI**) (**Fig. 7C**). The layer of sediments changes the thickness according to the topography and can reach up to 10 cm (**Fig. 7D**). At the base of the sediment layer, in contact with the top of the compound pahoehoe there are vitreous basalt fragments in amid the silt-clayey rock. The fragments are elongated and measure about 3 cm in length and are oriented (**Fig. 7E**). Inside the fragments occur millimetric vesicles/amygdales that also are slightly oriented.

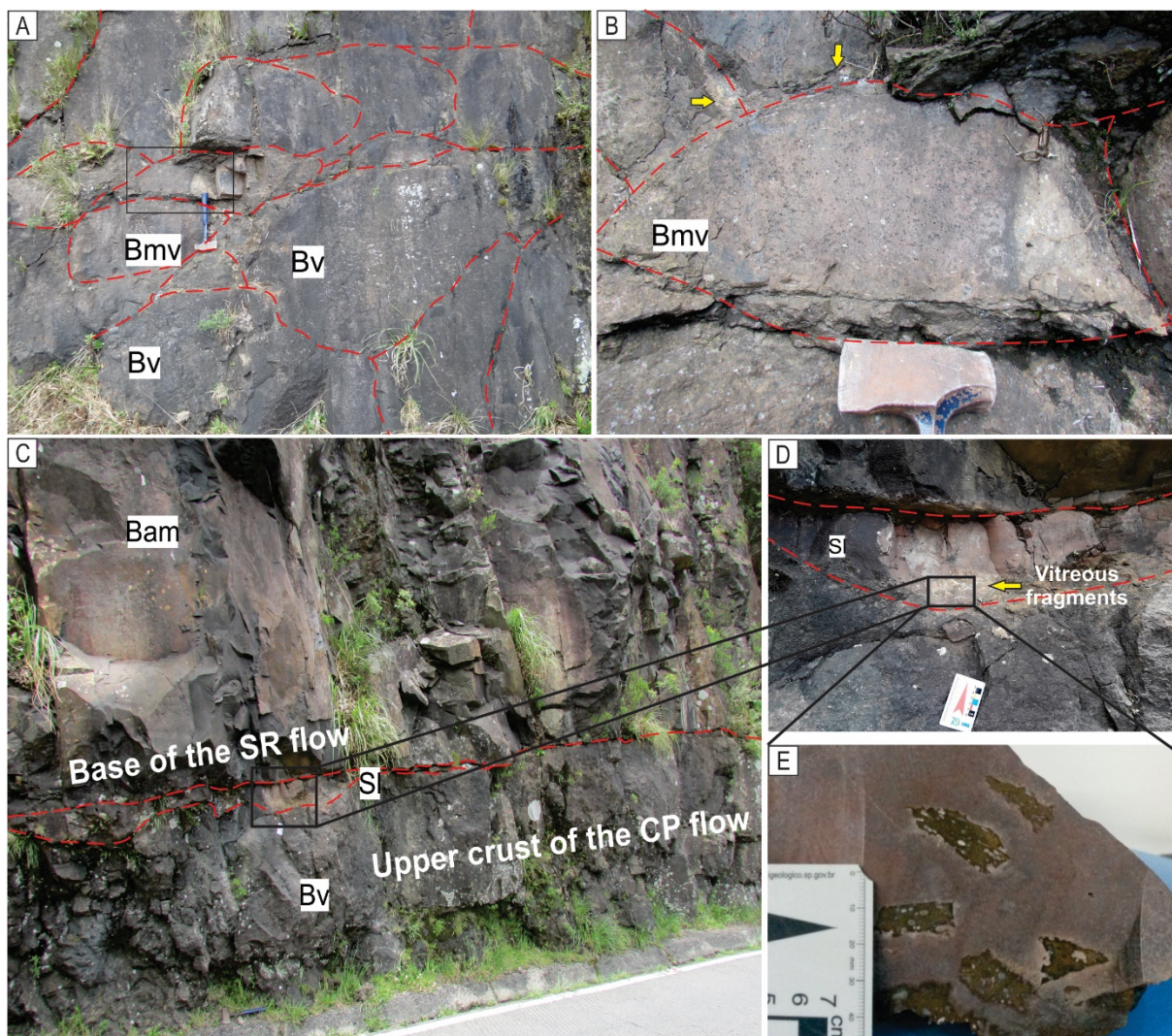


Fig. 7: Log showing characteristics of the lithofacies in the compound pahoehoe facies association along of the profile that crops out between elevations of 1285 – 1.300 m. A) Stacked lobes with 0,5-2 m thickness. B) Well distributed vesicles in the small S-type lobe (Bmv). The yellow arrow shows the thin chilled margin in some contacts of the lobes; C) Red lines showing a continuous sandy layer that divided the contact between upper crust of the compound pahoehoe and the base of the flow above; D) Detail of the sandy layer (between red lines) and the vitreous fragments (yellow arrow); E) Sample of the sedimentary layer. Detail for the oriented vitreous fragments on the sedimentary rock.

4.2 Facies association of the rubbly pahoehoe flows

The rubbly pahoehoe flows occur in the intermediary and upper half of the section in the volcanic succession. The lithofacies that makes up the architecture and geometry of the rubbly pahoehoe flows form simple rubbly facies association (SR)

This facies association is formed by simple rubbly pahoehoe flows characterized by a tabular geometry. The SR flows predominate along the profile and

the internal structure is organized in a smooth vesicular base (**Bv**), massive core (**Bam**) with block fracture pattern, upper vesiculated portion (**Bv**) and a brecciated rumbly top (**Bab**). The presence of sub-horizontal flow structures (**Bfs**) is common (**Fig. 8A**).

The SP flows starts to appear near of 920 a.s.l. and the contacts between the flows are difficult to see because the area is very weathered and vegetated. However, vesicular (**Bv**) and breccia top (**Bab**) levels allowed the individualization of three rumbly pahoehoe flows about 10 - 20 m thick, up to elevation of the 980 m.

In the intermediary portion of the Serra do Rio do Rastro section, rumbly pahoehoe flows crop out between 1040-1140 m and 1180-1280 m. The individual flows are 10 to 50 m thick.

The last occurrence of the SR facies association is between 1330-1440 m, until the contact with the acidic rocks in the top of the section. This portion has no outcrops and the definition of the morphology of the flows are characterized by the evidence in the soil, where it is possible to verify remnants of the breccia.

In general, the base of the rumbly pahoehoe flows is marked by a thin vesicular zone that ranges from 8 cm (thinner flows) to 15 cm (thicker flows). The vesicles are spherical (**Bv**) and locally elongated (**Bsvb**), with diameters from 1 mm to 5 cm. The massive core is characterized by an aphanitic aspect (**Bam**) (**Fig. 8B**) and a fracturing blocked pattern. In the upper half of the core, rare vesicles are distributed without an apparent pattern. The top of the rumbly pahoehoe flows thickness also ranges according to the size of the flow from 70 cm (thinner flows) reaching 5 meters in the thicker flows. The top is composed by breccias with sub-angular to sub-rounded fragments of various sizes (2-18 cm). Sometimes, the flow-top breccia enveloped massive core of the flow (**Fig. 8C**). The fragments are distributed in a chaotic assemblage and reddish oxidized coloration (**Fig. 8D**). The fractures and gap between the fragments of the top are filled by zeolites (**Fig. 8E**).

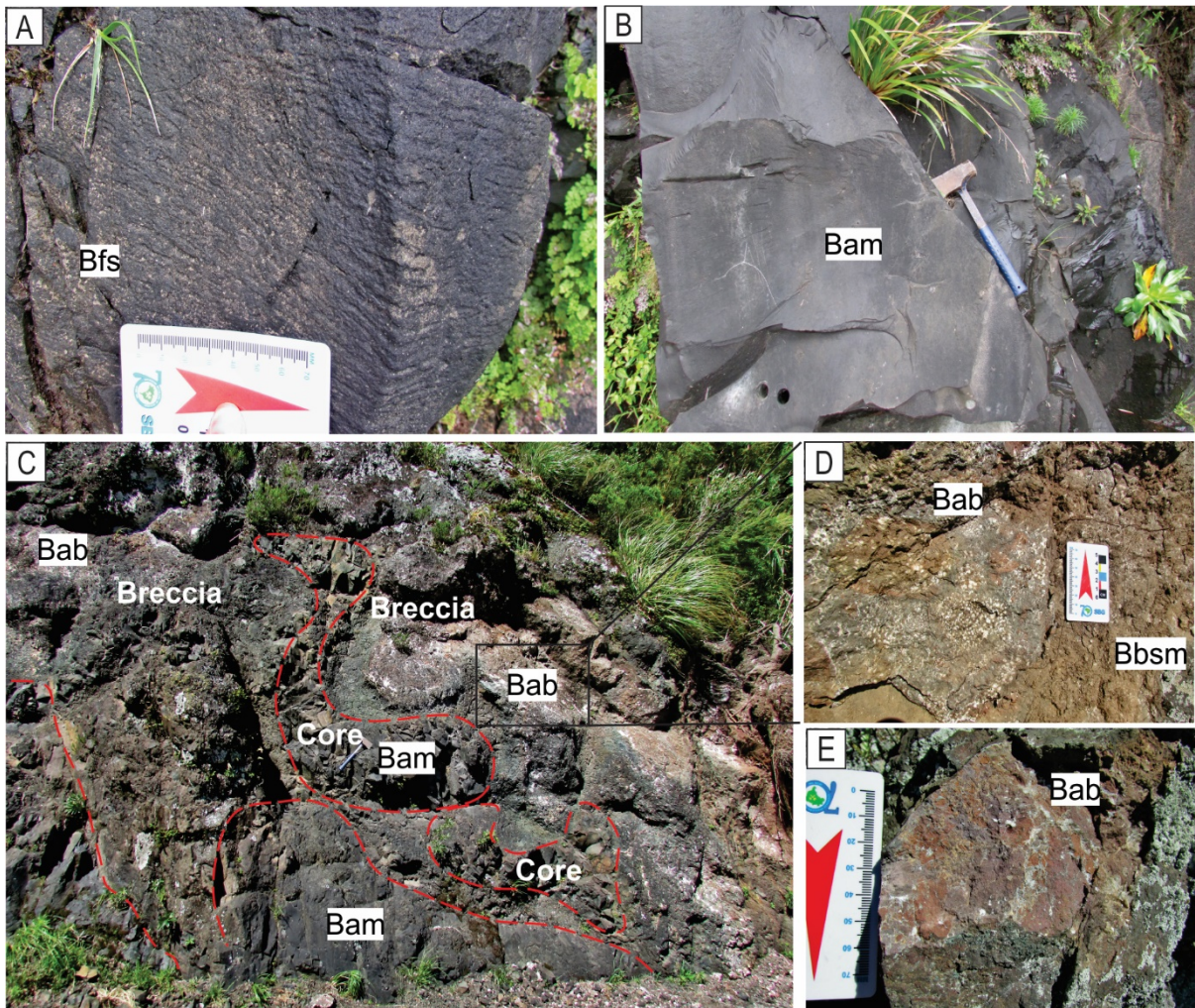


Fig. 8: Log showing characteristics of the lithofacies in the rubbly pahoehoe lithofacies association along of the profile that crops out between elevations of 890 – 1.440 m. A) Sub-horizontal flow structures (Bfs); B) Aphanitic basalt (Bam) with black coloration and aspect of fracturing blocked pattern; C) Flow-top breccia enveloped massive core of the flow; D) Spaces between fragments filled with sediments (Bbsm); E) Chaotic assemblage of fragments and reddish oxidized coloration with fractures and gap between the fragments filled by zeolites.

4.3 Facies association of the acidic flows

The acidic flows occur at the top of the section. This facies association outcrop as simple flows with tabular geometry (Acidic tabular - AT).

The contact between the rubbly pahoehoe flows (below) and the acidic rocks (above) was not observed. At the elevation of 1440 m rolled blocks of vitreous rock boulders were observed. From this altitude, the topography is characterized by small plateaus that reach up to 1500 m (**Fig. 9A**).

At the base of these plateaus, about 1470 a.s.l. occurs acidic lavas that consist of rock with a resinous luster called pitchstone. The pitchstones are characterized by rocks with black coloration and conchoidal fractures and consist in a vitrophyric texture with sparse millimetric vesicles (**Pmv**) (**Fig. 9B**).

The top of de acidic flows (~1490 m a.s.l.) is characterized by rolled blocks of acidic rocks with reddish coloration and a tabular structure banding that can to indicate flow structures (**Gts**) (**Fig. 9C**). The interior of these rolled blocks banded is marked by a granophyre characterized by a salt-and-pepper texture (**Fig. 9D**).

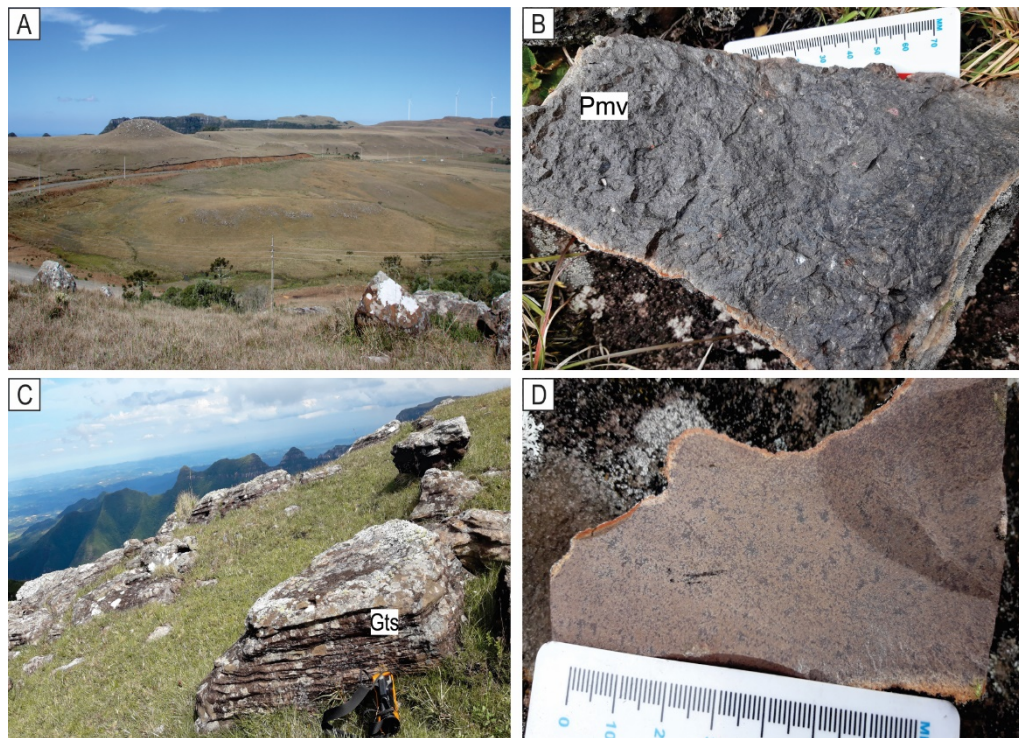


Fig. 9: Log showing characteristics of the lithofacies in the acidic lithofacies association along of the profile that crops out between elevations of 1.440 – 1.500 m. A) General view of the plateau geomorphology in the top of the Serra do Rio Rastro. The rocks outcrop as blocks and boulders; B) Pitchstones with black coloration, conchoidal fractures and sparse millimetric vesicles (Pmv); D) Block of rock with reddish coloration and tabular structure banding (Gts).

5. Petrography

The petrographic analysis was essential for the diagnosis and recognition of the morphological types of the flows, especially in places along the profile where the contacts between the lava flows and the other diagnostic characteristics for the

individualization of the flows were not visualized because of the lack of exposure and/or weathering of rocks.

The description of the main petrographic characteristics observed from the contact of the Botucatu sandstone with the basaltic flows and the others rocks of the volcanic package will be shown below.

5.1 Petrography of the contact zone of the Botucatu sandstone and the lavas of the Serra Geral Group

The contact of the volcanic rocks with the eolic sediments of the Botucatu Formation in Serra do Rio do Rastro profile is marked by a microscopic scale interaction between sediments and lava. The sandstone are medium-grains witch are composed by quartz with high sphericity (**Fig. 10A**). The sandstone near the contact have a low porosity because the spaces between the grains are filled by calcite cement. Parts of the sandstone are detached and involved by the lava where the carbonate is recrystallized by the heat of the lava (**Fig. 10B**). However, the thermal influence of the lava in the sandstone is minimum and it is visible only in a small margin of contact.

The lava has microlites of plagioclases in a glassy matrix. The glomeroporphyritic texture also occurs with clustering of tabular and prismatic plagioclases (up to 1 mm) near the contact.

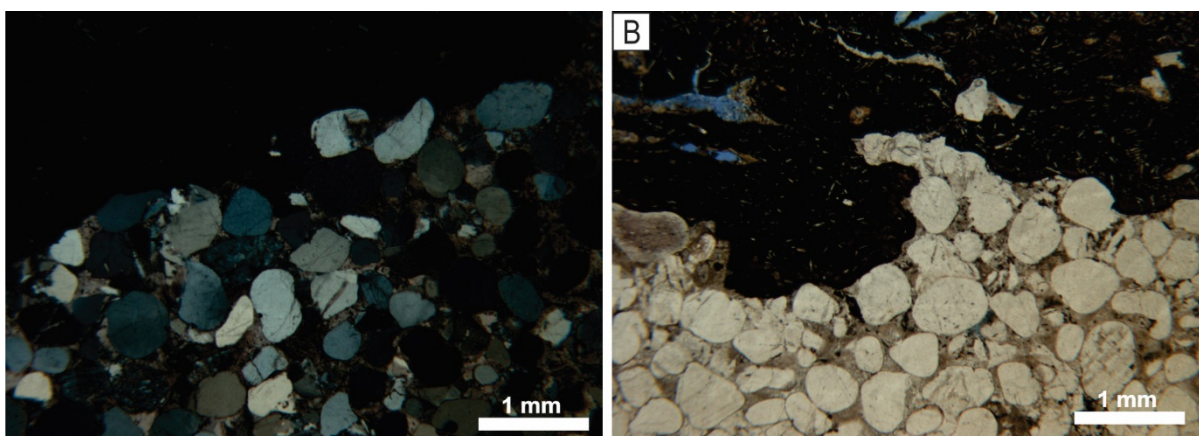


Fig. 10: Photomicrographs of the contact between Botucatu sandstone and the volcanic rocks of the Serra Geral Group. A) Sandstone with medium-grains of rounded quartz, crossed polarisers. B) Grains of quartz detached and involved by the lava, parallel polarisers.

