

ESTRATIGRAFIA E CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA POROSO EM ROCHAS VULCÂNICAS DO GRUPO SERRA GERAL, RS

Marcelo Canals Meucci¹; Evandro Fernandes de Lima¹; Lucas de Magalhães May Rossetti²; Natália Gauer Pasqualon^{1,3}; Ingrid Muller Mohr¹; Gabriel Calzia Brose¹.

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul; ²Universidade Federal de Mato Grosso; ³University of Hawai'i at Mānoa.

marcelo.cmeucci@gmail.com

Resumo: A construção da estratigrafia e do empilhamento em sucessões aflorantes auxilia nas correlações com campos produtores do *offshore* brasileiro (e.g. Campos de Badejo e Linguado na Bacia de Campos) onde sucessões vulcânicas são também identificadas. O Grupo Serra Geral (GSG - Província Ígnea Paraná-Etendeka - 135-132 Ma) pode ser correlacionado com a Formação Cabiúnas (134-122 Ma), responsável pela produção de hidrocarbonetos a partir de reservatórios não-convencionais vulcânicos. O GSG é subdividido em quatro formações: (1) Torres (FT) – basaltos do tipo *pahoehoe* tabulares e compostos; (2) Vale do Sol (FVS) – basaltos a andesitos do tipo *rubbly pahoehoe*; (3) Palmas (FP) – derrames ácidos tabulares e condutos de alimentação das lavas; (4) Esmeralda – morfologia similar a FT. A região estudada fica localizada na Serra Gaúcha (São Marcos – Campestre da Serra) em um perfil na BR-116, onde levantaram-se dois perfis colunares, identificadas 5 litofácies e associadas em 3 tipos de derrames: (1) *rubbly pahoehoe* (Bbr, Bv, Bm); (2) Derrames tabulares ácidos (Dah); e (3) Condutos ácidos (Das). As lavas do tipo *rubbly pahoehoe* são características da FVS, sendo identificados no perfil entre 8 a 13 derrames com aproximadamente 30 m de espessura, a porosidade em média fica entre 7 – 12%. Os litotipos ácidos, são relacionados à FP e foram identificados somente na porção superior do perfil, a porosidade é bem baixa, entre <1 – 2%. No geral, a porosidade estimada é baixa, devido a intensos processos de precipitação nos poros. Os padrões de porosidade consistem em vesículas, fraturas e dissolução de minerais primários e secundários.

Palavras-chave: Reservatórios vulcânicos; Sistema poroso; Bacia do Paraná; Fácies vulcânicas; Estratigrafia vulcânica.

1. INTRODUÇÃO

As propriedades petrofísicas de sistemas vulcânicos são de interesse para a indústria de hidrocarbonetos, que buscam entender a capacidade destas sucessões como reservatórios não-convencionais. Recentemente, em paralelo às pesquisas relacionadas a óleo e gás, existe um novo potencial desses litotipos para o armazenamento e captura de CO₂ antropogênico (e.g. CarbFix, Islândia - RAGNHEIDARDOTTIR *et al.*, 2011).

Dentro deste contexto os campos de Badejo e Linguado, inseridos na Bacia de Campos no *offshore* brasileiro, produziram por mais de 30 anos hidrocarbonetos a partir de reservatórios não-convencionais vulcânicos da Formação Cabiúnas. Esta formação é uma intercalação de derrames básicos (*pahoehoe* compostos e *rubbly pahoehoe*) com sedimentos siliciclásticos e rochas vulcanoclástica, como peperitos e tufos (MIZUSAKI *et al.*, 1988, 1992; MARINS *et al.*, 2022). Esse magmatismo está temporalmente associado à Província Ígnea Paraná-Etendeka, de afinidade geoquímica toleítica com baixas concentrações de elementos incompatíveis e TiO₂, e possivelmente correlacionado aos estágios iniciais da fase de rifteamento (MIZUSAKI *et al.*, 1988). Estudos na Formação Cabiúnas abordando arquitetura de fácies e morfologias das lavas são escassos (MIZUSAKI *et al.*, 1988; MARINS *et al.*, 2022; BRAGA *et al.*, 2023), possivelmente pela