5.2 Pahoehoe lava flows

5.2.1 Pondered pahoehoe flow

The pondered flow is holocrystalline with fine to medium-grained phaneritic rocks. The relative spatial arrangement of the minerals indicates mainly intergranular texture, characterized by interstitial pyroxene grains between laths of plagioclase (**Fig. 11A**). The mesostase is microgranular with quartz-feldspathic composition. Some differences observed in the base, core and top of the pondered flow will be exposed below.

At the base of this pondered flow, plagioclase phenocrystals range from 0.3 to 1 mm and augite crystals reaching 1 mm. The intergranular texture predominates with augite crystals between plagioclase laths. Occasionally, plagioclase and augite exhibit corroded edges that indicates resorption features. This basal portion of pondered flow has needles of apatite associated with the mesostasis. Olivines were not observed in the samples analyzed from the base.

The core of the pondered flow is marked by the presence of segregation structures and microvesicles between plagioclase and pyroxene crystals that are filled with smectite (**Fig. 11B**) and celadonite characterizing a diktytaxitic texture. Apatite needles are present in the core. Olivine crystals occur and ranging in size from 0.3 to 0.6 mm with various stages of alteration (**Fig. 11C**). The more common material of the alteration of the olivines is iddingsite, and sometimes the olivine crystals is almost totally altered to iron oxides.

In the upper portion of the pondered flow the diktytaxitic texture also occurs. Argilominerals of reddish-brown coloration, iron oxide and smectites fill the inter-mineral cavities. Eventually this material appears to have substituted part of the mesostase. This mesostase is quartz-feldspathic. . Plagioclase (~ 0.8 mm) and pyroxene (~ 0.5 mm) microphenocrysts are smaller than in the other portions of this flow. Both pyroxene and plagioclase crystals exhibit fractures and corroded edges. Zonation and reabsorption features are common such as sieve texture in the plagioclases (**Fig. 11D**). The olivines are altered by iddingsite and sizes around 0.5 mm.

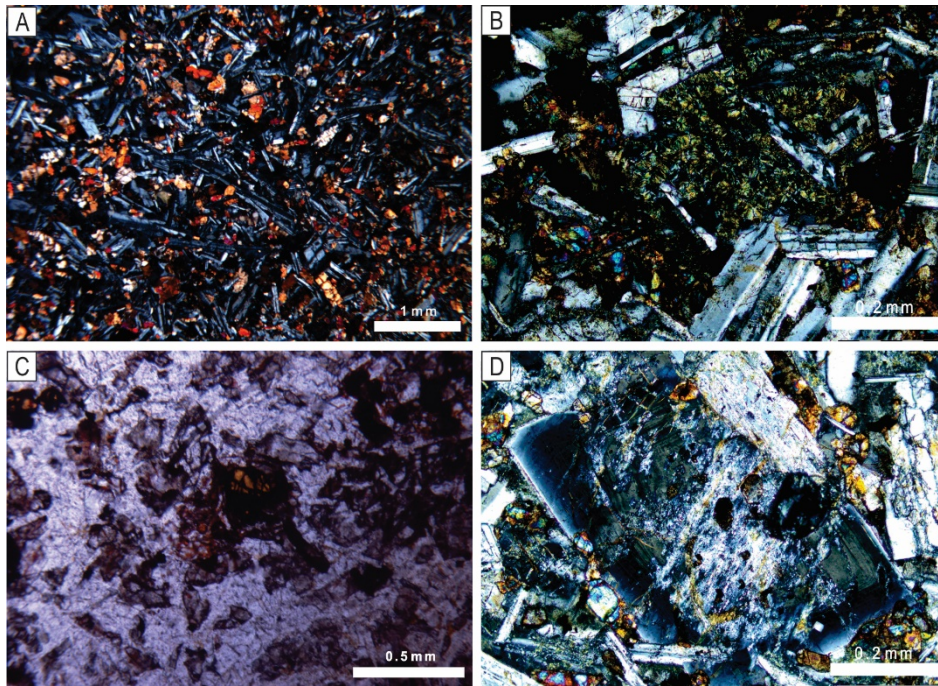


Fig. 11: Photomicrographs of the ponded pahoehoe flow. A) Intergranular texture, crossed polarisers; B) Diktytaxitic texture with clay minerals of reddish-brown coloration, parallel polarisers; C) Pseudomorpho of olivine, parallel polarisers. D) Zonation and sieve texture in the plagioclase, crossed polarisers.

5.2.2 Simple pahoehoe flows

The petrographic characteristics of the simple pahoehoe flows are similar to the pahoehoe ponded flow. However, in this facies the granulation appears finer and mark the lower abundance of phenocrysts than that of the ponded flow. The diktytaxitic texture is present at the base, core and top portions of the flows and stand out the vesicular characteristic along these flows.

The base of the pahoehoe flows are marked by porphyritic and glomeroporphyritic textures represented by isolated or clustered plagioclase phenocrysts. The plagioclases phenocrysts ranging from 0.2 to 1 mm. The plagioclase phenocrysts are tabular, prismatic, and are fractured, locally shows zonation (**Fig. 12A**). Together with some agglomerations of plagioclases occur altered olivine crystals(**Fig. 12B**). The diktytaxitic texture is evidenced by filling the inter-mineral cavities and fractures by green clay minerals (celadonite).

In the core, augite is intergranular and the diktytaxitic texture marks a microvesicular pattern. The amygdales are filled by a mixture of celadonite, smectite–

chlorite, serpentine and zeolite. They are in all portions of the thin sections and sometimes this material appears to have substituted part of the mesostasis of quartz-feldspathic composition. The apatites needles are scattered in the matrix with about 0.1 mm length (**Fig. 12C**). Plagioclase crystals exhibit fractures and corroded edges and reabsorption features are also common in the core of the pahoehoe simple flows (**Fig. 12D**).

The upper portion of the simple pahoehoe flows is characterized by intergranular texture in which augite between plagioclase laths predominates. The vesiculation pattern is marked by rounded (~0.1 mm length) to sub-rounded. Apatite (0.1 mm) is also present in this portion. The olivines are rounded (0.1 mm diameter) and are altered to a green microcrystalline aggregate identified as bowlingite and in some rocks is common for the olivine to be completely altered to iron oxide.

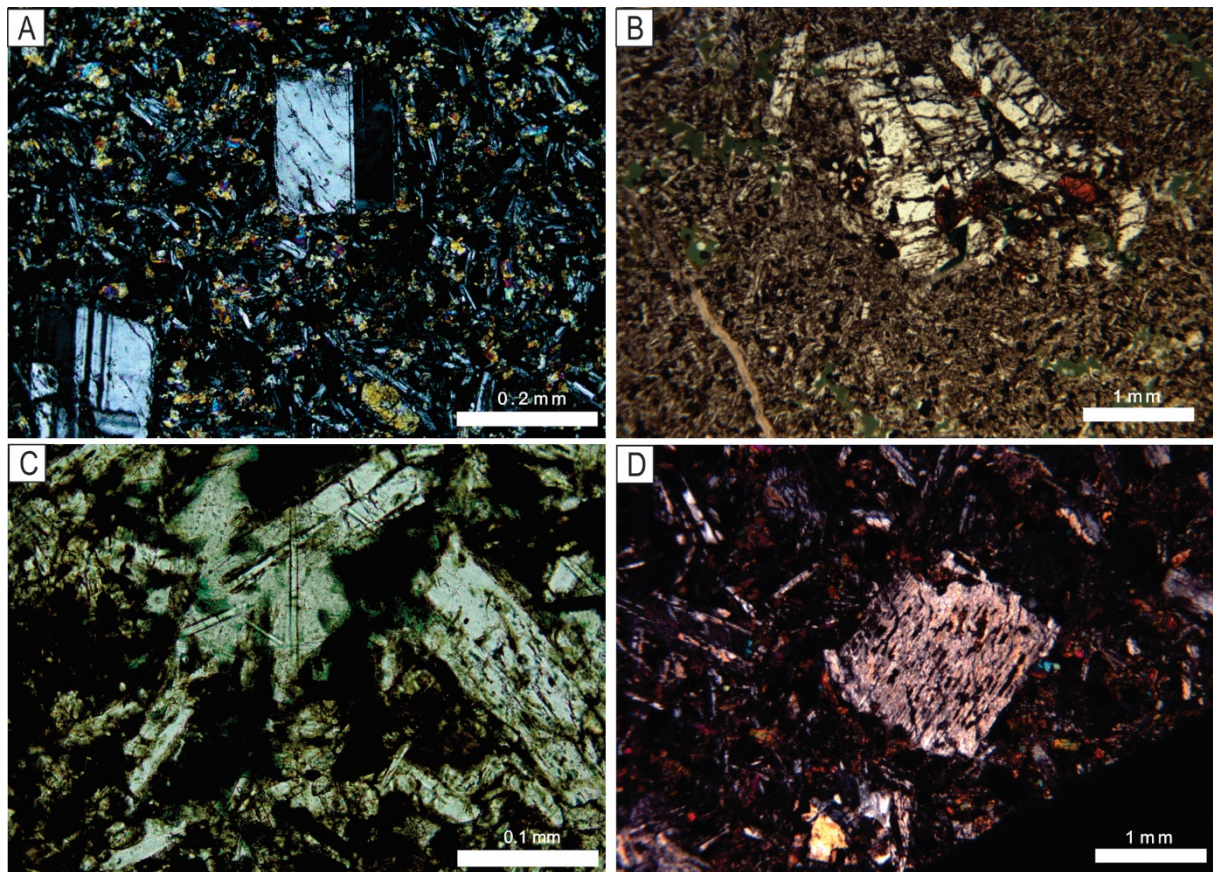


Fig. 12: Photomicrographs of the simple pahoehoe flows. A) porphyritic textures and isolated plagioclases, crossed polarisers; B) Agglomerations of plagioclases and altered olivines, parallel polarisers. C) Apatites agglomerated in the core of the simple pahoehoe flows, crossed polarisers. E) Plagioclase crystals with reabsorption features, crossed polarisers.

5.2.3 Compound pahoehoe flows

Petrographic characteristics of the compound pahoehoe flows change according to the size of the lobes and the proximity of the upper and lower edges of each lobe unit. However, it is observed that the granulation is always smaller when compared to another variation of the pahoehoe flow fields (ponded and simple).

In the nucleus of the largest lobes (~ 2 - 3 m thick) the texture is fine to medium-grained, holocrystalline and intergranular, with plagioclase and pyroxene crystals reaching 0.17 mm (**Fig. 13A**). Needles of apatites occur in the cores of the thicker lobes. The smaller lobes (~ 0.2-2 m thick) present rounded vesicles and it is distributed more homogeneously. The core of these small lobes is hypocryalline and aphyric (**Fig. 13C**). The amygdales are filled by clay minerals, zeolite and chalcedony (**Fig. 13B**).

Near the edges the lobes are in general holohyaline and oxidized, were ripiformes small crystals of plagioclase (average 0.1 mm) are inserted in the glass matrix. Crystallites, spherulites and skeletal crystal were observed (**Fig. 13D**).

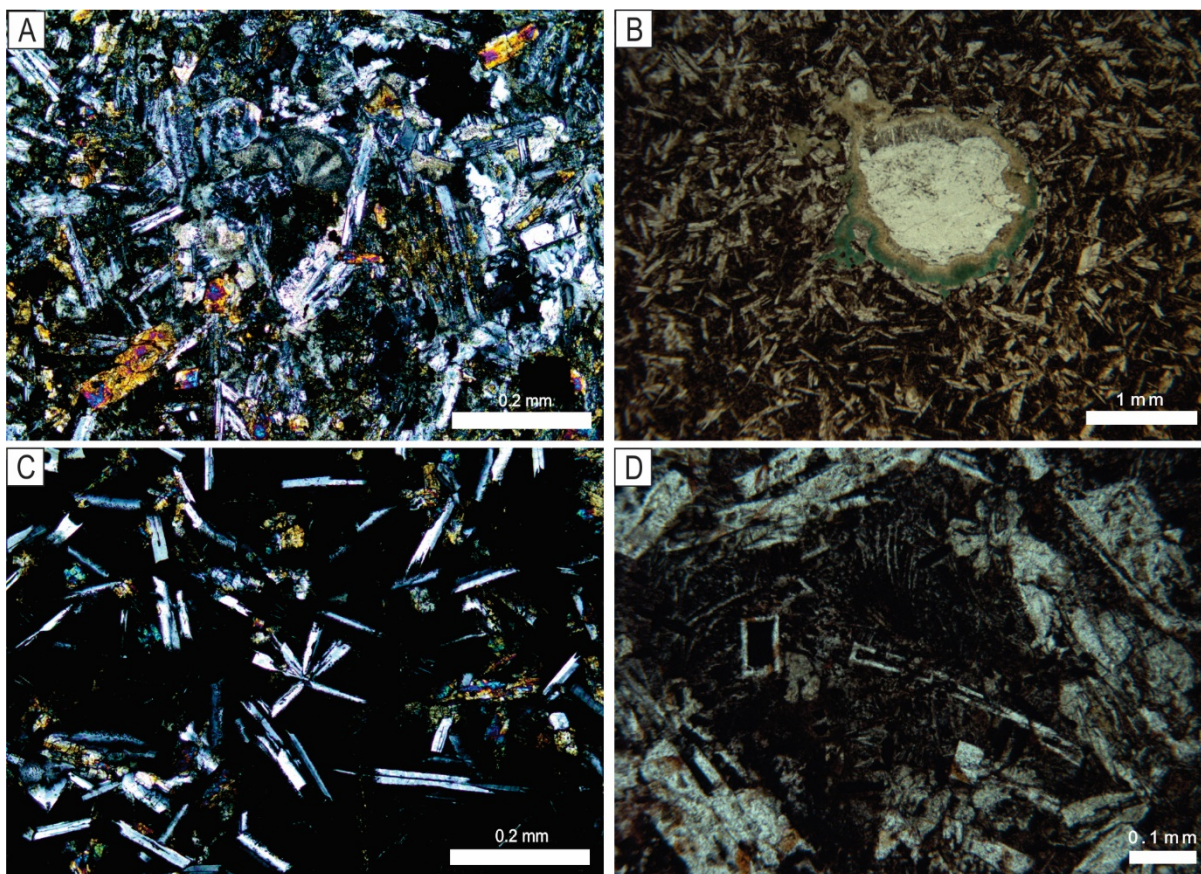


Fig. 13: Photomicrographs of the compound pahoehoe flows. A) Intergranular texture in the inner core of the thicker unit of lobes, crossed polarisers. B) Amygdales filled by chalcedony in the inner and celadonite (green Collor) in the edge of the amygdale, parallel polarisers. C) Holohyaline texture in the edge of the lobes units, crossed polarisers. D) Skeletal morphology in plagioclases crystals, crossed polarisers.

5.3 Rubbly pahoehoe flows

Rubbly pahoehoe flows are in general very fine granulation throughout the flow (base, core and top) when compared to pahoehoe flows. The rubbly pahoehoe flows are characterized by an aphanitic, hypocrystalline and aphyric features and the matrix is rich in plagioclase microlites. The main intergranular texture are composed by sub-equal proportions of plagioclase and augite relationship with a cryptocrystalline matrix (**Fig. 14A**). Intersertal texture also is common with interstitial glass.

The base of the rubbly pahoehoe flows is marked by sparse vesicles that are rounded a sub-rounded, and amygdales filled by zeolite, sometimes chalcedony and by clay minerals such as esmectite and celadonite (**Fig. 14B**). The size of the

vesicles is variable (0.1 ~0.5 mm). Diktytaxitic texture occur where the intergranular open spaces are more scattered in their distribution and occupied by celadonite and smectite (**Fig. 14C**) or iron oxide. Plagioclase microphenocrysts where acicular to prismatic and display a flow alignment (**Fig. 14D**).

The core of these flows is plagioclase-phyric in a microcrystalline groundmass texture (<0.1 mm). Sometimes plagioclases are grouped into glomeroporphyritic texture that can reach 0.5 mm (**Fig. 14F**). Anhedral grains of magnetite are scattered by the groundmass.

In the upper part of the core, the amygdales have various shapes (rounded, stretched, or in inter-mineral) sizes from <1 mm to 5 mm and are filled by a range of secondary minerals (**Fig. 14E**). Olivine is rare but occurs between the core and top of the rubbly pahoehoe flows (**Fig. 14H**) and are mostly altered by iddingsite and iron oxide.

The top of the rubbly pahoehoe flows are brecciated, vesiculated and frequently very weathered. Therefore, it was not possible to make thin sections of this part of these flows. According to the field scales, the fragments exhibit sizes ranging from millimetric to centimetric scales, where the spaces inter-fragments are cemented by zeolite and quartz. The edges of the fragments appear to have been smoothed and the red material of the matrix (between the fragments is an admixture of fine-grained rock flour and altered glass (Barreto et al., 2014).

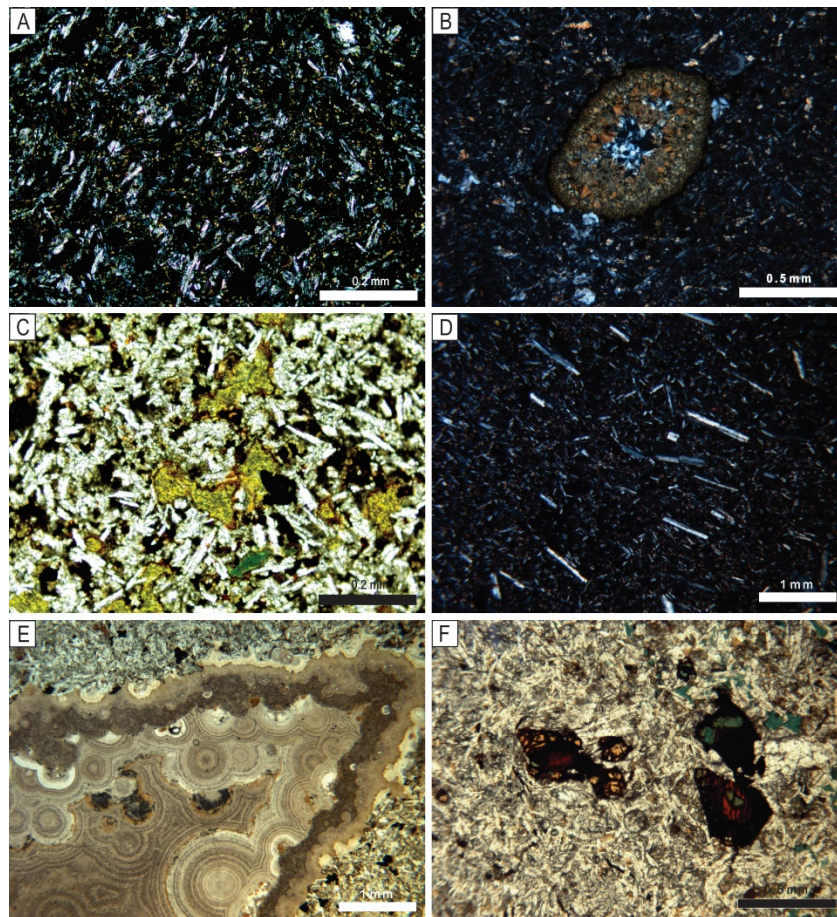


Fig. 14: Photomicrographs of the rhyolitic flows. A) Intergranular texture with a cryptocrystalline matrix, crossed polarisers. B) Rounded vesicle/amygdale by chalcedony in the base of the rhyolitic flows, crossed polarisers . C) Diktytaxitic texture in the intergranular spaces occupied by celadonite, smectite and dissolution of the iron oxide, parallel polarisers. D) Trackitic texture where the plagioclases presents preferential direction, crossed polarisers; E) Vesicles/amygdales filled by opal and chalcedony, parallel polarisers. F) Agregates of olivine crystals altered to iddingsite (reddish-brown color) and bowllingite (green color).

5.4 Acidic flows

The top of the Serra do Rio do Rastro profile shows acidic rocks with vitrophyres at the base, and granophyres at the top.

The vitrophyres are composed of acicular, microlites of plagioclase, pyroxene and opaque minerals in an essentially glassy matrix, witch characterized holohyaline texture (Fig. 15A). The reddish-brown color of the glassy can be associated with the oxidation of the groundmass. Rounded to sub-rounded amygdales filled by zeolites reaching ~0.6 mm in diameter occurs (Fig. 15B).

In the granophyres, small crystals (<0.1 mm) of plagioclase, pyroxene and opaque minerals are surrounded by hipocrystalline matrix. Locally, the glass was transformed into microcrystalline aggregate, which consists of altered feldspars and hydrated minerals (Fig. 15C and 15D). In these holocrystalline rocks the vesicles, amygdales and phenocrysts are not observed.

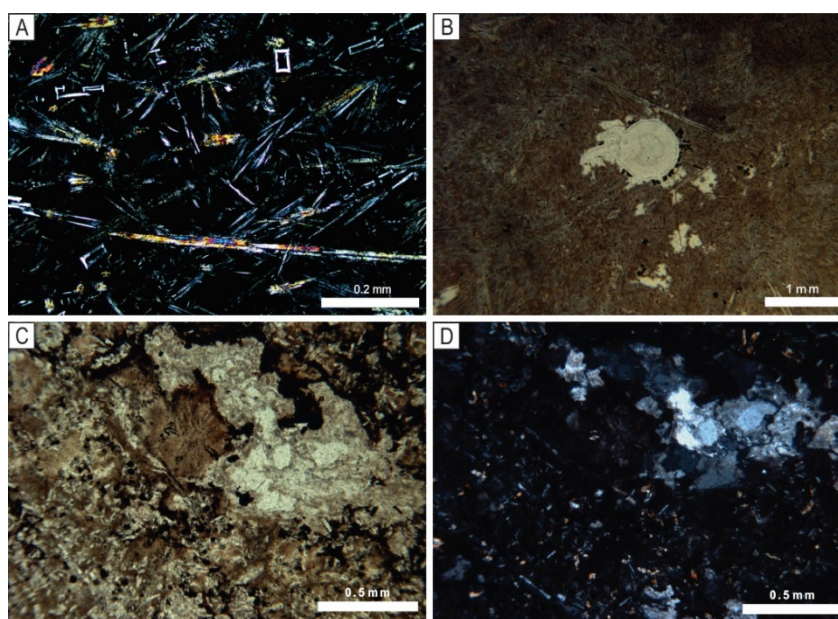


Fig. 15: Photomicrographs of the acidic flows. A) Holohyaline texture in the pitchstone, whit skeletal and microlites of plagioclase and pyroxenes, crossed polarisers. B) Rounded to sub-rounded amygdales in the vitrophyres, parallel polarisers. C and D) Hipocrytalline matrix with interstitial turbid mass and microcrystalline aggregate of altered feldspars and hydrated minerals, parallel polarisers in C and crossed polarisers in D.

6. Whole-rock Geochemistry

The rocks along the profile at the studied area have SiO₂ content ranging from 47.78 to 66.56 wt%. In the TAS diagram (Le Bas et al., 1986 – Fig. 16A) the samples are compositionally basic, intermediate and acid rocks showing a high range of silicic content. The samples plot in the sub-alkaline/tholeiitic rocks. Most of the samples are distributed in basalts and basaltic andesites fields which correspond to the SR, PL and SP facies association. Generally, the SP lava flows are slightly more primitive than the PL and the SR flows. The CP flows are andesitic rocks and the acidic rocks occupy the dacite field.

The rocks are tholeiitic with a low concentration of alkalis ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} < 5$ wt%) in the less differentiated members (basalts to andesites), and a gradual increase in the FeO^*/MgO ratios in the most differentiated terms (Fig. 16B). The enrichment of the FeO^* concentration in the intermediate compositions and without a significant increase in the alkali content shows a typical evolution of magmas that crystallized phases rich in MgO (Fenner, 1929, Fig. 16C).

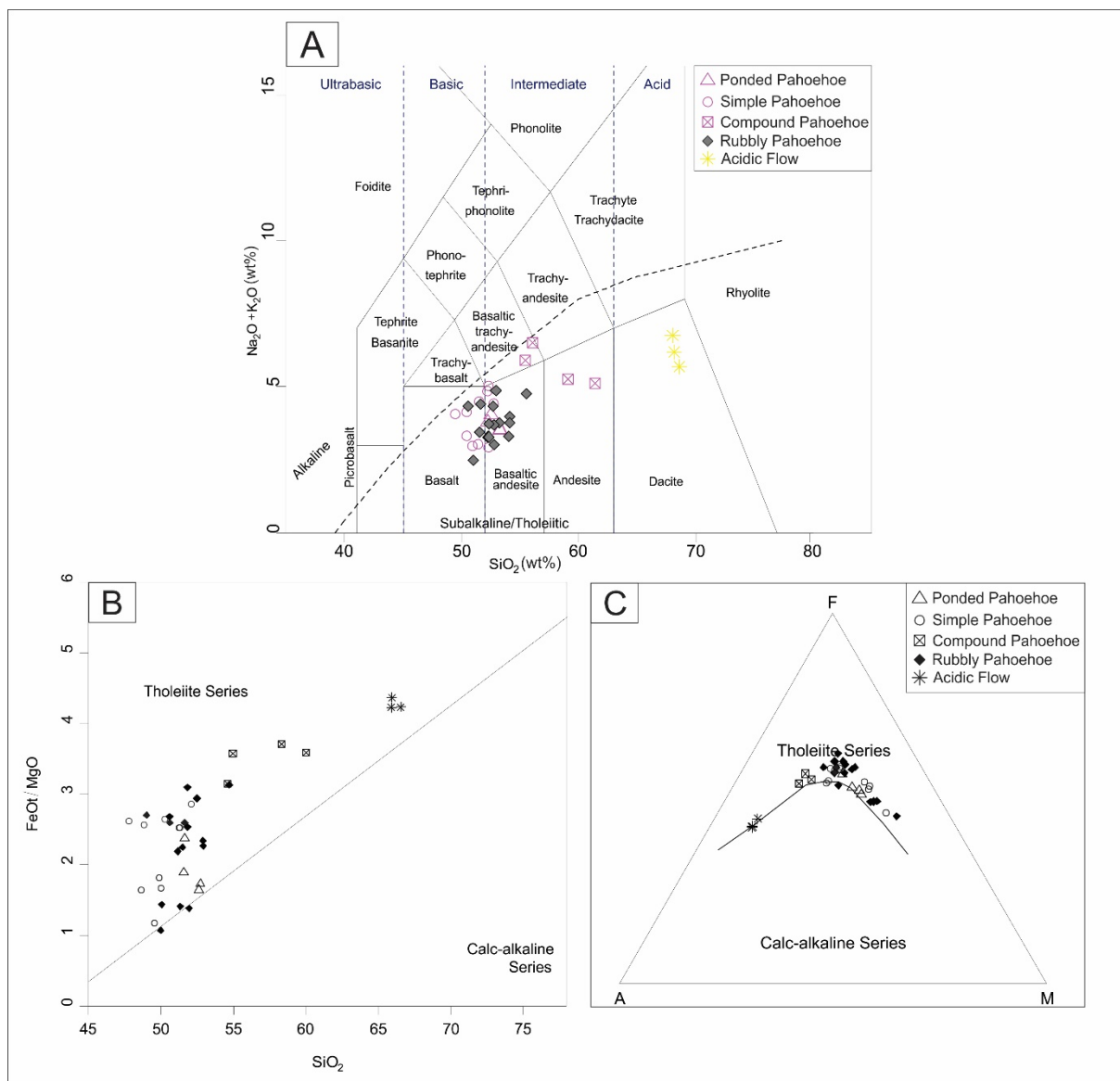


Fig. 16: Classification diagram. A) Total alkali vs silica diagram classification (Le Bas et al., 1986). B) FeO^*/MgO versus SiO_2 (Miyashiro, 1974). C) AFM diagram of toletic and calcium-alkaline series discrimination of the basalts investigated in this study (Irvine & Baragar, 1971).

6.1 Major elements

To better understand the geochemical changes and the magmatic evolution along the Serra do Rio do Rastro profile, the Fig. 17 summarizes the morphologies, the main geochemical according to separation as High-Ti and Low-Ti contents, that will be approached on the next topic and the volcanic units (from 1 to 9) according to the eruptive style also will be show in this figure.

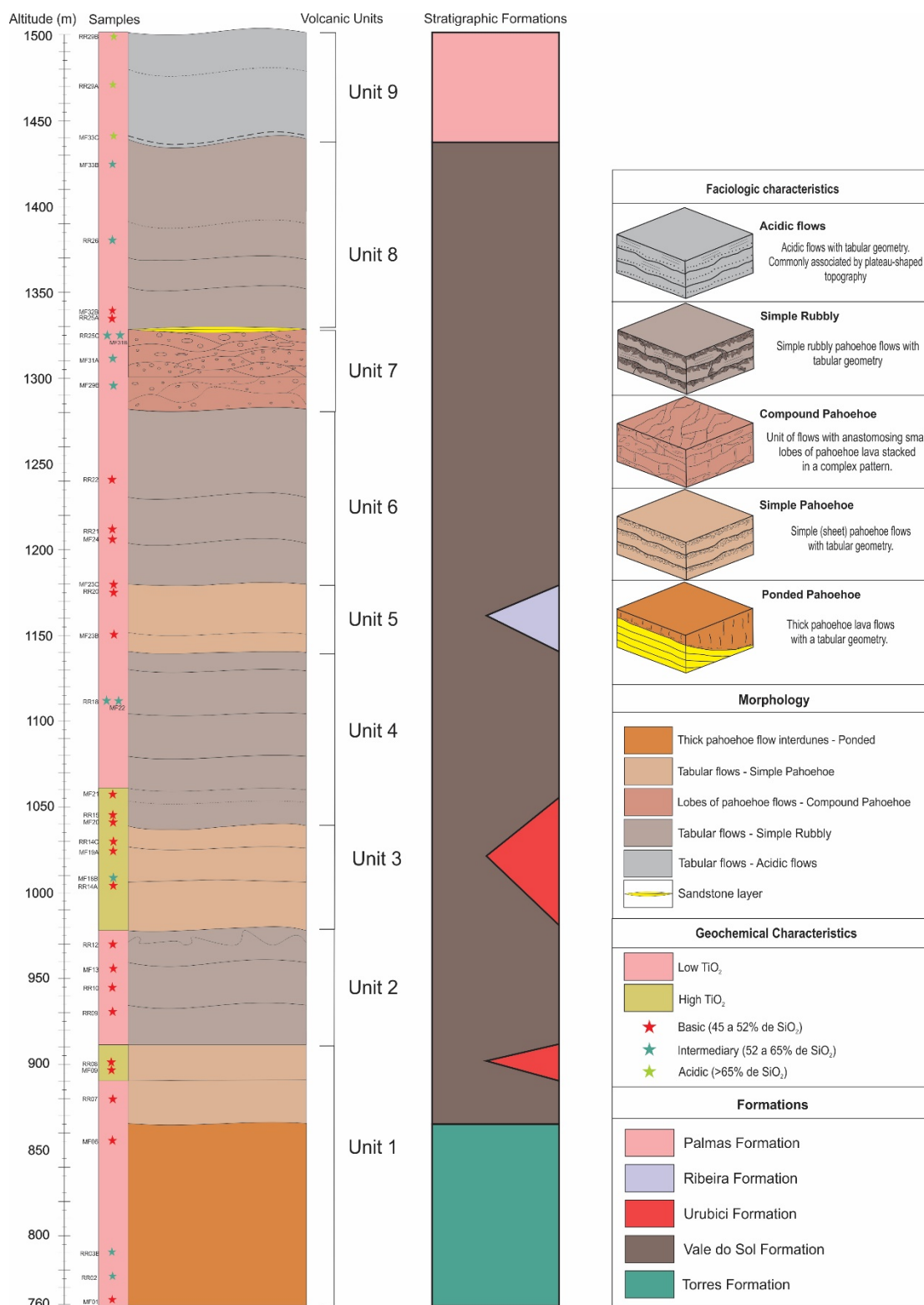


Fig. 17: Profile of the Serra do Rio do Rastro section showing the morphology types along the respective altitudes (m), volcanic unit and the formations correspondent. The stars mark the analyzed samples.

The graphs with the distribution of the larger elements in the form of oxides versus MgO as differentiation index are showed in Fig. 18. The variation in MgO contents in the most basic rocks is between 4.15 - 8.34 wt%. Among the different

associations, the average of facies ponded was 5.6 wt%, in facies SR and SP 5.3 wt%. In the pahoehoe compound facies association, the average is lower with 3.03 wt% of MgO content. The acidic rocks the content of MgO is approximately 1.3%. The concentrations of SiO₂ present negative correlation with MgO, with a progressive increase towards the most differentiated terms.

Clearly, there is the separation between a predominant group of rocks with low TiO₂ (BTi, 0.79 -1.74 wt.%) and P₂O₅ (0.1-0.5 wt%), and a minor group with high TiO₂ (ATi; 3.5-3.8 wt%) and P₂O₅ (~ 0.5 wt%). Within the group of low TiO₂ (BTi) and P₂O₅, there are also acidic rocks. In the BTi rocks group, the trend presents an inflection point that divided two distinct lines of variation stand out in the concentration distribution in relation to the MgO. The first line in the intermediate rocks of the CP facies (unit 7) and in the rocks of the acid flows (unit 9) presents a positive correlation with the progressive enrichment in TiO₂ contents (0.88 - 1.73 wt%) toward higher concentrations of MgO. The second one, presents a negative correlation, with a decrease in the content of TiO₂ in the rocks of higher concentration of MgO. The ATi group does not show a remarkable correlation trend, but a clustering of the samples with MgO contents in ~ 4.5 wt%.

The CaO presents a well-defined trend in relation with MgO, with progressive decrease in more evolved rocks. The low CaO and MgO indicates fractionation of a phase with Ca, (plagioclase or calcic pyroxene). Al₂O₃ also presents a positive correlation, however with some dispersions in the trend mainly in the initial flows of unit 1. The difference in Al₂O₃ concentration, for the same degree of evolution, may reflect differences in the melting conditions (Hirose and Kushiro, 1993).

The FeO * and TiO₂ show similar pattern, with trends that mark enrichment of both oxides in the intermediate to acidic compositions. According to Rocha-Júnior (2010), the behavior of Fe fortify the possibility of different melting conditions, because even though it is not affected by the degree of partial melting, this element (Fe) is significantly sensitive to the pressures where the melt occurs. It is concentration is higher in magmas generated under higher pressure conditions (Hirose & Kushiro, 1993). However, differences in Fe content may suggest that the melting occurred in regions of the mantle already depleted in this element due to past melting processes (Rocha-Júnior, 2012).

For both Na₂O and K₂O have a similar distribution with a negative trend indicating increased concentrations of these elements with reduction of MgO.