V CONEPETRO

V Congresso Nacional de Engenharia de Petróleo,
Gás Natural e Biocombustíveis

dificuldade de aquisição de dados diretos, devido a elevada profundidade desses poços e o alto custo operacional. O estudo de análogos, como o Grupo Serra Geral, permite a partir da aquisição de dados de afloramentos, estabelecer uma metodologia de análise sistemática de litofácies, associações e construção de perfis colunares, onde estudos petrofísicos com um alto controle estratigráfico e litofaciológico podem ser realizados.

O Grupo Serra Geral, pertencente à Província Ígnea Paraná-Etendeka (PIPE), representa um análogo excelente para o estudo de sequências vulcânicas associadas a hidrocarbonetos, como as Formações Cabiúnas e Camboriú (Bacia de Campos e Santos, respectivamente). Essa sequência, inserida na Bacia do Paraná, possui idade do Cretáceo Inferior (135 – 132 Ma) (GOMES; VASCONCELOS, 2021), e é correlacionada ao magmatismo *offshore* de idade 134 – 122 Ma ($^{40}\text{K}/^{39}\text{Ar}$) (FODOR *et al.*, 1983; MIZUSAKI *et al.*, 1992).

O Grupo Serra Geral (Figura 1-A), conforme proposta estratigráfica formal de Rossetti *et al.* (2018) para a porção sul da PIPE (Calha de Torres), é constituído por quatro formações: na base, (1) a Fm. Torres, composta por basaltos do tipo *pahoehoe* compostos e tabulares colocados sobre os depósitos eólicos da atual Fm. Botucatu; (2) a Fm. Vale do Sol, caracterizada por derrames do tipo *rubbly pahoehoe* de composição basáltica a andesítica, que é sucedida pela (3) Fm. Palmas, constituída por derrames tabulares, condutos de alimentação de composição dacítica a riolítica. No topo da sequência aflora a (4) Fm. Esmeralda, cuja morfologia das lavas é similar com a Fm. Torres.

Na Fm. Torres, afloram *pahoehoe* compostas e tabulares, caracterizados por uma base e topo vesiculados e um núcleo maciço (WAICHEL *et al.*, 2012; ROSSETTI *et al.*, 2018). A Fm. Vale do Sol é composta por derrames espessos de *rubbly pahoehoe*, com uma base pouco vesiculada, um núcleo espesso maciço com sua porção superior vesiculada, e brecha do tipo *rubbly* no topo (DURAI SWAMI *et al.*, 2014; ROSSETTI *et al.*, 2018). Por fim, a Fm. Palmas é composta por uma variedade complexa de morfologias, desde lavas tabulares com foliações de fluxo, condutos de alimentação e domos (POLO *et al.*, 2018; ROSSETTI *et al.*, 2018; SIMÕES *et al.*, 2018).

A região estudada fica localizada no nordeste do Rio Grande do Sul na Serra Gaúcha, próxima às cidades de São Marcos e Campestre da Serra (Figura 1-B). Este estudo teve como objetivo principal a construção de perfis colunares ao longo da BR-116, contemplando as Formações Vale do Sol e Palmas, a partir da identificação das litofácies e suas associações. Em conjunto a este estudo, foi realizado a caracterização petrográfica e do tipo de porosidade associado a cada uma das litofácies. Buscou-se discutir aspectos gerais comparativos com as morfologias das rochas vulcânicas da Formação Cabiúnas no *offshore* brasileiro.