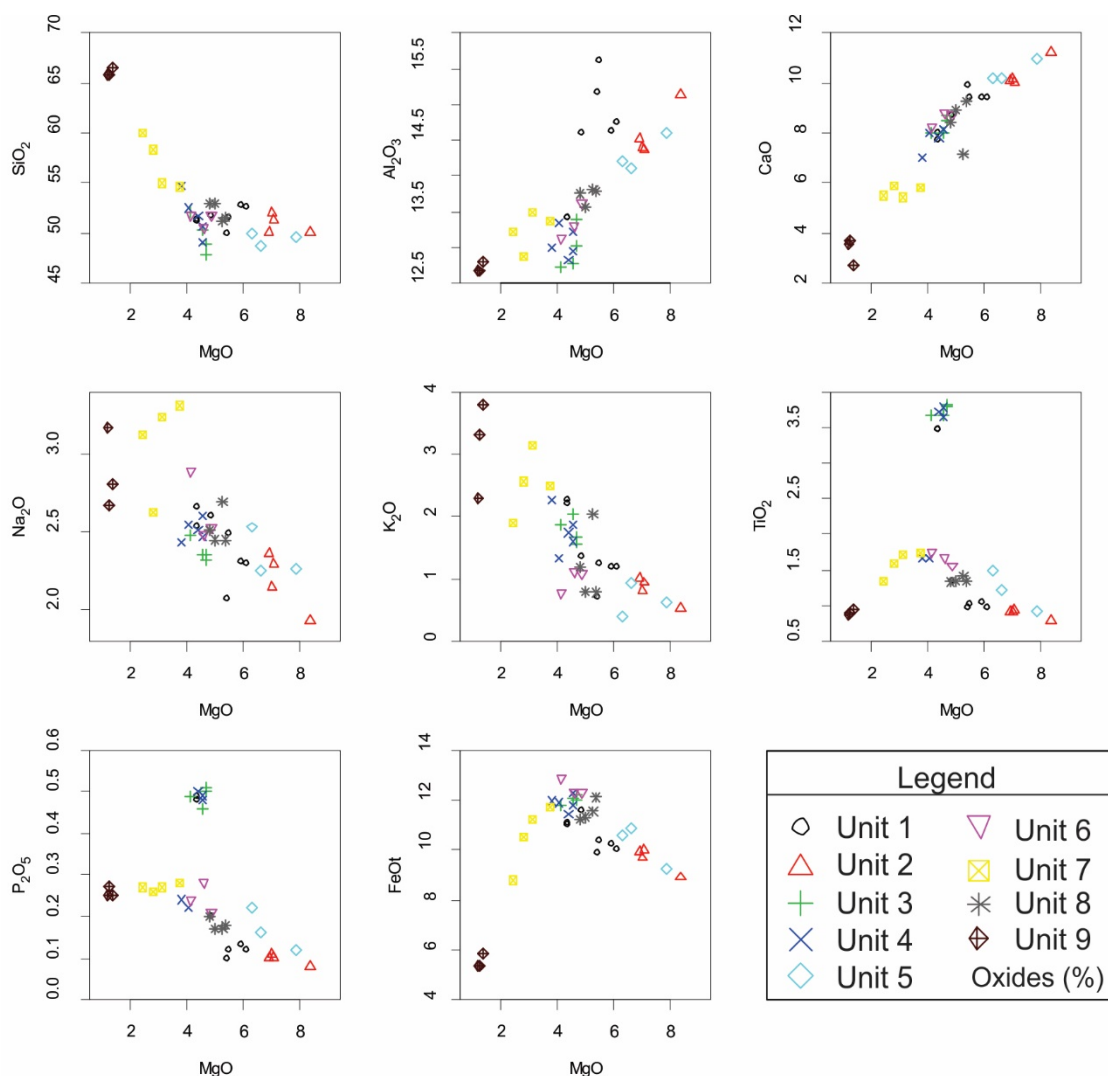


Fig. 18: Larger elements in the form of oxides (%) versus MgO (%) for the acid and basic flows in the Serra do Rio do Rastro section.

6.2 Trace elements

The concentrations of the Zr vary from 75 to 317 ppm and because it is an important petrogenetic element for basic rocks, this element was used as index of differentiation in the binary diagrams (Fig. 19). Almost all diagrams, except with Ce, show a clear separation between BTi and ATi volcanic rocks.

Negative correlations to Zr are visualized for the Mg# and Ni elements. As the content of Mg # and Ni decreases the Zr increases. The values of Mg# [$Mg\# = 100 \times MgO / (MgO + FeO)$] in the studied rocks range from 29 to 63. Values <65 of Mg#

indicate that basaltic magmas had significant fractional crystallization processes (Rocha-Junior, 2010).

In the incompatible Large Ion Lithophile Elements (LILE) as Ba presents a positive correlation with Zr, with a well-defined trend for BTi rocks. Abundance increases gradually from basic to acidic rocks. In HTi rocks, Ba concentrations range from 475 to 833 ppm and Zr has concentrations higher than 280 ppm. Rb and Sr have some dispersion. The concentrations of Rb in LTi rocks are relatively low for the most basic rocks (6 to 55 ppm) but a positive correlation can be verified, which increases in the most differentiated terms.

For High Field Strength Elements (HFS) and Rare Earth Elements, the variation diagrams from Y, La and Ce show strongly positive correlations with significant enrichments as the degree of evolution increases, this behavior is compatible with processes of evolution by crystallization fractions involving mainly plagioclase, pyroxene and opaque minerals (titanomagnetite).

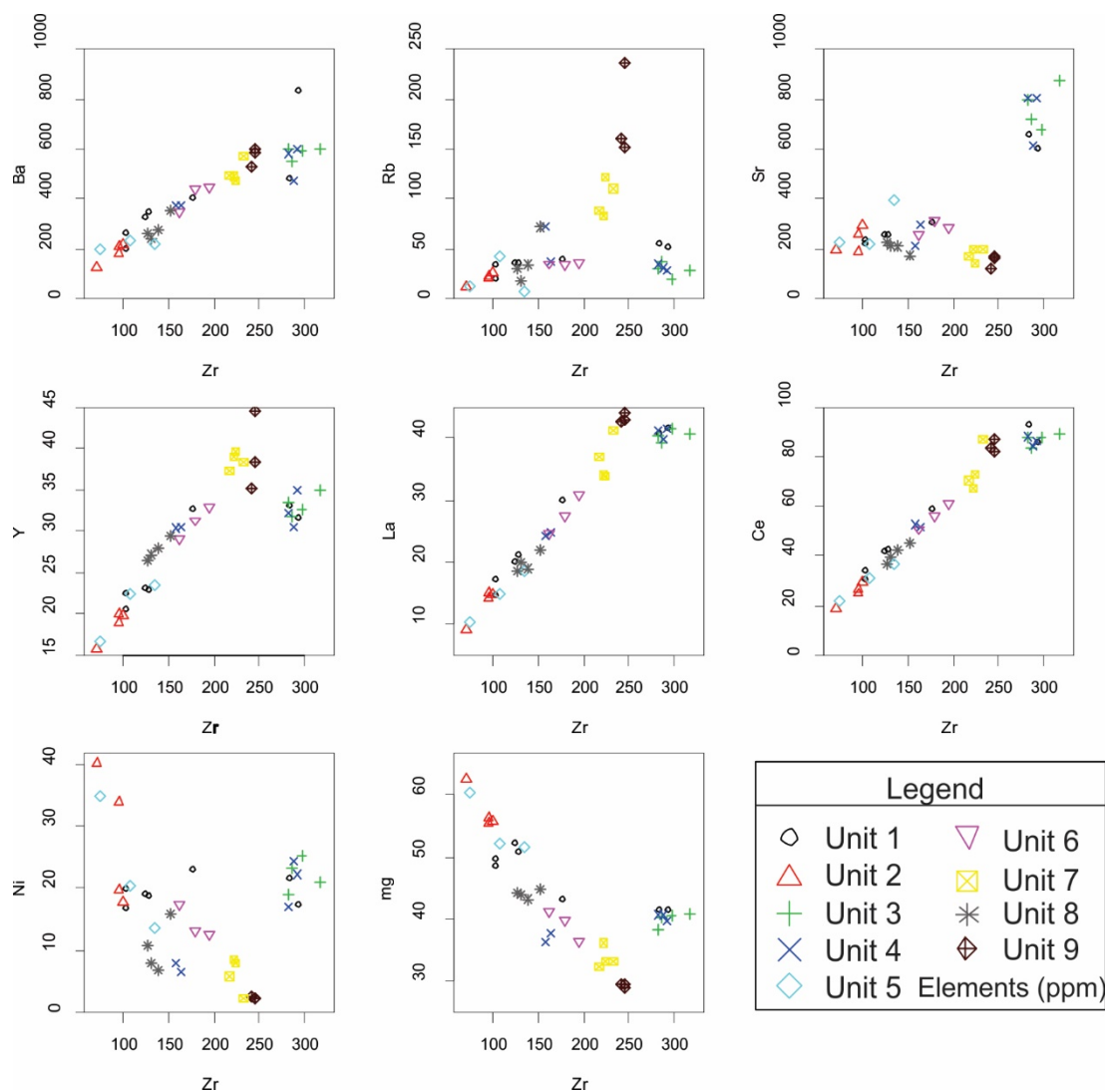


Fig. 19: Variation diagrams of trace element concentration (ppm) vs. Zr (ppm) from rocks in the Serra do Rio do Rastro section.

The ETR patterns normalized by chondrite (Boynnton, 1984), all the samples analyzed showed a slight enrichment in light ETRs in relation to the heavy ones, with the samples with the highest TiO_2 content being the most fractionated (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). The average (La / Lu) N ratio in the basic rocks of the BTi type is 5.7 and in the basic rocks ATi the fractionation is higher with a mean value of 12.3.

Among the group of LTi rocks, unit 1 has the largest fractionation (7.2), followed by unit 7 with 6.9. Unit 5 has the lowest fractionation value in the set of basic rocks LTi, with 4.6. The acidic rocks of unit 9 have a ratio (La / Lu) N of 8.3.

The group of HTi rocks that comprising part of unit 1 and 4 and all of unit 3, has a more fractional pattern and no show Eu negative anomaly. Instead the group of

LTi rocks, we can observe well-defined Eu anomalies that are more evident in the top units of the profile (6, 7, 8 and 9).

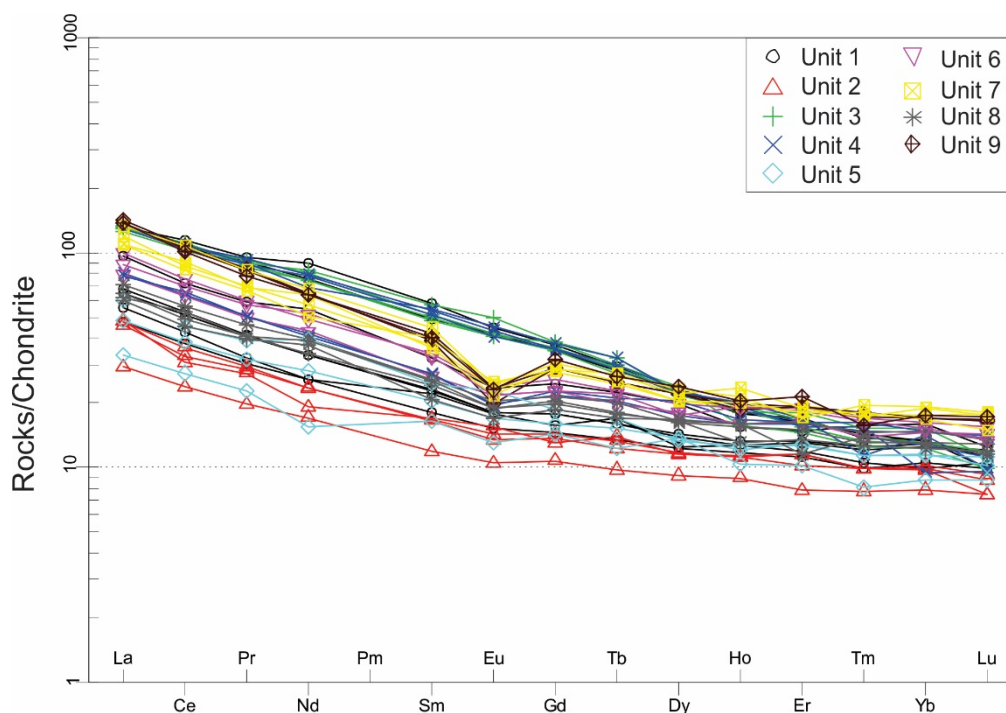


Fig. 20: Multi-element plot with patterns of rare earth elements normalized to chondrite (Boynton, 1984).

6.3 Correlation with geochemical magma-types

According to the geochemical classification, the rocks of the study region present the two groups with respect to the TiO_2 content: high TiO_2 (HTi, > 2%) and low TiO_2 (LTi, < 2%), with a predominance of the latter (Bellieni et al 1984; Mantovani et al, 1985; Melfi et al., 1988). Based on Peate et al. (1992) classification scheme the basic and intermediate rocks HTi are Urubici magma-type (Fig. 21A). The most LTi rocks are classified as magma-type Gramado and unit 5 plots in Ribeira field. The acidic rocks are equivalent to Palmas type according to Peate et al (1992). On the classification diagram for the Palmas lavas (**Fig. 21**), all the samples occupy the Caxias do Sul subgroup field (Nardy et al., 2008).

The LTi Gramado magma-type predominates along the profile and comprises several types of faciologies (compound pahoehoe, simple pahoehoe, ponded pahoehoe and rubbly pahoehoe) and, consequently, several volcanic units. The

Urubici type (HTi) occurs as simple pahoehoe (units 1 and 3) and rubbly pahoehoe (unit 4, **Fig. 17**).

The Paranapanema and Ribeira magma types overlap in Ti contents with the low-Ti Gramado and Esmeralda magma types, however, they are referred to as high-Ti types for Peate (1997) because of their high Ti/Y values. Peate (1992) described that the Gramado and Esmeralda magma types show high Rb/Ba (> 0.1) coupled with low Ti/Y (< 300). However, the H-Ti and Ribeira magma types have high Ti/Y (> 300) and low Rb/Ba (< 0.1) (Peate, 1992). The unit 5 have an average of Rb/Ba = 0.09, and Ti/Y ~ 344 . Peate (1997) highlights that de Ribeira-type have similar primitive-mantle-normalised trace element patterns of those Paranapanema and Pitanga types differing only in the degree of enrichment.

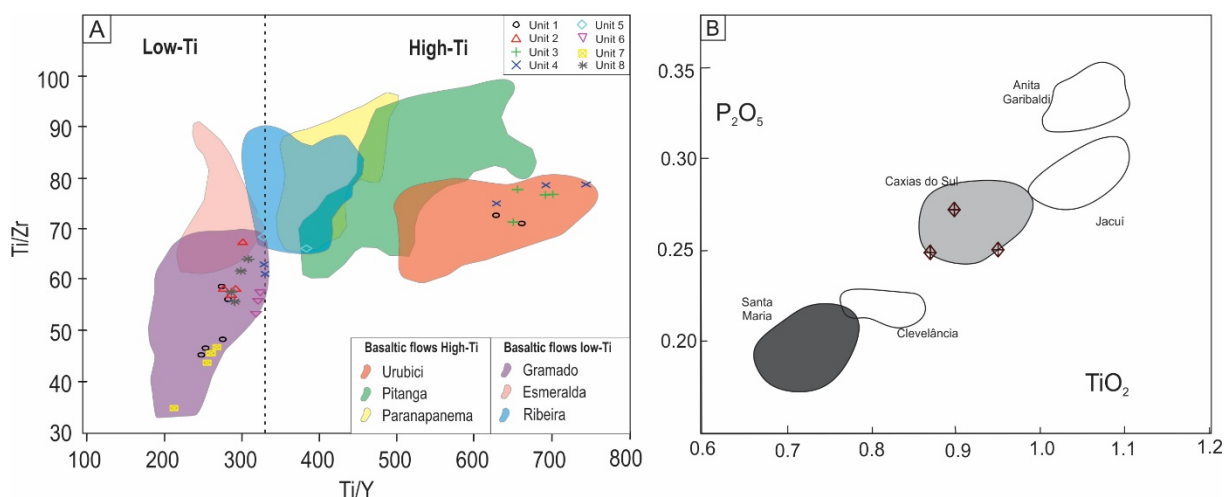


Fig. 21: Classification diagrams of the magma-types existing in the Serra do Rio do Rastro profile. A) Ti/Y versus Ti/Zr; C) P₂O₅ versus TiO₂ for the LTi acid rocks showing the fields of the subgroups of the Palmas group. Adapted from Peate (1992).

7. Discussion

7.1 Emplacement of lava flows at the Serra do Rio do Rastro and the relationship with the facies association

The volcanic succession is marked by the intercalation of the pahoehoe and rubbly pahoehoe basaltic flows. The flows present a great variety of the thicknesses

that sometimes are difficult the visualization of the contact between the flows. In the total package of the volcanic pile, there is a predominance of rubbly pahoehoe flows (50.7%) over pahoehoe flows (41.2%). At the top of the sequence occurs the acid flows that constitute 8% of the pile in the Serra do Rio do Rastro session. The pattern differs of normally observed in LIPs, where pahoehoe lava flow fields are dominantly flood basalt lavas in LIPs (Bryan et al., 2010).

The set of characteristics that mark the lithofacies allowed the interpretation of 5 (five) facies association. The pahoehoe flows constitute ponded lavas, simple pahoehoe, and compound pahoehoe facies association. The others are simple rubbly and acidic flows. The compartmentation of the flows in different facies allows a better understanding of the phases of volcanism present in the region.

LIP's are characterized by a magmatic onset, the main phase, and a waning phase that represent the different evolutive stages of magmatism (Jerram and Widdowson, 2005; Bryan and Ernst, 2008). Therefore, a volcanological approach provided important evidence that the lava packages changed their morphologies and architecture throughout the different phases of volcanic evolution (Waichel et al., 2012; Rossetti et al., 2014).

In the stratigraphy of the Southern portion of the Paraná-Etendeka Province in Brazil, the different volcanic units are formed during distinct emplacement conditions (Barreto et al., 2014; Rossetti et al., 2014; 2018). These authors attribute the onset of volcanism is made of compound lavas on the early stages of volcanic activity, succeeded by more evolved flows that constitute simple pahoehoe, denominated of Torres Formation (Rossetti et al., 2018). The main phase of the magmatism in the South hinge of the Torres Syncline are formed by rubbly pahoehoe flows from Vale do Sol Formation more evolved compositions (intermediary) and the peak of the volcanism culminates with the emplacement of extensive acidic lavas denominated Palmas Formation (Rossetti et al., 2018).

In the Serra do Rio do Rastro the evolution of the volcanism can be divided into 3 phases. The first phase is dominated by the earlier stages of the onset of the magmatism, generating the pahoehoe flows from the base of the profile and corresponds to the facies ponded pahoehoe and simple pahoehoe that constitutes unit 1. The second phase forms the main phase and is characterized by the intercalation of both flow morphologies (rubbly and pahoehoe) and the architectures of the facies imply differences of the emplacement and effusion rates during the

evolution of the volcanism of those in the south hinge of the Torres Syncline. The main phase is composed by various units (unit 2, 3, 4, 5, 6, 7 and 8). The third phase presents the acid flows in the upper part of the sequence (unit 9).

On the onset of the volcanism, the first flow occurred in an interdune environment, where lava accumulates in a "gutter" between the dunes forming thick flows that cover the main erg of Botucatu Formation and characterize a ponded facies. The presence of sandy veins nearly of the core and top of the ponded lavas indicates that the desertic sedimentation remained continuous during all this phase of the volcanism. The thickness of the ponded flow (~100 m) suggests that the lava supply was constant. After the covering of the undulating topography of the paleodunas start the eruption of simple pahoehoe flows.

The simple pahoehoe facies association is product of low effusion rates (<5 – 10 m³/s; Rowland & Walker, 1990) with sustained lava supply and a horizontal paleotopography (<5° declivity) that allows the formation of the external crust. The dominant process in these flows is the inflation, caused by the internal pressure of volatiles when a rapid formation of the semi-solid carapace at upper-crust zone isolates the system internally. These flows developed when eruptions are sustained over weeks to years and lava supply is steady (Holcomb, 1987; Kauahikaua et al., 1998).

In the main phase of volcanism, the pahoehoe flows present simple and compound facies association. . The different lithofacies observed can be related to the time of inflation of the flows, which in turn is directly connected with the mode of emplacement and effusion rate.

The distribution of vesicles, crystallinity, and joints are important criteria in the diagnosis of the inflation processes in the simple flows (Self et al., 1998). In the Serra do Rio do Rastro, simple pahoehoe with segregation vesicles forming sub-horizontal layers, show that these flows have an important inflationary process. The contact of the lava with the surface contributes to the rapid cooling in the external portions of the flow and generates a crust that confines the flow, isolating the system internally (Lima et al., 2012). The crust is inflated by the continuous supply of lava and the internal pressure of the volatiles. The gases that move inside the flow tend to rise, but the already crystallized crust does not allow them to leave the system and the vesicle layering observed in the upper portion are formed.

According to Byrnes and Crown (2001), the emplacement of pahoehoe units is affected by local conditions and the state of the lava. These authors argue about the inflation at relatively small scales produces cracks and offsets in sheets and tilted slabs of surface crust in the lobes (Byrnes and Crown, 2001). Primary pahoehoe morphologies include sheets lavas that are indicative of local flow emplacement rate, which is influenced by local topography, rheology, and supply. Sheets tend to form on relatively horizontal surfaces because lateral and forward flow velocities become more equivalent as the underlying slope decreases (Hon et al., 1994).

The compound pahoehoe flows constitute a small proportion of the studied flow fields. These facies associations are divided into numerous unit of flows were emplaced as a complex network of interconnected lobes at low local eruption rates (Duraiswami et al., 2008). The lobes are classified as S-Type characterized by homogeneous distribution of vesicles.

Observations in Iceland shows that compound flows appear to reflect areas of low effusion rates or the interaction of the lava with topographic barriers or wetlands, resulting in chaotic flowage (Óskarsson and Riishuus, 2014). Several authors suggest how compound flows can be formed. Eruptions at low effusion rates, proximal to eruption fissures (possibly 0–5 km) such as near-vent flows (Óskarsson and Riishuus, 2014). It can be also attributed to the distal portion of the volcanic conduit, marking the front of the advancing of the lava (Keszthelyi et al., 2004). In general, the compound pahoehoe lavas scattered in nearly horizontal surfaces and tend to adopt individual lobate shapes.

The basal zones of the rubbly flows are usually smooth, vary in vesicularity and the brecciation is not present. The rubbly pahoehoe flows with simple geometry is predominant in the main phase of the volcanism in the Serra do Rio do Rastro profile. Simple rubbly facies association are initial emplacement as inflated pahoehoe lobes and sheets with the flow-top breccia being formed subsequently in various ways, including fracturing of upper crusts by extensive networks of inflation clefts (Keszthelyi et al. 2004, 2006). The inflation process is related to an increase in the effusion rate and is possible because of the insulating effect of the brecciated upper crusts (Duraiswami et al., 2003). High effusion rate was proposed in numerical models of emplacement of rubbly flows from Laki and indicate that can reach peaks of 10^6 m³/s (Keszthelyi et al., 2006). These high effusion rates provide magma recharge in the flow cores contributing to thick layers. When the pahoehoe flows

form the thick and insulated upper crust, the internal pressure builds up caused by magma recharge in the flows core and breaks the upper crust forming the scoriaceous top. The increase in the thickness of the bubbly pahoehoe flows at the top of the volcanic package in the Serra do Rio do Rastro indicates that an addition to the intercalation of the effusion rates along the volcanism, the higher rates that generated the bubbly flows remained longer in the last phases.

The last phase of the volcanism occurs in the top of the section with the extrusion of the acid volcanism. Previous studies highlight the anomalous high crystallization temperatures of these acidic rocks (about 1000°C; Bellieni et al., 1986; Garland et al., 1995; Simões et al., 2014). This contributes to emplaced of the acidic flows in the top of the profile of the Serra do Rio do Rastro as effusive eruptions. The basal portion of the acidic flows is formed by vitrophyres with a glassy aspect that indicates a rapid cooling of the lava surface. Besser et al., (2018) called pitchstones with oblate amygdales the basal zones of the acidic flows in the São Joaquim Plateau. The upper portion of the acidic rocks in the profile of the Serra do Rio do Rastro is marked by massive granophyres blocks that exhibit sub-horizontal foliations. The sub-horizontal structures reflect varying degrees of undercooling and the granophyre massive texture can be interpreted by devitrification process.

7.2 Petrography and volcanic textures

The mineralogical composition of the all facies association of the basaltic lava flows is mainly: plagioclase, augite, opaque minerals and, minor apatite and olivine. The main petrographic difference between the basaltic flows is the size of the crystals, where flow fields are coarser than bubbly pahoehoe. The diktytaxitic texture is present mostly in the pahoehoe flows and is indicative of a high content of volatiles in these magmas, being comparatively more granular than the bubbly flows. In the bubbly flows, the diktytaxitic texture occur only at the base where occurs the entrapment of gas bubbles.

The textural differences of the morphological final members have already been described by Lima et al (2012) for the flows from Serra Geral in the Torres Syncline, and can be correlated with the emplacement of the lavas. In the pahoehoe flows, the mechanism of endogenous transfer of the heat contributes to inflation and results in

greater and more development crystals, with holocrystalline and intergranular texture. While in the rubbly pahoehoe flows, a rapid cooling of the rubbly lavas that are transported in open channels system cause the aphanitic and hypocrySTALLINE texture. The high crystallinity and plagioclase in the matrix is attributed to undercooling, devolatilization, and higher eruption rate of the rubbly flows.

In the acidic flows, the effusion of silicic magmas poor in crystals requires conditions close to liquidus temperatures and velocities of rising sufficiently fast, so that the excessive crystallization does not occur until the magma reaches the surface. The different facies on the acidic flows characterized by pitchstones with holohyaline texture at the base and granophyres with massive core and tabular structures on the top corroborates with Besser et al (2018).

7.3 Defining formations of Serra Geral Group in Serra do Rio do Rastro profile

Here we correlate the volcanic units, described above with geochemical data from lava flows to try define the formations of Serra Geral Group along the profile. The volcanic sequence in study area differ from sequence described by Rossetti et al., (2018) along Torres Syncline, where the Serra Geral Group was first proposed, by occurrence of HTi magmas and a more complex stratigraphy.

The stratigraphic framework in Serra do Rio do Rastro presents 9 volcanic units divided according to the eruptive style. Some volcanic units are composed of more than one magma-type. In unit 1, for example, the first ponded flow is LTi and the last simple pahoehoe flow is HTi (**Fig. 17**) which represent changes both in the evolution by processes of differentiation and the source that generated these magmas. The first implication is that volcanic units described and formations don't match in the profile.

The repetition of volcanic units along the profile could be grouped in the same Formation with base in physical aspects, petrography and geochemistry. The interdigitation of distinct flows is common in CFBs, where different feeders can erupt different magma-types, like occurs in basal portion of Serra do Rio do Rastro (Fig 17).

To avoid the proliferation of an unpractical number of formations, we grouped the maximum of units to constitute a formation. The characteristics to group the formations were mainly the geochemistry and the main volcanic episodes.

Based on the characteristics of the volcanic units and their geochemical we separate five (5) formations in Serra do Rio do Rastro profile (**Fig. 17**): Torres Formation (TF), Vale do Sol Formation (VDS), Urubici Formation (UF), Ribeira Formation (RF) and Palmas Formation (PF).

Torres Formation (TF) occurs at the lower portion of the profile and the basal boundary is in contact with the Botucatu sandstone. TF are characterized by thick ponded flows placed in the interdune, differently from the southernmost portion, where this formation is characterized mainly by compound flows (Rossetti et al., 2018). The lavas are compositionally basaltic andesites with SiO_2 ranging from 49.88 to 52.72, TiO_2 wt% <1.5 (0.96 – 1.34 wt%) and MgO concentration in general >5wt% (4.9 – 6.11 wt%).

Vale do Sol Formation (VDS) is characterized by the intercalation of simple pahoehoe, rubbly pahoehoe and compound pahoehoe and range almost the entire profile with thickness about 520 m. The lavas are compositionally basalt to basaltic-andesites (50.05 – 54.7 wt% SiO_2), with a portion near the top of the formation that present intermediary rocks (54.62 – 60 wt% SiO_2). The TiO_2 contents range from 0.79 – 1.74 wt%. The concentrations of MgO are usually <5wt%, with the unit 2 at the base of the formation presenting greater concentrations (6.9 – 8.34 wt%). The high concentration of the MgO in the lavas from the basal portion of the VDS formation can be related with the first pulses of a more primitive magma. The Unit 7 in the upper portion of VDS has high SiO_2 content and low MgO and probably is related to fractional crystallization process.

Urubici Formation (UF) occurs in the basal portion of the profile and interdigitated with VDS formation. The first occurrence of the UF is formed by the simple pahoehoe flow with 25 m thickness. The second occurrence is constituted by simple pahoehoe and rubbly pahoehoe. The rocks are compositionally basalt and basaltic andesites with SiO_2 ranging from 47.78 – 52.11 wt%, TiO_2 (3.46 – 3.81 wt%). The MgO concentrations are about 4 wt%.

Ribeira Formation (RF) is also interdigitated with the VDS Formation in the central portion of the profile. This formation is formed by simple pahoehoe flows and

outcrops about 40 m thickness. RF is characterized by lavas of more basic composition with SiO₂ (48.64 – 50 wt%). The TiO₂ ranging from 0.91 to 1.49 wt% and the MgO is > 6% (6.32 – 7.85 wt%).

The Palmas Formation (PF) occurs in the top of the profile and comprises tabular acidic flows. This formation covers the rubbly pahoehoe lavas from VDS Formation but the contact is not observed. The rocks are compositionally dacites (65.9 – 66.56 wt% of SiO₂). The MgO is <1.5 wt% and the TiO₂ content <1 (0.88 – 0.95 wt%).

8. Conclusions and considerations

The characterization of the morphology and structures allowed the identification of the pahoehoe and rubbly pahoehoe types in the volcanic sequence. Rubbly pahoehoe flows slightly predominate along the profile with 50.7% of the total thickness, 41.3% are pahoehoe flows and 8% are acidic flows.

The intercalation of the flows suggests variations in the effusion rate with predominance of higher rates, as the greater amount of rubbly pahoehoe flows. The different facies identified indicate that there was more than one type of emplacement for these flows and changes in paleotopography.

The lava flows are divided into five facies associations: Pondered pahoehoe, simple pahoehoe, compound pahoehoe, rubbly pahoehoe and acidic flows. The facies association analysis suggests that in the Serra do Rio do Rastro profile three (3) eruptive events occurred with directly superposed distinct volcanic episodes that reflects nine (9) volcanic units.

The knowledge about facies architecture contributes to the understanding of the emplacement and evolution of volcanism in time and space. The use of this method coupled with geochemistry data can help the definition of the formations of the Serra Geral Group.

The petrographic textural differences is an important feature because it facilitates the classification of flow types where it is not possible to verify contacts between the flows for the definition of morphological types. However, these differences are more perceived between morphological types and not between the facies.

The geochemistry demonstrate that the rocks are compositionally basic (basalts), intermediate (basaltic-andesitic, basaltic trachy-andesite and andesite) and acid (dacite) showing a high range of silicic content.

The rocks present two groups of the TiO_2 contents: high TiO_2 (HTi, > 2%) and low TiO_2 (LTi, <2%), with a predominance of the latter. The behavior of the larger elements such as TiO_2 and P_2O_5 , the Sr and Zr traces and also the ETR pattern suggest different sources for the HTi and LTi groups.

The basic to intermediate rocks HTi are Urubici types, and the LTi predominates the Gramado type. Unit 5 is Ribeira magma-type. The acid rocks are Palmas type and the Caxias do Sul subgroup.

Five formations are separate Torres Formation (TF), Vale do Sol Formation (VDS), Urubici Formation (UF), Ribeira Formation (RF) and Palmas Formation (PF).

This work shows that besides the geochemical stratigraphy the physical characteristics of the volcanism also differ and alternate along the profile. The intercalation of the different morphologies and flows architecture shows variation in the lava emplacement model, either by the change in paleotopography, effusion rate and/or magma viscosity, as well as geochemistry shows different sources for the rocks that generated distinct magmas compositions. However, these contrasts are not a cause-and-effect relationship. In other words, there is no control of the chemical types in the different flow morphologies. Consequently, there is no relationship between magma-type, flow morphology and effusion rates.

The direct use of lithostratigraphy to separate formations of Serra Geral Group, associated with geochemistry or not, certainly will leave a large name proliferation. We consider that a big list of formations generates more complications than advances to research. Otherwise, we consider the Serra Geral Group proposed by Rossetti et al. (2018) a valid and necessary proposal to improve the knowledge of this huge volcanic succession. However, it is necessary to deepen the geochemical and isotopic data in this region for a better correlation between the formations already suggested by Rossetti (2018) as well as the definition of new formations.

9. Acknowledgments

The authors acknowledge the financial support of the Project 019/2014 sponsored by Petrobras/Repsol. The Federal University of Rio Grande do Sul and Federal University of Santa Catarina are also acknowledged for additional support.

10. References

- Almeida, F.F.M.; Carneiro, C.D.R.; Bartorelli, A. Magmatismo pós- Paleozóico no Brasil. In: Hasui, Y.; Carneiro, C.D.R.; Almeida, F.F.M.; Bartorelli, A. (Org). *Geologia do Brasil*. São Paulo: Beca, p. 430-452, 2012.
- Amaral, G.; Cordani, V.G.; Kawashita, K.; Reynolds, J.H. Potassium-argon ages of alkaline rocks from southern Brasil. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, n. 31. p. 117-142, 1967.
- Barreto, C.J.S., de Lima, E.F., Scherer, C.M., Rossetti, L.D.M.M., 2014. Lithofacies analysis of basic lava flows of the Paraná igneous province in the south hinge of Torres Syncline, Southern Brazil. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 285:81–99. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.08.008>.
- Bellieni, G., Comin-Chiaromonti, P., Marques, L.S., Melfi, A.J., Piccirillo, E.M., Nardy, A.J.R., Roisenberg, A., 1984. High- and low-Ti flood basalts from the Paraná plateau (Brazil): petrogenetic and geochemical aspects bearing on their mantle origin. *Mineralogie (Abh.)* 150, 272–306.
- Bellieni, G., Comin-chiaramonti, P., Marques, L.S., Melfi, A.J., Nardy, A.J.R., Papatrechas, C., Piccirillo, E.M., Roisenberg, A., Stolfa, D., 1986. Petrogenetic aspects of acid and basaltic lavas from the paraná plateau (Brazil): geological, mineralogical and petrochemical relationships. *J. Petrol.* 27:915–944. <http://dx.doi.org/10.1093/petrology/27.4.915>.
- Besser, M. L., Vasconcellos E. M. G., Nardy, A. J. R. 2018. Morphology and stratigraphy of Serra Geral silicic lava flows in the northern segment of the Torres Trough, Paraná Igneous Province. *Braz. J. Geol.* vol.48 no.2 São Paulo Apr./June 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/2317-4889201820180087>.
- Byrnes, J.M., Crown, D.A., 2001, Relationships between pahoehoe surface units, topography, and lava tubes at Mauna Ulu, Kilauea volcano, Hawaii: *Journal of Geophysical Research*, v. 106, p. 2139–2151, doi:10.1029/2000JB900369.
- Boynnton, W.V., 1984, *Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies*, in Henderson, P., ed., *Rare earth element geochemistry*: Amsterdam, Elsevier, v. 63, p. 114.
- Branney, M.J., Kokelaar, P., 2002. Pyroclastic density currents and the sedimentation of ignimbrites. *Geol. Soc. Lond. Mem.* (27), 51–56.
- Bryan, S.E., Ernst, R.E., 2008. Revised definition of Large Igneous Provinces (LIPs). *Earth Sci. Rev.* 86, 175–202.
- Bryan, S.E., Peate, I.U., Peate, D.W., Self, S., Jerram, D.A., Mawby, M.R., Marsh, J.S. (Goonie), Miller, J.A., 2010. The largest volcanic eruptions on Earth. *Earth Sci. Rev.* 102:207–229. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.07.001>.
- Cas, R.A.F., Wright, J.V., 1987. *Volcanic succession, modern and ancient: a geological approach to processes, products and successions*, 1st ed., Chapman & Hall, London, p. 528, (March 31, 1987).
- Cordani, U.G., Vandomos, P., 1967. Basaltic rocks of the Parani basin. In: Bigarella, J.J., Becker, R.D., Pinto, J.D. (Eds.), *Problems in Brazilian Gondwana Geology*, pp. 207–231.
- Cordani, U.G.; Brito neves, B.B.; Fuck, R.A.; Porto, R.; Thomaz filho, A.; Cunha, F.M.B. Estudo Preliminar de Integração do pré-Cambriano com os Eventos Tectônicos das Bacias Sedimentares Brasileiras. *Boletim da PETROBRAS – Exploração de Petróleo*, n. 15, 70 p., 1984.