V CONEPETRO

V Congresso Nacional de Engenharia de Petróleo,
Gás Natural e Biocombustíveis

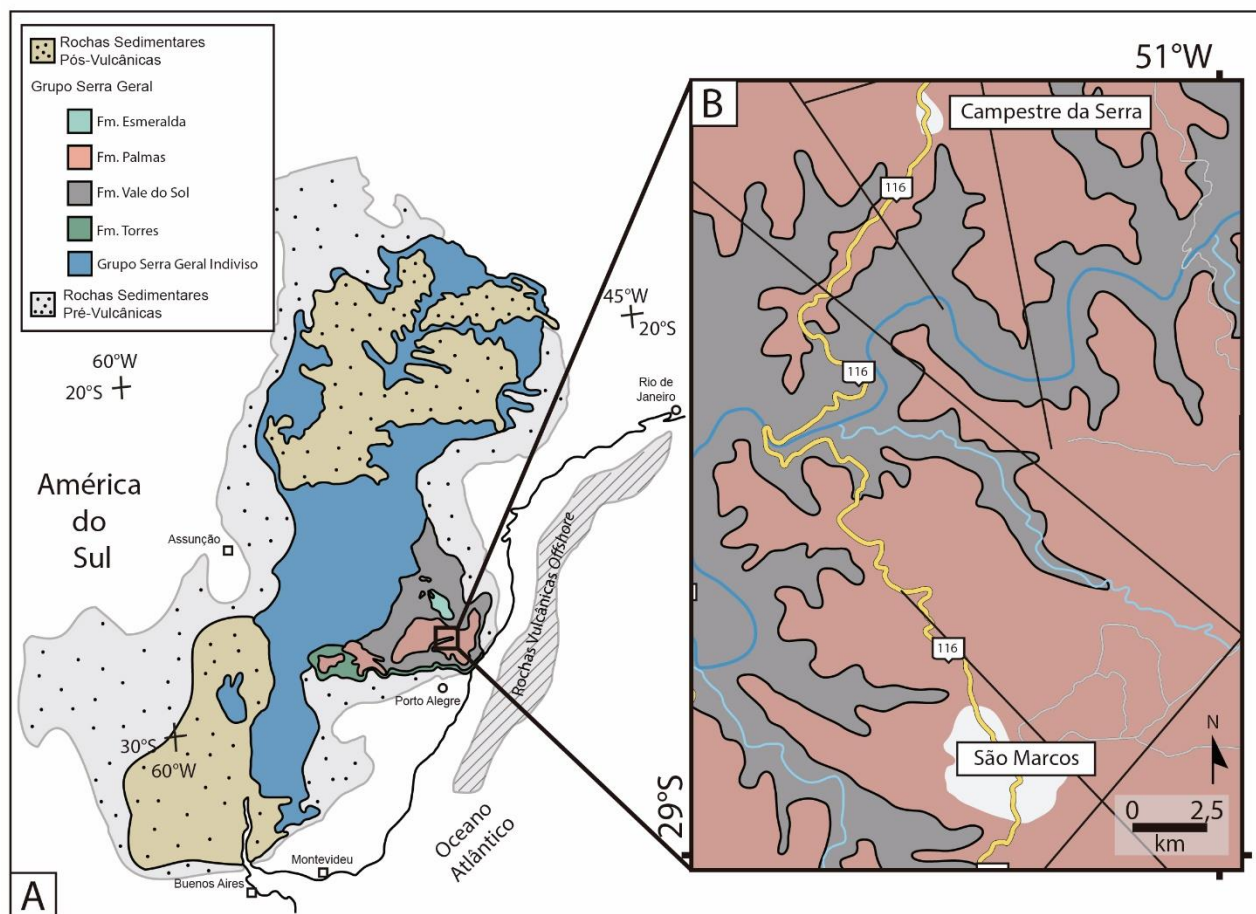


Figura 1 – (A) Grupo Serra Geral e Bacia do Paraná (simplificado) (modificado de Rossetti *et al.* 2018). (B) Mapa geológico da área de estudo no nordeste do Rio Grande do Sul.