- Duraiswami, R.A., Dole, G., Bondre, N.R., 2003. Slabby pahoehoe from the western Deccan Volcanic Province: evidence for incipient pahoehoe—aa transitions. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 121, 195–217.
- Duraiswami, R.A., Bondre, N.R., Managave, S., 2008. Morphology of rubbly pāhoehoe (simple) flows from the Deccan Volcanic Province: implications for style of emplacement. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 177, 822–836.
- Duraiswami, R.A., Gadpallu, P., Shaikh, T.N., Cardin, N., 2014. Pahoehoe—a'a transitions in the lava flow fields of the western Deccan Traps, India—implications for emplacement dynamics, flood basalt architecture and volcanic stratigraphy. *J. Asian Earth Sci.* 84, 146–166.
- Fenner, C. N. 1929. The crystallization of basalts. *American Journal of Science*. September 1. Series 5 Vol. 18:225-253;
- Ernst, R.E. 2014. *Large Igneous Provinces*. Cambridge University Press, United Kingdom, 667 p.
- Garland, F., Hawkesworth, C.J., Manto, 1995. Description and Petrogenesis of the Parana Rhyolites Southern Brazil. *J. Petrol.* 36, 1193–1227.
- Goff F (1996) Vesicles cylinders in vapor-differentiated basalt flows. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 71:167-185.
- Gordon JR., M. 1947. Classificação das formações gondwânicas do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. *Notas Preliminares e Estudos, DNPM/DGM, Rio de Janeiro n.38, p.1-20, 1947.*
- Hirose, K., Kushiro, I. Partial melting of dry peridotites at high pressure. Determination of compositions of melts segregated from peridotite using aggregates of diamond. *Earth and Planetary Science Letters*, 114: 447-489, 1993.
- Holcomb, R. T., Eruptive history and long-term behavior of Kilauea Volcano, in *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, vol. 1350, edited by R. W. Decker, T. L. Wright, and P. H. Stauffer, pp. 261–350, 1987.
- Hon, K., Kauahikaua, J., Denlinger, R., Mackay, K., 1994. Emplacement and inflation of pahoehoe sheet flows: observations and measurements of active lava flows on Kilauea volcano, Hawaii. *Geol. Soc. Am. Bull.* 106, 351–370.
- Janoušek, V.; Farrow, C.M.; Erban, V.; Šmíd, J. (2006). Technical note interpretation of whole-rock geochemical data in *Igneous Geochemistry: Introducing Geochemical Data Toolkit (GCDkit)*. *Journal of Petrology*, v. 47, n.6, 1255-1259, 2006.
- Jerram, D., Mountney, N., Holzförster, F., Stollhofen, H., 1999. Internal stratigraphic relationships in the Etendeka group in the Huab Basin, NW Namibia: understanding the onset of flood volcanism. *J. Geodyn.* 28:393–418. [http://dx.doi.org/10.1016/S0264-3707\(99\)00018-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0264-3707(99)00018-6).
- Jerram, D.A., Stollhofen, H., 2002. Lava–sediment interaction in desert settings; are all peperite-like textures the result of magma–water interaction? *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 114:231–249. [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-0273\(01\)00279-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-0273(01)00279-7).
- Jerram, D. a., Widdowson, M., 2005. The anatomy of Continental Flood Basalt Provinces: geological constraints on the processes and products of flood volcanism. *Lithos* 79, 385–405. [Doi:10.1016/j.lithos.2004.09.009](https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.09.009)
- Jolley, D.W. Palaeosurface palynofloras of the Skye lava field and the age of the British Tertiary volcanic province. In: Widdowson, M. (Ed.), *Palaeosurfaces: Recognition, Reconstruction and Palaeoenvironmental Interpretation*, Geological Society. London, vol. 120, p.67– 94, 1997.
- Katz, M.G. and Cashman, K.V. (2003). Hawaiian lava flows in the third dimension: Identification and interpretation of pahoehoe and 'a'a distribution in the KP-1 and SOH-4 cores. *Geochemistry Geophysics Geosystems* 4: doi: 10.1029/2001GC000209. issn: 1525-2027.
- Kauahikaua, J., K. V. Cashman, T. N. Mattox, C. C. Heliker, K. A. Hon, M. T. Mangan, and C. R. Thornber, Observations on basaltic lava streams in tubes from Kilauea volcano, island of Hawaii, *J. Geophys. Res.*, 103, 27,303 – 27,323, 1998.
- Keszthelyi, L., Thordarson, T., Self, S. 2001. Rubbly pahoehoe: implications for flood basalt eruptions and their atmospheric effects. *Eos Transactions American Geophysical Union Journal*, 82: F1407.

- Keszthelyi, L., Thordarson, T., McEwen, A., Haack, H., Guilbaud, M.-N., Self, S., Rossi, M.J., 2004. Icelandic analogs to Martian flood lavas. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 5:1–32. <http://dx.doi.org/10.1029/2004GC000758>.
- Keszthelyi, L., Self, S., Thordarson, T., 2006. Flood lavas on Earth, Io and Mars. *J. Geol. Soc. Lond.* 163:253–264. <http://dx.doi.org/10.1144/0016-764904-503>.
- LE BAS M.J., LE MAITRE R.W. STRECKISEN A., ZANETTIN B. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, v.27, p.745-750, 1986.
- Lima, E.F., Waichel, B.L., Rossetti, L.M.M., Viana, A.R., Scherer, C.M., Bueno, G.V., Dutra, G., 2012. Morphology and petrographic patterns of the pahoehoe and 'a'ā flows of the Serra Geral Formation in the Torres Syncline (Rio Grande do Sul state, Brazil). *Rev. Bras. Geocienc.* 42, 744–753.
- Macdonald, G.A., 1953. Pahoehoe, 'a'ā, and block lava. *Am. J. Sci.* 251, 169–191.
- MAHONEY, J.J., COFFIN, M.F. Large igneous provinces: continental, oceanic, and planetary flood volcanism. *AGU Geophysical Monograph Series*, v.100 p.436, 1997.
- Mantovani, M.S.M., Atalla, L., Civetta, L., De Sousa, M.A., Innocenti, F., Marques, L.S., 1985. Trace element and strontium isotope constraints on the origin and evolution of Paraná continental flood basalts of Santa Catarina State, southern Brazil. *J. Petrol.* 26, 187–209.
- Marques L. S. Piccirillo, E. M., Melfi A. J., Comin-chiaramonti P., Bellieni, G. Distribuição de terras raras e outros elementos traços em basaltos da Bacia do Paraná (Brasil Meridional). *Geochimica Brasiliensis*, 3: 3-50, 1989.
- McPhie, J., Doyle, M., Allen, R., 1993. *Volcanic TEXTURES: A guide to the interpretation of textures in volcanic rocks*, (Tasmania, 191 pp.).
- 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. (Eds.), *The Mesozoic Flood Volcanism of the Paraná Basin: Petrogenetic and Geophysical Aspects*. IAGUSP, pp. 1–13.
- Miall, A.D., 2000. *Principles of Sedimentary Basin Analysis*, 3rd edition. Springer-Verlag Inc., New York, (616 pp.).
- Milani, E.J.; Ramos, V.A. Orogenias Paleozóicas no domínio sul- ocidental do Gondwana e os ciclos de subsidência da Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 28 (4), p. 473-484, 1998.
- Milani, E.J.; Assine, M.L.; Soares, P.C.; Daemon, R. F. A. A sequência ordovício–siluriana da Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da PETROBRÁS*. Rio de Janeiro, v.8, n.2-4, p.257-273, 1995.
- Milani, E.J.; Melo, J. H. G. Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências PETROBRÁS*, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 265-287, 2007.
- Nardy, A., Machado, F., Oliveira, M., 2008. As rochas vulcânicas mesozóicas ácidas da Bacia do Paraná: litoestratigrafia e considerações geoquímico-estratigráficas. *Rev. Bras. Geosci.* 38, 178–195.
- Óskarsson, B.V., Riishuus, M.S., 2014. The mode of emplacement of Neogene flood basalts in eastern Iceland: facies architecture and structure of simple aphyric basalt groups. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 289:170–192. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.11.009>.
- Peate, D.W., Hawkesworth, C.J., Mantovani, M.S.M., 1992. Chemical stratigraphy of the Paraná lavas (South America): classification of magma types and their spatial distribution. *Bull. Volcanol.* 55, 119–139.
- Peate D.W. 1997. The Paraná–Etendeka province. In: Mahoney J.J., Coffin M.F. *Large Igneous Provinces: Continental, Oceanic and Planetary Flood Volcanism* (217-245). Washington, DC: American Geophysical Union.
- Piccirillo, E.M.; Raposo, M.I.B.; Melfi, A.J.; Comin-Chiaramonti, P.; Bellieni, G.; Ordani, U.G.; Kawashita, K. Bimodal fissural volcanic suites from the Paraná basin (Brazil): K-Ar age, Sr-isotopes and geochemistry. *Geochimical Brasiliensis*, v.1, p.53-69, 1987.
- Piccirillo, E. M. & Melfi A. J. 1988. *The Mesozoic flood volcanism of the Paraná Basin - petrogenetic and geophysical aspects*. São Paulo: USP.

- Renne, P.R.; Ernesto M; Pacca, I.G.; Coe, R.S.; Glen, J.M.; Prevôt, M; Perrin, M. The age of Paraná flood volcanism rifting of Gondwanaland and the Jurassic-Cretaceous Boundary. *Science*. V.258, p.975-979, 1992.
- Rocha-Júnior, E. R. V. 2010. Sistemática isotópica de Os - Nd - Pb - Sr e geoquímica de elementos traço litófilos e siderófilos de basaltos da Província Magmática do Paraná. Thesis, Department of Geophysics of the Institute Astronomy, Geophysics and Atmospheric Sciences. University of Sao Paulo. São Paulo, Brazil.
- Rocha-Júnior, E.R.V., Puchtel, I.S., Marques, L.S., Walker, R.J., Machado, F.B., Nardy, A.J.R., Babinski, M., Figueiredo, A.M.G. 2012. Re-Os isotope and highly siderophile element systematics of the Paraná Continental Flood Basalts (Brazil). *Earth and Planetary Science Letters*, 337-338: 164-173.
- Rossetti, L.M.L.M., Lima, E.F.E.F., Waichel, B.L.B.L., Scherer, C.M.C.M., Barreto, C.J.C.J., 2014. Stratigraphical framework of basaltic lavas in Torres syncline main valley, southern Parana-Etendeka Volcanic Province. *J. S. Am. Earth Sci.* 56:409–421. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2014.09.025>.
- Rossetti, L. M., Lima, E. F., Waichel, B. L., Hole M. J., Scherer, C. M., Simões, M. S., 2018. Lithostratigraphy and volcanology of the Serra Geral Group, Paraná-Etendeka Igneous Province in Southern Brazil: Towards a formal stratigraphical framework. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, In Press, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.05.008>.
- Rowland, S.K. & Walker, G.P.L. 1990. Pahoehoe and aa in Havai: volumetric flow rate controls the lava structure. *Bulletin of Volcanology*, 52: 615-628.
- Self, S., Thordarson, T., Keszthelyi, L., 1997. Emplacement of continental flood basalt lava flows. In: Mahoney, J.J., Coffin, M.L. (Eds.), *Large Igneous Provinces: continental, oceanic, and planetary flood volcanism*. AGU, Geophysics Monography. 100, pp. 381–410.
- Simões, M.S.M.S., De Rossetti, L.M.M., Lima, E.F.D.E.F. De, Ribeiro, B.P.B.P., Rossetti, L.D.M.M., Lima, E.F.D.E.F. De, Ribeiro, B.P.B.P., 2014. The role of viscosity in the emplacement of high-temperature acidic flows of Serra Geral formation in Torres Syncline (Rio Grande do Sul State, Brazil). *J. Geol.* 44:669–679. <http://dx.doi.org/10.5327/Z23174889201400040010>.
- Thiede, D. S., Vasconcelos, P. M. 2010. Paraná flood basalts: Rapid extrusion hypothesis confirmed by new ⁴⁰Ar/³⁹Ar results. *Geology*, 38 (8): 747- 750.
- Vail, P.R.; Mitchum, R.M.; Thompson, S. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 3: relative changes of sea level from coastal onlap. In: PAYTON, C.E. (Ed). *Seismic stratigraphy: applications to hydrocarbon exploration*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, p.63-81, 1977.
- Waichel, B.L., de Lima, E.F., Lubachesky, R., Sommer, C.A., 2006. Pahoehoe flows from the central Paraná Continental Flood Basalts. *Bull. Volcanol.* 68:599–610. <http://dx.doi.org/10.1007/s00445-005-0034-5>.
- Waichel, B.L., de Lima, E.F., Viana, A.R., Scherer, C.M., Bueno, G.V., Dutra, G., 2012. Stratigraphy and volcanic facies architecture of the Torres Syncline, Southern Brazil, and its role in understanding the Paraná–Etendeka Continental Flood Basalt Province. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 215–216:74–82. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2011.12.004>.
- Walker, G.P.L., 1971. Compound and simple lava flows and flood basalts. *Bull. Volcanol.* 35, 579–590.
- Walker, R.G., 1984. General introduction: facies, facies sequences and facies models, In: Walker, R.G. (Ed.), *Facies Models*, 2nd edition Geol. Assoc. Canada, St. Johns, pp. 1–9.
- White, I.C. 1908. Relatório final da comissão de estudos das minas de carvão de pedra do Brasil. DNPM, Fac-similar, Rio de Janeiro: Parte I p. 1-300; Parte II, p. 301-617, 1988.
- Zalán, P. V.; Wolff, S.; Astolfi, M. A. M.; Vieira, I. S.; Conceição, J. C. J.; Appi, V. T.; Santos Neto, E. V.; Cerqueira, J. R.; Marques, A. The Paraná Basin, Brazil. In: LEIGHTON, M. W.; KOLATA, D. R.; OLTZ, D. F.; EIDEL, J. J. (Ed.). *Interior cratonic basins*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, p. 681-708, 1990.

CAPÍTULO III

5. Conclusões e considerações finais

- Dois tipos de morfologias de derrames basálticos foram identificados na sequência vulcânica da Serra do Rio do Rastro: *pahoehoe* e *rubbly pahoehoe*.
- Derrames *rubbly pahoehoe* predominam ao longo do perfil com 50,7% do total da pilha, 41,3% são derrames *pahoehoe* e 8% são derrames ácidos.
- A intercalação nos tipos derrames *rubbly* e *pahoehoe* apontam variações na taxa de efusão onde o predomínio de taxas mais elevadas ou forte oscilações nos volumes geraram os derrames *rubbly pahoehoe*.
- Os derrames foram agrupados em cinco associações de fácies: *ponded pahoehoe*, derrames espessos com geometria tabular, *pahoehoe* simples de geometria tabular, *pahoehoe* composto com geometria anastomosada, *rubbly pahoehoe* com geometria tabular e derrames ácidos que também apresentam geometria tabular.
- As associações de fácies mostram que houve 3 eventos eruptivos com episódios vulcânicos distintos sobrepostos que refletem 9 unidades vulcânicas.
- As diferenças texturais entre os tipos de derrames facilita a classificação destes onde não é possível identificar os contatos entre os derrames para definição dos tipos morfológicos, mas essa diferença não é facilmente perceptível entre as diferentes fácies do mesmo tipo morfológico.
- As rochas são composicionalmente básicas (basaltos), intermediárias (basalto andesítico, traque-andesito basalto e andesito) e ácidas, mostrando um alto *range* no conteúdo de sílica.
- Nas asmotras foram identificados dois grupos em relação ao conteúdo de TiO_2 : alto TiO_2 (ATi, >2peso%) e baixo TiO_2 (BTi, <2peso%), com predomínio do grupo BTi.
- As rochas básicas a intermediárias ATi pertencem ao magma-tipo Urubici e as BTi predominam no tipo Gramado. A unidade 5 compreende ao magma-tipo Ribeira e as rochas ácidas são do tipo Palmas, mais especificamente do subgrupo Caxias do Sul.

- Cinco (5) formações do Grupo Serra\Geral foram identificadas no perfil da Serra do Rio do Rastro: Formação Torres (FT), Formação Vale do Sol (FVS), Formação Urubici (FU), Formação Ribeira (FR) e Formação Palmas (FP).

O conjunto de resultados obtidos no presente trabalho indicou variações litogeoquímicas entre as amostras e diferentes tipos morfológicos de derrames ao longo do perfil da Serra do Rio do Rastro. A intercalação das diferentes morfologias mostra variações na colocação das lavas, seja pela mudança na paleotopografia, taxa de efusão e/ou viscosidade das lavas e os contrastes geoquímicos das amostras sugerem diferentes fontes dos magmas (ATi e BTi). Estas diferenças geoquímicas, no entanto, não explicam as morfologias dos derrames e as variações nas taxas de efusão.

A organização litoestratigráfica permitiu separar 5 formações no Grupo Serra Geral da Serra do Rio do Rastro. A elevação da hierarquia de Formação para Grupo Serra Geral proposta por Rossetti et al. (2018) é válida e necessária para melhor compreender os processos evolutivos deste que foi um dos maiores eventos vulcânicos do planeta. Para isso, é necessário aprofundar os dados geoquímicos e isotópicos nesta região para uma melhor correlação entre as formações já descritas e para a definição de novas, caso necessário.

6. Referências

- Amaral, G.; Cordani, V.G.; Kawashita, K.; Reynolds, J.H. 1967. Potassium-argon ages of alkaline rocks from southern Brasil. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, n. 31. p. 117-142.
- Almeida, F.F.M. 1986. Distribuição regional e relações tectônicas do magmatismo pós-paleozóico no Brasil. *Revista Brasileira Geociências*, 16(4): 325-349.
- Aubele JC, Crumpler LS, Elston WE (1988) Vesicle zonation and vertical structure of basalt flows. *J Volcanol Geotherm Res* 35:349-374.
- Anderson, D. L. 1994. The sublithospheric mantle as a source of continental flood basalts: The case against the continental lithosphere and plume head reservoirs. *Earth and Planetary Science Letters*, V.123, p. 269-280.
- Bard, J. P. 1980. *Microtextures of Igneous and Metamorphic Rocks*. Boston, United States of America: D. Reidel Publishing Company, 264 p.
- Barreto, C.J.S., de Lima, E.F., Scherer, C.M., Rossetti, L.D.M.M., 2014. Lithofacies analysis of basic lava flows of the Paraná igneous province in the south hinge of Torres Syncline, Southern Brazil. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 285:81–99. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.08.008>.
- Barreto, C. J. S., Lafon, J. M., Lima, E. F., Sommer, C. A., 2016. Geochemical and Sr–Nd–Pb isotopic insight into the low-Ti basalts from southern Paraná Igneous Province, Brazil: the role of crustal contamination. *International Geology Review* 59(1):1 DOI: 10.1080/00206814.2016.1147988.
- Bellieni, G.; Brotzu, P.; Comin-Chiaramonti, P., Ernesto, M.; Melfi, A.J.; Pacca, I.G.; Piccirilo, E.M.; Stolva, D. 1983. Petrological and Paleomagnetic Data on the Plateau Basalts to Rhyolite sequencies of the Southern Paraná Basin (Brazil). *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 55, p. 355 – 383.
- Bellieni, G., Comin-Chiaramonti, P., Marques, L.S., Melfi, A.J., Piccirillo, E.M., Nardy, A.J.R., Roisenberg, A., 1984. High- and low-Ti flood basalts from the Paraná plateau (Brazil): petrogenetic and geochemical aspects bearing on their mantle origin. *Mineralogie (Abh.)* 150, 272–306.
- Bellieni, G., Comin-chiaramonti, P., Marques, L.S., Melfi, A.J., Nardy, A.J.R., Papatrechas, C., Piccirillo, E.M., Roisenberg, A., Stolfa, D., 1986. Petrogenetic aspects of acid and basaltic lavas from the paraná plateau (Brazil): geological, mineralogical and petrochemical relationships. *J. Petrol.* 27:915–944. <http://dx.doi.org/10.1093/petrology/27.4.915>.
- Branney, M.J., Bonnicksen, B., Andrews, G.D.M., Ellis, B., Barry, T.L., McCurry, M., 2008. “Snake River (SR)-type” volcanism at the Yellowstone hotspot track: distinctive products from unusual, high-temperature silicic super-eruptions. *Bull. Volcanol.* 70:293–314. <http://dx.doi.org/10.1007/s00445-007-0140-7>.
- Bryan, S.E. & Ernst, R.E., 2006. Proposed Revision to Large Igneous Province Classification. <http://www.mantleplumes.org/LIPClass2.html>.
- Bryan, S.E., Ernst, R.E., 2008. Revised definition of Large Igneous Provinces (LIPs). *Earth-Science Rev.* 86, 175–202. doi:10.1016/j.earscirev.2007.08.008.
- Bryan, S.E., Peate, I.U., Peate, D.W., Self, S., Jerram, D.A., Mawby, M.R., Marsh, J.S., Miller, J.A. 2010. The largest volcanic eruptions on Earth. *Earth-Science Reviews*, 102: 207-229.
- Bondre, N.R., Duraiswami, R.A., Dole, G. 2004. Morphology and emplacement of flows from the Deccan Volcanic Province, India. *Bulletin of Volcanology*, 66: 29-45.
- Coffin, M.F., Eldholm, O., 1994. Large igneous provinces: Crustal structure, dimensions, and external consequences. *Rev. Geophys.* 32, 1. doi:10.1029/93RG02508
- Cordani, U.G., Vandoros, P. 1967. Basaltic rocks of the Parani basin. In: Bigarella, J.J., Becker, R.D., Pinto, J.D. (Eds.), *Problems in Brazilian Gondwana Geology*, pp. 207–231.
- Cordani, U.G.; Brito Neves, B.B.; Fuck, R.A.; Porto, R.; Thomaz Filho, A.; Cunha, F.M.B. 1984. Estudo Preliminar de Integração do pré-Cambriano com os Eventos Tectônicos das Bacias Sedimentares Brasileiras. *Boletim da PETROBRAS – Exploração de Petróleo*, n. 15, 70 p.

- Coutinho, J.M.V. (2008). Dyke swarms of the Paraná triple junction, southern Brazil. *Geol. Usp. Série Científica*, 8 (2), 29-52.
- Dorado, A. C. 1989. *Petrografia Basica – Texturas, classification y nomenclatura de rocas*. Madrid, España: Paraninfo, 143 p.
- Duraiswami, R.A., Dole, G., Bondre, N.R., 2003. Slabby pahoehoe from the western Deccan Volcanic Province: evidence for incipient pahoehoe—aa transitions. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 121, 195–217.
- Duraiswami, R.A., Bondre, N.R., Managave, S., 2008. Morphology of rubbly pāhoehoe (simple) flows from the Deccan Volcanic Province: implications for style of emplacement. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 177, 822–836.
- Duraiswami, R.A., Gadpallu, P., Shaikh, T.N., Cardin, N., 2014. Pahoehoe–a'a transitions in the lava flow fields of the western Deccan Traps, India-implications for emplacement dynamics, flood basalt architecture and volcanic stratigraphy. *J. Asian Earth Sci.* 84, 146–166.
- Fink, J. H., and D. D. Pollard. 1983. Structural evidence for dikes beneath silicic domes, Medicine Lake Highland Volcano, California, *Geology*, 11, 458- 461.
- Garfunkel, Z. 2008. Formation of continental flood volcanism – the perspective of setting of melting. *Lithos*, 100: 49–65.
- Garland, F., Hawkesworth, C.J., Manto, 1995. Description and Petrogenesis of the Parana Rhyolites Southern Brazil. *J. Petrol.* 36, 1193–1227.
- Gordon JR., M. 1947. Classificação das formações gondwânicas do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. *Notas Preliminares e Estudos, DNPM/DGM, Rio de Janeiro n.38, p.1-20, 1947.*
- Hon, K., Gansecki, C., Kauahikaua, J. 2003. The transition from 'a'a to pahoehoe crust on flows emplaced during de Pu'u'O'ô-Kû paianaha eruption. United States Geological Survey professional paper. 1676:89-103.
- Janasi, V.D.A., de 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 Chapecótype dacite. *Earth Planet. Sci. Lett.* 302:147–153. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2010.12.005>.
- Jerram, D.A., 2002. Volcanology and facies architecture of flood basalts. In: Menzies, M.A., Baker, J., Ebinger, C.J., Klemperer, S.L. (Eds.), *Volcanic rifted margins* *Geol. Soc. Am. Special Paper.* 362. GSA, Boulder, Colorado, pp. 121–135.
- Jerram DA, Mountney NP, Howell JA, Long D, Stollhofen H (2000) Death of a sand sea: na active aeolian erg systematically buried by the Etendeka flood basalts of NW Namibia. *J Geol Soc London* 157:513-516.
- Jerram, D.A., Stollhofen, H., 2002. Lava–sediment interaction in desert settings; are all peperite-like textures the result of magma–water interaction? *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 114:231–249. [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-0273\(01\)00279-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-0273(01)00279-7).
- Jerram, D. a., Widdowson, M. 2005. The anatomy of Continental Flood Basalt Provinces: geological constraints on the processes and products of flood volcanism. *Lithos* 79, 385–405. Doi:10.1016/j.lithos.2004.09.009
- Jolley, D.W. 1997. Palaeosurface palynofloras of the Skye lava field and the age of the British Tertiary volcanic province. In: Widdowson, M. (Ed.), *Palaeosurfaces: Recognition, Reconstruction and Palaeoenvironmental Interpretation*, Geological Society. London, vol. 120, p.67– 94.
- Keszthelyi, L. & Thordarson, T. 2000. Rubbly pahoehoe: a previously undescribed but widespread lava type transitional between aa and pahoehoe. *Geological Society of America Abstract Programs*, 32: 7.
- Keszthelyi, L., 2002. Classification of the mafic lava flows from ODP Leg 183. In: Frey, F.A., Coffin, M.F., Wallace, P.J., Quilty, P.G. (Eds.), *Proceedings of the Ocean Drilling Program. Scientific Results.* 183, pp. 1–28.
- Lima, E.F., Waichel, B.L., Rossetti, L.M.M., Viana, A.R., Scherer, C.M., Bueno, G.V., Dutra, G., 2012. Morphology and petrographic patterns of the pahoehoe and 'a'ā flows of the Serra Geral Formation in the Torres Syncline (Rio Grande do Sul state, Brazil). *Rev. Bras. Geocienc.* 42, 744–753.

- Loock, S., Vries, B.V.W., Hénot, J.M. 2010. Clinker formation in basaltic and trachybasaltic lava flows. *Bulletin of Volcanology*, 72: 859-870.
- Machado, F.B. 2005. "Geologia e aspectos petrológicos das rochas intrusivas e efusivas mesozóicas de parte da borda leste da Bacia do Paraná no Estado de São Paulo". Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro.
- Mackenzie, W. S.; Guilford, C. 1980. *Atlas of Rock-forming minerals in thin section*. English Language Book Society/Longman. London. 98p.
- Mahoney, J.J., Coffin, M.F. 1997. Large igneous provinces: continental, oceanic, and planetary flood volcanism. *AGU Geophysical Monograph Series*, v.100 p.436.
- Mantovani, M.S.M., Atalla, L., Civetta, L., De Sousa, M.A., Innocenti, F., Marques, L.S., 1985. Trace element and strontium isotope constraints on the origin and evolution of Paraná continental flood basalts of Santa Catarina State, southern Brazil. *J. Petrol.* 26, 187–209.
- Marques, L.S., Figueiredo, A.M.G., Saiki, M., Vasconcellos, M.B.A., 1989. Geoquímica analítica dos elementos terras raras - Aplicação da técnica de análise por ativação neutrônica. In: Formoso, M.L.L.; Nardy, L.V.S. & L.A. Hartmann (Coords.), *Geoquímica dos Elementos Terras Raras no Brasil*. CPRM/DNPM, Sociedade Brasileira de Geoquímica, Rio de Janeiro, pp. 15-20.
- Marques, L.S.; Ernesto, M. 2004. O mgmatismo toleítico da Bacia do Paraná. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C.D.R.; BRITO-NEVES, B.B.B. (Orgs.), *Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo: Beca, p. 245-263.
- Macdonald, G.A., 1953. Pahoehoe, 'a'ā, and block lava. *Am. J. Sci.* 251, 169–191.
- 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. (Eds.), *The Mesozoic Flood Volcanism of the Paraná Basin: Petrogenetic and Geophysical Aspects*. IAGUSP, pp. 1–13.
- Milani, E.J.; Assine, M.L.; Soares, P.C.; Daemon, R. F. A. 1995. A sequência ordovício-siluriana da Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da PETROBRÁS*. Rio de Janeiro, v.8, n.2-4, p.257-273.
- Milani, E.J.; Ramos, V.A. 1988. Orogenias Paleozóicas no domínio sul- ocidental do Gondwana e os ciclos de subsidência da Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 28 (4), p. 473-484.
- Nardy, A.J.R. 1995. *Geologia e petrologia do vulcanismo mesozóico na região central da Bacia do Paraná*. Tese de doutoramento, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Unesp, 316 p.
- Nardy, A., Machado, F., Oliveira, M., 2008. As rochas vulcânicas mesozóicas ácidas da Bacia do Paraná: litoestratigrafia e considerações geoquímico-estratigráficas. *Rev. Bras. Geosci.* 38, 178–195.
- Nunes, J. C. Novos Conceitos em Vulcanologia: Erupções, Produtos e Paisagens Vulcânicas. *Associação Portuguesa de Geólogos*. *Genovas*, nº16. P.5-22. 2002.
- Peate, D.W., Hawkesworth, C.J., Mantovani, M.S.M., 1992. Chemical stratigraphy of the Paraná lavas (South America): classification of magma types and their spatial distribution. *Bull. Volcanol.* 55, 119–139.
- Peate D.W. 1997. The Paraná–Etendeka province. In: Mahoney J.J., Coffin M.F. *Large Igneous Provinces: Continental, Oceanic and Planetary Flood Volcanism (217-245)*. Washington, DC: American Geophysical Union
- Peate, D., Hawkesworth, C., Mantovani, M., Rogers, N.W., Turner, S., 1999. Petrogenesis and stratigraphy of the high-Ti/Y Urubici magma type in the Paraná flood basalt province and implications for the nature of "Dupal"-type mantle in the. *J. Petrol.* 40, 451–473.
- Peterson, D.W.; Tilling, R.I. 1980. Transition of basaltic lava from pahoehoe to aa, Kilauea volcano, Hawaii: field observations and key factors. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 7: 271-293.
- Piccirillo, E.M.; Raposo, M.I.B.; Melfi, A.J.; Comin-Chiaramonti, P.; Bellieni, G.; Ordani, U.G.; Kawashita, K. 1987. Bimodal fissural volcanic suites from the Paraná basin (Brazil): K-Ar age, Sr-isotopes and geochemistry. *Geochimical Brasiliensis*, v.1, p.53-69.

- Piccirillo, E. M. & Melfi A. J. 1988. The Mesozoic flood volcanism of the Paraná Basin - petrogenetic and geophysical aspects. São Paulo: USP.
- Pollo, L. A. 2014. O vulcanismo ácido da Província Magmática Paraná-Etendeka na região de Gramado Xavier, RS: Estratigrafia, estruturas, petrogênese e modelo eruptivo. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo. Instituto de Geociências. São Paulo. 340p.
- Quintas, M.C.L.; Mantovani, M.S.M.; Zalán, P.V. 1997. Contribuição ao Estudo da Evolução Mecânica da Bacia do Paraná. Boletim de Geociências da PETROBRAS, Vol. 11, nos. 1/2, Jan./Dez., Rio de Janeiro, p. 48-73.
- Renne, P.R.; Ernesto M; Pacca, I.G.; Coe, R.S.; Glen, J.M.; Prevót, M; Perrin, M. 1992. The age of Paraná flood volcanism rifting of Gondwanaland and the Jurassic-Cretaceous Boundary. *Science*. V.258, p.975-979.
- Richards, M.A., Duncan, R.A., Courtillot, V.E. 1989. Flood basalts and hot-spot tracks: plume heads and tails. *Science*, 246: 103-107.
- Rossetti, L.M.L.M., Lima, E.F.E.F., Waichel, B.L.B.L., Scherer, C.M.C.M., Barreto, C.J.C.J., 2014. Stratigraphical framework of basaltic lavas in Torres syncline main valley, southern Parana-Etendeka Volcanic Province. *J. S. Am. Earth Sci.* 56:409–421. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2014.09.025>.
- Rossetti, L. M., Lima, E. F., Waichel, B. L., Hole M. J., Scherer, C. M., Simões, M. S., 2018. Lithostratigraphy and volcanology of the Serra Geral Group, Paraná-Etendeka Igneous Province in Southern Brazil: Towards a formal stratigraphical framework. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, v.355; 98-114.
- Rowland, S.K. & Walker, G.P.L. 1990. Pahoehoe and aa in Havai: volumetric flow rate controls the lava structure. *Bulletin of Volcanology*, 52: 615-628.
- Scherer, C.M.S. 2002. Preservation of aeolian genetic units by lava flows in the Lower Cretaceous of the Paraná Basin, southern Brazil. *Sedimentology*, 49: 97–116.
- Self, S., Keszthelyi, L., Thordarson, T., 1998. The importance of pahoehoe. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 26, 81–110.
- Shaw, H. R.; Swanson, D. A. 1970. Eruption and flow rates of flood basalts, in Colimbia River Basalt Symposium. 2nd, Cheney, Washington, 1969. Eastern Washington State College Press, p. 271-299.
- Sheth, H.C. 2007. 'Large Igneous Provinces (LIPs)': Definition, recommended terminology, and a hierarchical classification. *Earth-Sci. Rev.*, 85(3-4): 117-124.
- Single, R.T.; Jerram, D.A. 2004. The 3D facies architecture of flood basalt provinces and their internal heterogeneity: examples from the Palaeogene Skye Lava Field. *Journal of the Geological Society of London*, 161: 911-926.
- Vail, P.R.; Mitchum, R.M.; Thompson, S. 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 3: relative changes of sea level from coastal onlap. In: PAYTON, C.E. (Ed). *Seismic stratigraphy: applications to hydrocarbon exploration*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, p.63-81.
- Waichel, B.L., de Lima, E.F., Lubachesky, R., Sommer, C.A., 2006. Pahoehoe flows from the central Paraná Continental Flood Basalts. *Bull. Volcanol.* 68:599–610. <http://dx.doi.org/10.1007/s00445-005-0034-5>.
- Waichel, B.L., de Lima, E.F., Viana, A.R., Scherer, C.M., Bueno, G.V., Dutra, G., 2012. Stratigraphy and volcanic facies architecture of the Torres Syncline, Southern Brazil, and its role in understanding the Paraná–Etendeka Continental Flood Basalt Province. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 215–216:74–82. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2011.12.004>.
- Walker, G.P.L., 1971. Compound and simple lava flows and flood basalts. *Bull. Volcanol.* 35, 579–590.
- Walker, G.P.L. 1973. Lengths of lava flows. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 274: 107-118.
- Wernick, E. 2003. Rochas Magmáticas – Conceitos fundamentais e classificação modal, química, termodinâmica e tectônica. São Paulo, Brasil: UNESP, 655 p.

- White, I.C. 1908. Relatório final da comissão de estudos das minas de carvão de pedra do Brasil. DNPM, Fac-similar, Rio de Janeiro: Parte I p. 1-300; Parte II, p. 301-617.
- White, R. & McKenzie, D. 1989. Magmatism at rift zones: The generation of volcanic continental margins and flood basalts. *Journal of Geophysical Research*, 94: 7685-7729.
- Zalán, P. V.; Wolff, S.; Astolfi, M. A. M.; Vieira, I. S.; Conceição, J. C. J.; Appi, V. T.; Santos Neto, E. V.; Cerqueira, J. R.; Marques, A. 1990. The Paraná Basin, Brazil. In: LEIGHTON, M. W.; KOLATA, D. R.; OLTZ, D. F.; EIDEL, J. J. (Ed.). *Interior cratonic basins*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, p. 681-708.