2. METODOLOGIA

Foram estudados afloramentos em cortes de estrada ao longo de 15 km da BR-116 no nordeste do Rio Grande do Sul, próximo a cidade de São Marcos e Campestre da Serra (Serra Gaúcha) (Figura 1-B). Nestes pontos, as litofácies foram descritas com base na metodologia de McPhie (1993) que consiste em um código de pelo menos duas letras, na qual a maiúscula corresponde à composição litológica e a minúscula se refere aos aspectos estruturais e/ou texturais (*e.g.* Bm – Basalto maciço). Em seguida, as litofácies foram empilhadas em dois perfis colunares e agrupadas em associações de fácies, correspondendo a morfologias de lavas, como por exemplo, derrames do tipo *pahoehoe* compostos, tabulares e *rubbly pahoehoe* (WAICHEL *et al.*, 2012; DURAI SWAMI *et al.*, 2014; ROSSETTI *et al.*, 2018).

Foram descritas 11 lâminas, com foco na classificação litológica, assim como a descrição de aspectos texturais e estruturais, e caracterização da porosidade. O espaço poroso pode ser caracterizado como (1) primário: quando relacionado à ascensão do magma e o resfriamento em superfície (vesículas, alterações tardi-magmáticas, fraturas de resfriamento); ou (2) secundário: formado em processos posteriores ao resfriamento (como alteração, dissolução e fraturamento tectônico) (PETFORD, 2003; SRUOGA *et al.*, 2004; SRUOGA & RUBINSTEIN, 2007; JIANG *et al.*, 2017; ROSSETTI *et al.*, 2019).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este estudo teve como foco o perfil da BR-116 (Figura 2-A) entre São Marcos e Campestre da Serra, um trecho pouco estudado e com dados de detalhe escassos. Foi possível empilhar verticalmente aproximadamente 350 m (entre as cotas 300 – 650 m de altitude – Figura 2-B), apesar disso, o perfil não apresenta a espessura total das Formações Vale do Sol e Palmas, e também não engloba todas as formações do Grupo Serra Geral (Formação Torres e Esmeralda). Foram descritas cinco litofácies ao longo do perfil, as litofácies foram identificadas e agrupadas em associações a partir dos dados de campo (Figura 2-C). As suas características principais (descritas em escala macroscópica e microscópica) são mostradas na Tabela 1.

Os derrames do tipo *rubbly pahoehoe* consistem na associação das litofácies Bm (representando o núcleo maciço do derrame), Bv (porção superior do núcleo, com um aumento na concentração e tamanho de vesículas/amígdalas) e Bbr (topo brechado do derrame). Esse tipo de derrame foi identificado na maior parte do perfil entre as cotas de 300 m até 630 m, e é característico da Formação Vale do Sol (ROSSETTI *et al.*, 2018). Nesta localidade, foram identificados 8 derrames (perfil São Marcos) e 13 derrames (perfil Campestre da Serra), que apresentam uma espessura entre 25 e 50 m. Foi possível estabelecer uma correlação entre os perfis, o primeiro derrame aflorante de *rubbly pahoehoe* apresenta um arenito entre os fragmentos da brecha. Além disso, na porção superior, é possível delimitar o contato com os dacitos da Formação Palmas.

Petrograficamente, as litofácies básicas são muito similares entre si, apresentam uma textura afanítica com micrólitos de plagioclásio e piroxênio, e raros fenocristais de plagioclásio. A matriz é formada por um material vítreo muito oxidado e alterado para argilominerais e zeólitas. A litofácies maciça (Bm) é caracterizada por uma textura mais cristalina (fanerítica fina) e é rara a presença de vesículas e amígdalas. Na porção vesiculada (Bv), a fácies apresenta as mesmas texturas que a anterior, porém apresentando uma maior quantidade de vesículas e amígdalas, com uma morfologia oval a irregular, milimétricas (0,1 – 1 mm). A litofácies brechada (Bbr) apresenta cor avermelhada característica da oxidação da lava, formada por fragmentos vulcânicos vesiculados a amigdaloides com o preenchimento entre fragmentos que pode ser vulcânico (o próprio derrame) ou de minerais secundários (como zeólitas). Localmente, na porção inferior dos perfis, foi identificada uma porção da brecha preenchida por um arenito/siltito. A porosidade identificada nos derrames do tipo *rubbly pahoehoe* é baixa (0 a 12%) e consiste em vesículas, dissolução de minerais primários/secundários, dissolução da matriz, fraturas, fragmentação de cristais e *drusy*. A porosidade tende a ser maior nas fácies brechadas (7 a 12%) e menor nas fácies maciças (<1 a 2%). Em afloramento, estes derrames apresentam um alto grau de fraturamento com diversas famílias de fraturas, não sendo possível quantificar o espaçamento entre as descontinuidades, porém estas aparentam apresentar valores consideráveis de espaço poroso para reservatórios.

As propriedades petrofísicas do Grupo Serra Geral (GSG) tem sido estudadas nos últimos anos, em especial para as litologias básicas (BECKER *et al.*, 2019; ROSSETTI *et al.*, 2019; MEUCCI, 2022). No geral, o espaço poroso dessas rochas apresenta uma alta complexidade, com uma grande diversidade de tipos de poros e os processos associados com a formação de porosidade primária (vesículas) e secundária (dissolução e fraturas), assim como processos de precipitação de minerais (amígdalas), obstruindo este espaço. As amostras analisadas neste estudo apresentam uma baixa a média porosidade (0-12%), sendo comum para as rochas do GSG devido ao alto índice de mineralogia secundária nos poros. No entanto, em alguns casos, as porosidades podem chegar a valores bem altos, como alguns topos brechados de *rubbly pahoehoe* (28,3%) e *pahoehoe* vesiculados (26,6%) (ROSSETTI *et al.*, 2019).

A Formação Palmas foi identificada na área de estudo nas porções mais elevadas dos perfis, acima de 630 m até 660 m. As litofácies identificadas de composição dacítica estão associadas a derrames laminares (Dah) e aos condutos alimentadores (Das). Petrograficamente, as litofácies

apresentam estrutura de fluxo sub-horizontal (Dah) ou subvertical (Das), marcada pela intercalação de bandas desvitrificadas e bandas com alto conteúdo de óxidos. A textura é porfirítica, com fenocristais de plagioclásio e ortopiroxênio, matriz afanítica desvitrificada com micrólitos de plagioclásio. No geral, apresentam uma baixa porosidade (0 – 2%), raras vesículas e amígdalas, e os poros existentes estão comumente associados à dissolução e fratura de minerais primários.

De forma muito similar às litofácies básicas identificadas no GSG, na Fm. Cabiúnas (Campos de Badejo e Linguado), o petróleo está localizado em fácies vesiculadas, poros de dissolução e fraturas dentro de reservatórios não-convencionais vulcânicos (MIZUSAKI *et al.*, 1988; 1992). As macrofraturas (fraturas que cortam derrames), identificadas em campo neste trabalho, podem ter um papel muito importante para as condições permoporosas e o alto potencial para o reservatório.

Recentemente Marins *et al.* (2022) trabalharam com a caracterização de litofácies e suas associações em furos de sondagem na Fm. Cabiúnas (Bacia de Campos), foram subdivididas em quatro unidades: unidades 1 e 3 caracterizadas por derrames do tipo *pahoehoe* composto; e as unidades 2 e 4 consistem em derrames do tipo *rubbly pahoehoe*. A semelhança nos tipos de derrames, assim como na origem no magmatismo, permite comparar com as Formações Torres (*pahoehoe* simples e compostos) e Vale do Sol (*rubbly pahoehoe*) do Grupo Serra Geral (ROSSETTI *et al.*, 2018). Porém a intercalação entre unidades (*rubbly pahoehoe* e *pahoehoe* simples/compostos) e a presença de peperitos e arenitos *intertraps* não foram identificadas na área de estudo.

Tabela 1 – Características principais das litofácies identificadas

Litofácies	Descrição	Associação	Petrografia	Padrões de porosidade
Das	Dacito afanítico com estrutura subvertical	Sistema de alimentação de derrames ácidos	Porfirítica com matriz afanítica, desvitrificação, fenocristais de plagioclásio e ortopiroxênio.	Vesículas, dissolução e fratura de minerais primários.
Dah	Dacito afanítico com estrutura horizontalizada	Derrame ácido tabular		
Bbr	Basalto brechado	Derrame do tipo <i>rubbly pahoehoe</i>	Afanítica, micrólitos de plagioclásio e piroxênio. Matriz vítrea oxidada.	Vesículas, dissolução (minerais primários, secundários e matriz), fraturas (rocha em geral e plagioclásio), <i>drusy</i> .
Bv	Basalto vesiculado		Afanítica a fanerítica fina, micrólitos de plagioclásio e piroxênio. Raros fenocristais de plagioclásio	Vesículas, dissolução (minerais primários, secundários e matriz), fraturas (rocha em geral e plagioclásio), <i>drusy</i> .
Bm	Basalto maciço			Dissolução (minerais primários, secundários e matriz), fraturas (rocha em geral e plagioclásio).



V CONEPETRO

V Congresso Nacional de Engenharia de Petróleo,
Gás Natural e Biocombustíveis

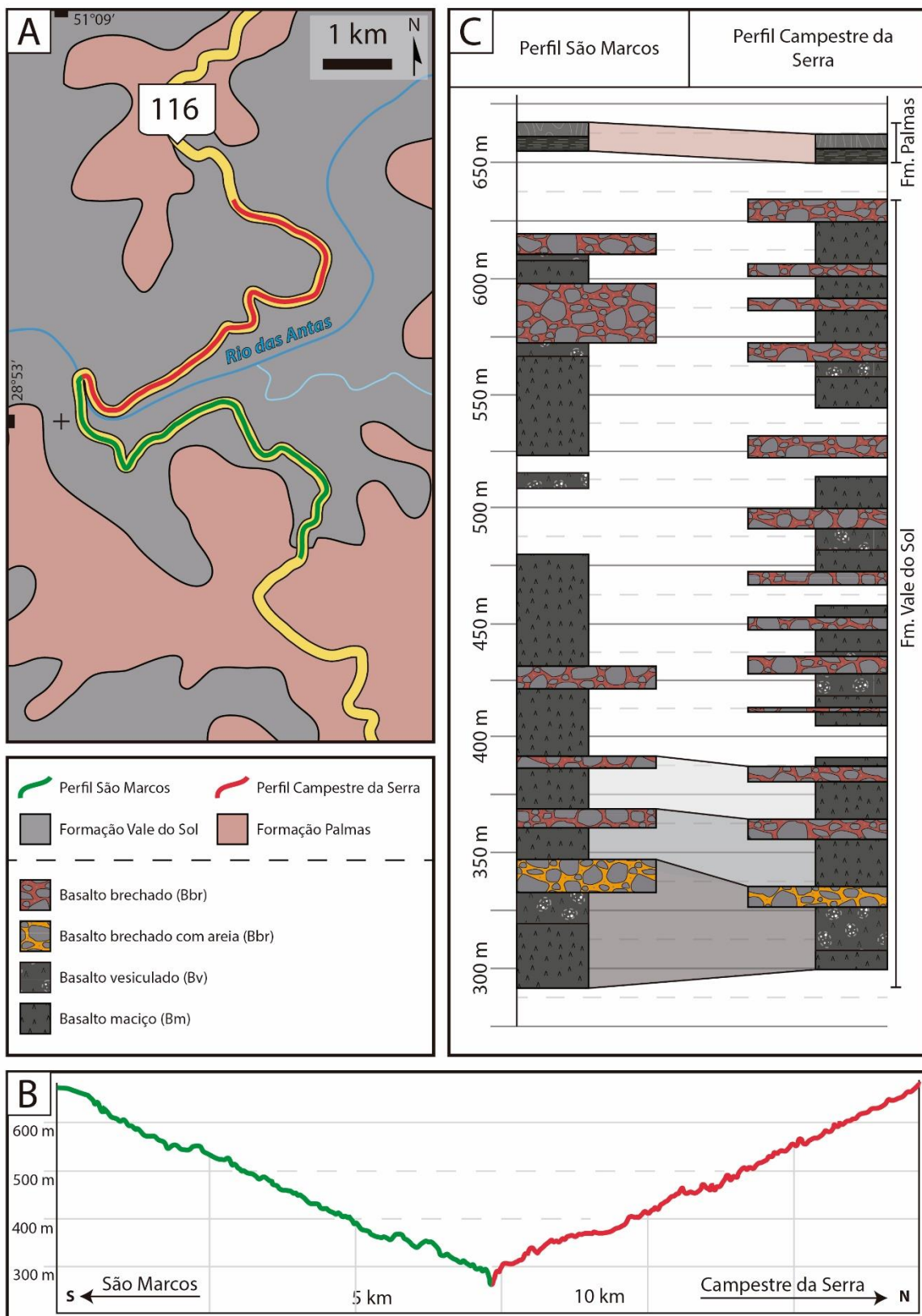


Figura 2 – (A) Mapa de detalhe da região estudada e dos perfis realizados na BR-116 (verde – perfil São Marcos; vermelho – perfil Campestre da Serra); (B) Perfil altimétrico da região estudada; (C) Perfis colunares levantados com os derrames identificados.

4. CONCLUSÕES

No perfil realizado foram identificadas a Formação Vale do Sol (basaltos do tipo *rubbly pahoehoe*) e a Formação Palmas (derrames ácidos tabulares e sistemas alimentadores de lavas), com o contato entre elas estabelecido em aproximadamente 630 m de altitude. Na área de estudo, observou-se 8 a 13 derrames de *rubbly pahoehoe* da FVS, apresentando uma espessura média de 30 m. No geral, as litofácies de brecha nos topos dos derrames apresentam uma porosidade maior (7 - 12%); enquanto que nas fácies maciças a porosidade é muito baixa (<1 - 2%). Essa relação de topo e núcleo em diversos derrames (caso apresentem alta porosidade e permeabilidade), poderia ser uma boa intercalação de reservatório e selo, respectivamente. Além disso, é importante ressaltar o alto grau de fraturamento das rochas em escala de afloramento, algo difícil de quantificar, mas com alto potencial para reservatório.

A análise em escala microscópica da porosidade permitiu uma descrição detalhada dos tipos de poros: vesículas, fraturas, dissolução (minerais primários, secundários e na matriz) e *drusy*. A porosidade primária é baixa devido aos intensos processos secundários de precipitação de minerais.

O Grupo Serra Geral é um importante análogo para o estudo de reservatórios não-convencionais vulcânicos como a Fm. Cabiúnas nos Campos de Badejo e Linguado. A caracterização do sistema permoporoso permite uma melhor interpretação na exploração e prospecção de hidrocarbonetos, assim como no campo de estudo de captura e armazenamento geológico de CO₂.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do Programa PRH-ANP N° 14 - Geologia do Petróleo N° 01.19.0198.00 (Programa de Recursos Humanos da ANP), Petrobras (Termo de Cooperação 2023/00150-4), CNPq (406980/2021-7), FAPERGS (1922510001755-3) e FAPESP (19/22084-8). A Universidade Federal do Rio Grande do Sul é reconhecida pelo apoio adicional.

6. REFERÊNCIAS

BECKER, M. *et al.* Pore System Quantification and Characterization in Volcanic Rocks: a Case Study From the Lower Cretaceous Serra Geral Group, Paraná Basin, Southern Brazil. **Journal of Petroleum Geology**, v. 42, n. 3, p. 301–317, 2019.

BRAGA, D. D. *et al.* 3D Paleogeographic Reconstruction of the Cabiúnas formation lava flows in Campos basin, SE Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 130, 1 out. 2023.

DURAI SWAMI, R. A. *et al.* Pahoehoe-a'a transitions in the lava flow fields of the western Deccan Traps, India-implications for emplacement dynamics, flood basalt architecture and volcanic stratigraphy. **Journal of Asian Earth Sciences**, v. 84, p. 146–166, 15 abr. 2014.

FODOR, R. V.; MCKEE, E. H.; ASMUS, H. E. Letter Section K-At ages and the opening of the south atlantic ocean: basaltic rock from the brazilian margin. **Marine Geology**. [s.l.: s.n.].

GOMES, A. S.; VASCONCELOS, P. M. Geochronology of the Paraná-Etendeka large igneous province. **Earth-Science Reviews**. Elsevier B.V., 1 set. 2021.

JIANG, F. *et al.* Formation mechanism of volcanic reservoirs within a volcanostratigraphic framework: The case of the Wangfu fault depression in the Songliao Basin, China. **Marine and Petroleum Geology**, v. 84, p. 160–178, 1 jun. 2017.

MARINS, G. M. *et al.* Characterization of volcanic reservoirs; insights from the Badejo and Linguado

oil field, Campos Basin, Brazil. **Marine and Petroleum Geology**, v. 146, p. 105950, dez. 2022.

MCPHIE, J.; DOYLE, M.; ALLEN, R. **Volcanic textures: a guide to the interpretation of textures in volcanic rocks**. 1. ed. Centre for Ore Deposit and Exploration Studies. University of Tasmania. 1993. 211 p.

MEUCCI, M. C. **Estratigrafia e padrões de porosidade das rochas vulcânicas da região da Cachoeira da Mulada, Caxias do Sul, RS**. 2022. 110 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MIZUSAKI, A.M.P., THOMAZ FILHO, A., VALENÇA, J. Volcano-sedimentary sequence of neocomian age in Campos basin (Brazil). **Rev. Bras. Geociências** 18, 247–251, 1988

MIZUSAKI, A. *et al.* Contributions to Mineralogy and Petrology Basalt magmatism along the passive continental margin of SE Brazil (Campos basin). **Contrib Mineral Petrol**. 1992.

PETFORD, N. Controls on primary porosity and permeability development in igneous rocks. **Geological Society, London, Special Publications**, v. 214, n. 1, p. 93–107, 7 jan. 2003.

POLO, L.A *et al.* Effusive silicic volcanism in the Paraná Magmatic Province, South Brazil: Evidence for locally-fed lava flows and domes from detailed field work. **J. Volcanol. Geotherm. Res.**, v. 355, p. 204–218, 2018.

RAGNHEIDARDOTTIR, E. *et al.* Opportunities and challenges for CarbFix: An evaluation of capacities and costs for the pilot scale mineralization sequestration project at Hellisheidi, Iceland and beyond. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 5, p. 1065-1072, 2011.

ROSSETTI, L. DE M. M. *et al.* 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, p. 98–114, 2018.

ROSSETTI, L. DE M. M. *et al.* Evaluating petrophysical properties of volcano-sedimentary sequences: A case study in the Paraná-Etendeka Large Igneous Province. **Marine and Petroleum Geology**, v. 102, n. April 2018, p. 638–656, 2019.

SIMÕES M.S., *et al.* Structures and lithofacies of inferred silicic conduits in the Paraná-Etendeka LIP, southernmost Brazil. **J. Volcanol. Geotherm. Res.**, Volume 355, Pages 319-336, 2018.

SRUOGA, P.; RUBINSTEIN, N.; HINTERWIMMER, G. Porosity and permeability in volcanic rocks: A case study on the Serie Tobífera, South Patagonia, Argentina. **J. Volcanol. Geotherm. Res.**, v. 132, n. 1, p. 31–43, 2004.

SRUOGA, P.; RUBINSTEIN, N. Processes controlling porosity and permeability in volcanic reservoirs from the Austral and Neuquén basins, Argentina. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, v. 91, n. 1, p. 115–129, 2007.

WAICHEL, B. L. *et al.* Stratigraphy and volcanic facies architecture of the Torres Syncline, Southern Brazil, and its role in understanding the Paraná-Etendeka Continental Flood Basalt Province. **J. Volcanol. Geotherm. Res.**, v. 215–216, p. 74–82, 2012.