ATA Nº 839

A comissão abaixo assinada tendo examinado a Dissertação de Mestrado da aluna **Marciéli Elzira Frozza**, intitulada "**ARCABOUÇO ESTRATIGRÁFICO DAS ROCHAS VULCÂNICAS NA SERRA DO RIO DO RASTRO - SC (GRUPO SERRA GERAL)**", atribuem os seguintes conceitos:

Prof. Dr. Carlos Augusto Sommer (PPGGEO/UFRGS)
CONCEITO: "A" (EXCELENTE)

Profa. Dra. Carla Joana Santos Barreto (UFPE)
CONCEITO: "B" (BOM)

Profa. Dra. Eleonora Maria Gouvea Vasconcellos (UFPR)
CONCEITO: "A" (EXCELENTE)

de de 2019.

Homologação pela Comissão de Pós-Graduação,	
Ata nº	Data:
Conceito Final:	
Rubrica:	

ANEXO I
Título da Dissertação/Tese:
“ARCABOUÇO ESTRATIGRÁFICO DAS ROCHAS VULCÂNICAS NA SERRA DO RIO DO RASTRO – SC (GRUPO SERRA GERAL)”
Área de Concentração: Geoquímica
Autora: Marciéli Elzira Frozza
Orientador: Prof. Dr. Evandro Fernandes de Lima
Examinadora: Profa. Dra. Eleonora Maria Gouvea Vasconcellos
Data: 24/01/2019
Conceito: Excelente
PARECER:
<p>Trabalho compatível com uma Dissertação de Mestrado, com uso de métodos bem aplicados aos objetivos propostos e justificativa relevante. Objetivos claros e bem definidos, que traz uma importante contribuição para o entendimento da evolução das rochas vulcânicas do Grupo Serra Geral na área de estudo.</p> <p>As discussões e conclusões são excelentes, demonstrando a capacidade científica da pós-graduanda.</p> <p>Quanto à forma, o trabalho está bem escrito com poucos erros gramaticais e de digitação. Faltam poucas referências que foram citadas no texto introdutório, que precede o artigo, listadas ao final do parecer.</p> <p>Abaixo seguem algumas correções e sugestões para a elaboração de trabalhos futuros.</p>
<p>Pág. 15: citar localização da Serra do Rio do Rastro: Estado de Santa Catarina, região Sul do Brasil. Para leitores de fora, citar o município de Lauro Muller, não é suficiente para entender qual foi a região estudada.</p>
<p>Justificativa: a ausência de estudos em uma região, nem sempre é uma justificativa, é importante ressaltar em que o estudo dessas rochas irá contribuir para o entendimento da Província.</p>
<p>Pág. 16: Não foram Rossetti et al 2018 que definiram o Grupo Serra Geral. Há trabalhos anteriores que já fizeram a proposta de elevar a Formação ao status de Grupo: trabalhos da CPRM RS, MINEROPAR.</p> <p>Evitar o termo “pacote”. Utilizar termos como sequência, conjunto etc...</p>

Pág. 17: Citar que esta proposta de divisão estratigráfica só foi definida para o Rio Grande do Sul.

Pág. 18: deve usar óxidos maiores e menores, não elementos.

Na Fig. 1 indicar onde é o início e onde é o fim da seção.

Pág. 20: há trabalhos que discutem outros modelos de geração das LIPs, como por exemplo, delaminação do manto. Ver volume especial da Episode, de 2005 sobre o tema.

Pág. 21: Faltou a legenda da Fig. 2. Qual é o significado das cores no mapa.

Pág. 22: são rochas sedimentares, não sedimentos que constituem a Formação Botucatu.

Pág. 23: os derrames estão sobre, não sob o embasamento. Rochas sedimentares da Formação Santa Maria, não sedimentos.

Utiliza os termos: andesito-basaltos, andesi-basaltos – deve homogeneizar.

Pág. 24: primeiro parágrafo está confuso: quem descreveu os basaltos: Nardy 1995 ou Bellieni et al. 1986?

Com relação aos aspectos petrográficos, deveria ter sido dada maior ênfase à descrição das rochas básicas. Detalhou mais as ácidas, porém não cita os trabalhos de Besser et al. 2018 que detalhar as rochas ácidas da região do Platô de São Joaquim.

Pág. 27: faltou falar sobre o trabalho de Thiede e Vasconcelos 2010, com relação às idades do vulcanismo.

Pág. 29: já deveriam ser citados os trabalhos de Self neste item sobre a morfologia dos derrames.

Pág. 34: foram 2 ou 3 etapas de campo?

Pág. 35: LAMIR = Laboratório de Análise de Minerais e Rochas, não é Laboratório de Laminação.

Pág. 36: explicar o que são as rotinas 4A e 4B.

Óxidos maiores e menores, elementos traço e Terras Raras.

ARTIGO

Pág. 39: Abstract: deveria colocar quais são os critérios utilizados para definir as formações.

Pág. 45: Fig. 2 – idem pág. 18.

A legenda que está na Fig. 2a, faz parte da Fig. 2B.

Pág. 46: LAMIR – idem pág. 35

Pág. 47: o que é a routine 4B?

Págs. 48 e 49: indicar unidades utilizadas na Tabela: wt% para os óxidos e µg/g para elementos traço e Terras Raras.

Págs. 50 e 51: embora a Tabela 2 esteja muito bem elaborada, já é uma tabela com interpretações, não apenas descrições, portanto deveria fazer parte das discussões finais do trabalho. Aqui deveriam ser colocados somente os significados das siglas. A Tabela, ao final do trabalho, poderia ser organizada em: base, núcleo e topo dos derrames, como uma seção estratigráfica.

Págs. 53 e 54: figuras 3 e 4: muito didáticas. Excelente proposta.

Pág. 55: descrever melhor o contato com o arenito Botucatu: coesão, granulometria, variações de cor.

Descrever melhor os pegmatitos. Por que foram definidos como pegmatitos?

Pág. 63: faltou a legenda da Fig. 9C.

Pág. 64: indicar onde está o carbonato nas fotos.

Descrever a textura holohialina nos basaltos das fotomicrografias.

Pág. 65: qual é a porcentagem de quartzo na mesóstase? De acordo com as fotos, é muito baixa para ser definida como quartzo-feldspática.

Como foi possível definir que o argilomineral é esmectita? Foi feita análise por difratometria de raios X? há diversos tipos de argilominerais possíveis no preenchimento de cavidades.

Argilominerals = clayminerals.

Pág. 66: a olivina da Fig. 11C parece vidro oxidado, não olivina. Como seria possível a coexistência de olivina e quartzo nessas rochas?

A legenda da Fig. 11B não corresponde com a foto.

Págs. 66 e 67: como foram determinados os argilominerais. Só a cor não é suficiente para separar os diferentes tipos, é necessária análise por difratometria de raios X.

Onde está o quartzo descrito na mesóstase?

Pág. 71: smectita, celadonita?

Novamente a foto que mostra olivina, parece com vidro oxidado = sideromelano.

Pág. 72: citar novamente o significado de SR, PL e SP, para situar melhor o leitor.

Pág. 76: os limites para divisão das rochas ácidas em alto e baixo TiO₂ não são os mesmos que os das rochas básicas (2%), pois usando este limite, todas as rochas ácidas serão sempre baixo TiO₂.

Pág. 77: os diagramas do tipo Fenner (Fig. 18) devem ser confeccionados com a escala do eixo X em ordem decrescente, indicando a diminuição do MgO com relação aos processos evolutivos.

No texto deve descrever melhor o significado das rochas com teores tão elevados de TiO_2 , em uma sequência tipicamente de baixo TiO_2 .

Discutir melhor a correlação entre os diferentes tipos de derrames. Há relação entre o posicionamento da rocha (base, centro, topo) e as variações químicas?

Pág. 86: a correlação entre basaltos de alto e baixo TiO_2 como sendo originados de um mesmo processo, segundo trabalhos de Marque et al. 1989, não é possível. As fontes para geração desses dois tipos de rochas são diferentes, relacionadas a profundidades diferentes do manto.

Normalmente teores acima de 3% estão relacionados às rochas intrusivas rasas, como diques e soleiras ou aos pegmatitos. Na seção da Serra do Rio do Rastro ocorrem vários diques cortando as sequências vulcânicas, que não foram descritos na dissertação. Os teores de ATi, poderiam estar relacionados a rochas intrusivas?

As conclusões a respeito dos critérios utilizados para dividir as formações, deveriam ser colocadas na forma de uma Tabela, indicando os limites usados para os óxidos, as características vulcanológicas e o posicionamento estratigráfico das unidades.

Referências que faltam na dissertação, não no artigo:

Pág. 16: Peate 1992; Peate 1999; Waichel 2006. Provavelmente referem-se aos trabalhos "et al."

Pág. 21: Polo 2010

Pág. 22: Almeida et al. 1986

Pág. 23: Almeida et al. 2012

Pág. 24: Piccirillo et al. 1988

Pág. 29: Keszthelyi 1995

Pág. 34: McPhie et al. 1993; Branney e Kokellar 2002; Caroff et al. 2000

Pág. 36: Janousek et al. 2006

Assinatura:

Data: 24/01/2019



Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno:

ANEXO I
Título da Dissertação/ Tese
“ARCABOUÇO ESTRATIGRÁFICO DAS ROCHAS VULCÂNICAS NA SERRA DO RIO DO RASTRO – SC (GRUPO SERRA GERAL)”
Área de Concentração: Geoquímica
Autora: Marciéli Elzira Frozza
Orientador: Prof. Dr. Evandro Fernandes de Lima
Examinadora: Profa. Dra. Carla Joana Santos Barreto
Data: 15/01/2019
Conceito: BOM
PARECER:
<p>A dissertação intitulada Arcabouço estratigráfico das rochas vulcânicas na serra do rio do rastro – SC (Grupo Serra Geral) da mestrandia Marciéli Frozza apresenta excelentes descrições de campo com o levantamento estratigráfico da sucessão vulcânica da Serra do rio do rastro, corroborados pelos estudos petrográficos e geoquímicos. Essa dissertação traz uma excelente contribuição para o entendimento das relações estratigráficas na serra do rio do rastro de um ponto de vista mais detalhado e alinhado com os conceitos recentes de estratigrafia vulcânica, o que até então era realizado apenas do ponto de vista apenas regional.</p> <p>O capítulo de contexto geológico regional incluído na parte inicial da dissertação está bem redigido e com referências bibliográficas atualizadas. Alguns subitens (morfologia dos derrames subaéreos, lavas ácidas, arquitetura de fácies vulcânicas) deveriam ser deslocados da geologia regional do Grupo Serra Geral para um capítulo adicional de estado da arte que engloba aspectos globais relacionados a províncias basálticas continentais.</p> <p>De modo geral, o corpo do texto representado pelo artigo científico possui muitos dados, embora a apresentação deles não seja muito clara devido o inglês necessitar fortemente de uma revisão por um nativo da língua inglesa.</p> <p>O aspecto que eu considero mais crítico é quanto a organização e divisão dos derrames em litofácies, associação de fácies, unidades e posteriormente em formações. Durante o texto você usa todas essas terminologias e, por vezes ainda utiliza os termos de arquiteturas de fácies e tipos de morfologias. Eu fiquei bastante confusa nessa tentativa de hierarquização, onde não fica claro os critérios utilizados, principalmente se tratando da divisão em unidades. A figura 17 por exemplo representa o resumo do seu artigo, com uma compilação de todas as terminologias utilizadas, no entanto ela se torna extremamente confusa.</p> <p>No tópico de descrição das associações de fácies, a qualidade das</p>

fotografias de campo está excelente, embora a distinção das feições dentro das fotografias devessem ser realizadas com outras cores.

A petrografia é o outro item que merece uma revisão, pois ficou muito extensa. As diferentes morfologias de derrames poderiam ter sido agrupadas e descritas de acordo com a associação de fácies, por exemplo.

A organização da tabela dos dados químicos não é usual. É difícil acompanhar e comparar as amostras. Eu sugiro que você inverta a ordem dos elementos químicos com as amostras. Na descrição dos resultados químicos é difícil acompanhar a leitura porque a simbologia das diferentes morfologias de lavas muda constantemente. Nos resultados geoquímicos todos os aspectos comparativos são tratados de acordo com a divisão em unidades, o que dificulta o entendimento do artigo considerando que grande parte da discussão ocorre baseada em arquitetura de facies, associação de fácies e formações dentro do grupo Serra Geral.

Os dados geoquímicos obtidos durante esse mestrado apontam que na mesma seção estratigráfica ocorrem derrames baixo e alto-Ti. Você deveria destacar na sua discussão e conclusões que esses aspectos serão melhor explorados em estudos futuros utilizando geoquímica isotópica ao invés de enfatizar que os isótopos serão úteis apenas para uma melhor correlação entre as formações do Grupo Serra Geral.

As discussões e conclusões precisam ser melhor organizadas e discutidas. Em alguns pontos, as conclusões parecem ser conclusões de outros artigos da Sinclinal de Torres. Sugiro que vocês enfatizem no final do artigo a importância da sua proposta de dividir os derrames da Serra do Rio do Rastro em formações (Torres, Vale do Sol, Urubici, Ribeira, Palmas) ao invés de apenas corroborar a definição de Grupo Serra Geral proposta por Rossetti et al (2018).

Envio um arquivo em anexo contendo minhas sugestões detalhadas da dissertação que podem auxiliar na correção do artigo científico.

Assinatura:



Data: 15/01/2019

Ciente do Orientador:

Ciente do aluno:

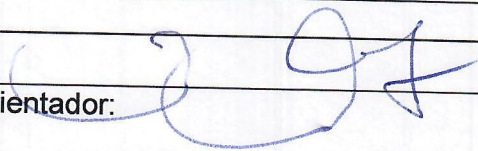
ANEXO I
Título da Dissertação/Tese:
“ARCABOUÇO ESTRATIGRÁFICO DAS ROCHAS VULCÂNICAS NA SERRA DO RIO DO RASTRO – SC (GRUPO SERRA GERAL)”
Área de Concentração: GEOQUÍMICA
Autor: Marciéli Elzira Frozza
Orientador: Prof. Dr. EVANDRO FERNANDES DE LIMA
Examinador: Prof. Dr. CARLOS AUGUSTO SOMMER
Data: 13/12/2018
Conceito: A
PARECER:
<p>A Dissertação de Mestrado da Sra. Marciéli Elzira Frozza, intitulada “ARCABOUÇO ESTRATIGRÁFICO DAS ROCHAS VULCÂNICAS NA SERRA DO RIO DO RASTRO – SC (GRUPO SERRA GERAL)” tem como objetivos principais fornecer novos dados sobre a Grupo Serra Geral ao longo da Serra do Rio do Rastro, SC, enfocando a identificação das morfologias e estruturas dos derrames básicos e ácidos, desde a interface entre estes e a Formação Botucatu. Vários métodos foram utilizados, desde estudos faciológicos, estratigráficos, até geofísicos (gamaespectrometria) e geoquímicos, visando a organização temporal e espacial dos dados, propiciando com isso, a discussão dos aspectos vulcanológicos da área de estudo e a sucessão estratigráfica gerada pelos episódios vulcânicos distintos da área.</p> <p>A dissertação está estruturada na forma de integração de um artigo científico, seguindo as normas do PPGGEO desta Universidade. A obra está muito bem organizada, apresentando uma redação correta o que facilita a leitura e compreensão do texto. Todas as figuras e tabelas são pertinentes e editadas com uma resolução adequada. A disposição e organização dos capítulos permitem ao leitor um aprofundamento gradual e constante sobre o tema trabalho.</p> <p>A Introdução apresenta a temática a ser desenvolvida na dissertação, os objetivos propostos, a organização do trabalho e a localização da área.</p> <p>O capítulo do Estado da Arte apresenta a contextualização teórica sobre as grandes províncias ígnea e o contexto geológico regional e local. Trata-se de uma excelente revisão em diferentes escalas sobre o tema diretamente vinculado ao objeto da dissertação. É baseada em bibliografia recente, permitindo a inserção da área trabalhada dentro de um contexto regional e internacional. Fornece uma base sólida para a leitura e compreensão de toda a dissertação.</p> <p>A primeira parte da dissertação é concluída com a apresentação dos materiais e métodos aplicados durante a execução de projeto de pesquisa.</p> <p>O capítulo II apresenta o artigo científico submetido a revista <i>Journal of South American Earth Sciences</i>, intitulado <i>Stratigraphical Framework of Volcanic Rocks of Serra Geral Group in Serra do Rio do Rastro, Santa Catarina State, Brazil</i>. Este é principal capítulo da dissertação e traz os resultados e as interpretações obtidas na área de trabalho, abordando aspectos estratigráficos, faciológicos e geoquímicos das rochas vulcânicas máficas e félsicas do Grupo Serra Geral no perfil estudado.</p> <p>No último capítulo são apresentadas as considerações finais e as principais conclusões do trabalho, baseadas nas interpretações e resultados discutidos nos capítulos anteriores. Todas as conclusões estão coerentes com os resultados alcançados e inteiramente de acordo com os objetivos e metas propostos.</p> <p>As referências bibliográficas são todas pertinentes, atualizadas e apresentadas com</p>

formatação correta no último capítulo da dissertação.

Em síntese, pode-se constatar através desta Dissertação de Mestrado que a aluna atingiu plenamente todos os objetivos propostos para um mestrado, utilizando diferentes técnicas e métodos na resolução de problemas geológicos relacionados a esta parcela do vulcanismo Serra Geral. Pode ser considerada, portanto, uma excelente contribuição e um avanço científico na compreensão sobre a evolução do magmatismo vinculado a Províncias Basálticas Continentais, particularmente a Província Paraná-Etendeka.

Ante ao exposto, sou de parecer positivo e considero a dissertação em análise plenamente aprovada e parabenizo a aluna, seus orientadores e a instituição pelo bom nível do trabalho.

Assinatura:



Data:

04/12/2018

Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno: