

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

**Seqüência de formação das cavidades no basalto e seu
preenchimento com zeolitas, arenito, ágata e ametista,
Derrame Miolo, São Martinho da Serra, Rio Grande do Sul,
Brasil.**

Cassiana Roberta Lizzoni Michelin

ORIENTADOR – Prof. Dr. Léo Afraneo Hartmann

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Ana Maria Pimentel Mizusaki - Instituto de Geociências,
Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Profa. Dra. Márcia Elisa Boscato Gomes - Instituto de Geociências,
Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Profa. Dra. Flávia Schenato – Universidade Luterana do Brasil

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

Porto Alegre – 2007

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Léo Afraneo Hartmann pelo aprendizado, incentivo e dedicação.

Ao co-orientador Carlos Alberto da Fonseca Pires pelo apoio técnico, financeiro e infra-estrutura de campo.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq – Brasil pela viabilização deste trabalho através de concessão de bolsa de mestrado e financiamento para trabalho de campo e análises químicas.

Ao colega Leonardo Manara Rosenstengel pela aquisição das análises de microsonda eletrônica.

Resumo

Técnicas integradas de investigação geológica foram utilizadas no estudo de vulcanitos da Formação Serra Geral, no distrito mineiro de ágata e ametista de São Martinho da Serra (RS), incluindo a interpretação de fotos aéreas, mapeamento geológico, imageamento e análises químicas de minerais por microsonda eletrônica. As jazidas de ágata e ametista estão relacionadas às fraturas, que são posteriores ao preenchimento das vesículas. A seqüência de formação das cavidades e seus preenchimentos indicam a formação das vesículas por desgaseificação da lava basáltica e seu preenchimento parcial em baixa temperatura por zeolita cálcica (na borda), seguido de celadonita (no núcleo). O evento seguinte foi a fluidização de areia e a intrusão de injetitos ocasionada por sucessivos abalos sísmicos. O fluxo hidrotermal alterou a matriz da areia para ágata e reprecipitou a sílica dissolvida em fraturas e na parte interna de vesículas. As zeolitas e celadonitas foram lixiviadas pelo fluido e totalmente substituídas por ágata. Dessa forma algumas vesículas estão parcialmente ou totalmente preenchidas por zeolita, celadonita, arenito ou ágata. A mineralogia ígnea é constituída de plagioclásio (An_{31-61}), augita e pigeonita, magnetita e ilmenita. Com esta investigação, está demonstrada a origem hidrotermal dos geodos de ágata, em evento mais jovem que o preenchimento de vesículas com zeolitas e celadonita.

Abstract

Integrated techniques of geological inquiry are used in the study of agate formation in volcanic rocks from the Alegrete Formation, Serra Geral Group, in the Sao Martinho da Serra agate and amethyst mining district, state of Rio Grande do Sul, Brazil. The techniques include the interpretation of aerial photos, geologic mapping, back-scattered electron imaging, x-ray diffraction and chemical analyses of minerals with the electron microprobe. The deposits of agate and amethyst are related to fractures in the basalt. The sequence of formation of the cavities and their filling indicates the formation of the vesicles by degassing of the lava flow at high temperature and their low temperature, partial filling with clinoptilolite (in the rims of the vesicles), followed by celadonite (in the core). The following event was the fluidization of sand and its intrusion, triggered by successive earthquakes. The hydrothermal fluid recrystallized the matrix of the sand into agate and caused the reprecipitation of the dissolved silica in fractures and in the internal part of vesicles. In many vesicles, clinoptilolite and celadonite were dissolved and replaced by agate. Some vesicles are partially or totally filled by zeolite, celadonite, sandstone or agate. Igneous mineralogy is constituted of plagioclase (An_{31-61}), augite and pigeonite, magnetite and ilmenite. This investigation demonstrates the hydrothermal origin of agate, precipitated from the fluid after dissolution of quartz grains from the Botucatu sandstone. This process was younger and occurred at lower temperature than the precipitation of mordenite and clinoptilolite at 150 °C.

SUMÁRIO

Agradecimentos.....	2
Resumo.....	3
Abstract.....	4
Sumário.....	5
Texto explicativo.....	6
1 Introdução.....	7
1.1 OBJETIVOS.....	7
1.2 INTRODUÇÃO.....	7
1.3 CONTEXTO GEOLÓGICO.....	7
1.3.1 INTERAÇÃO LAVA-SEDIMENTO.....	10
1.4 METODOLOGIA.....	12
1.5 REFERÊNCIAS.....	14
2 Artigo Científico.....	18
3 Análise Integradora.....	49

Texto explicativo

Esta dissertação de Mestrado, apresentada na forma de artigo científico, está sendo apresentada com a seguinte estruturação:

- 1 Introdução sobre o tema e objetivo da pesquisa, onde estão sintetizados os objetivos e metodologia de pesquisa desenvolvida,
- 2 Artigo submetido a Revista Pesquisas em Geociências (UFRGS), escrito pela autora durante o desenvolvimento de seu mestrado;
- 3 Discussão integradora contendo os principais resultados e interpretações deles derivadas.

1 Introdução

1.1 Objetivos

O objetivo do trabalho é o entendimento da origem da mineralização de ágata no distrito mineiro de São Martinho da Serra, Rio Grande do Sul, com ênfase na seqüência de formação dos minerais hidrotermais.

Este trabalho é a primeira descrição da geologia e da mineralização de ágata e ametista de São Martinho da Serra. O mapeamento geológico é essencial para o entendimento da seqüência de processos mineralizantes, assim como o apoio de técnicas avançadas, inclusive difração de raio-X e análises químicas de minerais por microsonda eletrônica. A observação cuidadosa da seqüência de formação de vesículas e sua transformação em amígdalas mineralizadas são essenciais para a avaliação dos processos mineralizantes.

1 Introdução

A ametista e a ágata são gemas encontradas em diversos tipos de ambientes geológicos. As principais ocorrências de ametista no Brasil, além dos depósitos da Bacia do Paraná, são os pegmatitos em Minas Gerais, Espírito Santo e Bahia, depósitos em veios na região de Jacobina (BA), e Alto Bonito (Serra dos Carajás). Os depósitos de ágata e ametista no Rio Grande do Sul estão hospedados nos derrames vulcânicos da Bacia do Paraná. As jazidas destas gemas estão localizadas principalmente no norte do RS, mas ainda há depósitos de menor expressão na porção central do estado, onde se destacam São Martinho da Serra e no oeste do estado, Santana do Livramento e Quaraí. A principal região produtora de ágata no Rio Grande do Sul é o distrito mineiro Salto do Jacuí (DMSJ), e abrange uma área de aproximadamente 200 km². Na região de São Martinho da Serra não foi realizado nenhum detalhamento geológico a respeito dos depósitos de ágata e ametista.

1.2 Contexto geológico

O evento magmático responsável pela formação da Província Magmática Paraná-Etendeka tem idade aproximada de 138-127 Ma, cobrindo cerca de 1.200.000 k

m², foi formado durante a abertura do Oceano Atlântico no Cretáceo Inferior. O Grupo Serra Geral faz parte desta Província e é formada por uma sucessão de rochas vulcânicas com espessura máxima aproximada de 1.500m, onde predominam basaltos toleíticos, associados a riolitos e riodacitos além de rochas intrusivas. Os derrames da Bacia do Paraná estão sobrepostos de forma discordante aos arenitos eólicos continentais da Formação Botucatu (ambiente desértico-paleodunas). Localmente é possível observar que as lavas estão em contato com a Formação Rosário do Sul, Grupo Passa Dois e nas bordas, com o embasamento cristalino.

Os intertrapes de arenitos da Fm. Botucatu separam derrames vulcânicos petrograficamente e geoquimicamente distintos indicando a continuidade local de condições desérticas após o início da atividade vulcânica. Scherer, 2002 discorre sobre a preservação das estruturas presentes nos depósitos desérticos e infere que o fluxo de lava cobriu dunas eólicas ativas, protegendo assim, os depósitos da erosão. Scherer, 2002 conclui que o vulcanismo associado com uma subsidência flexural causada pelo peso dos derrames permitiu a preservação do pacote sedimentar. No diagrama de paleocorrentes proposto pelo autor a direção de mergulho das paleodunas simples e compostas do Rio Grande do Sul é NE, o que influencia na orientação do depósito.

Os basaltos toleíticos compreendem cerca de 90% das litologias existentes no Grupo Serra Geral, seguido de aproximadamente 7% do volume total de andesitos - toleíticos e 3% de riodacitos - riolitos, segundo Piccirillo e Melfi, (1988). As rochas básicas apresentam características muito semelhantes e estão localizadas quase sempre nas porções inferiores dos derrames, dentre suas variedades, Melfi, (1988) identificou: basaltos toleíticos, basaltos andesíticos, andesitos, latiandesitos, latitos.

Este mesmo autor propõe uma divisão da bacia do Paraná em termos petrológicos em três regiões separadas por lineamentos tectônicos denominadas respectivamente de **Bacia do Paraná Central (BPC)**, **Bacia do Paraná Norte (BPN)** e **Bacia do Paraná Sul (BPS)**.

Em termos geoquímicos o Grupo Serra Geral foi subdividida por vários autores Ruegg, (1975); Bellieni *et al.*, (1984); Piccirillo *et al.*, (1987) e (1988) em 2 tipos com teores diferenciados de TiO₂: 1 - **basaltos alto TiO₂**: basaltos toleíticos com teores de TiO₂ maior ou igual a 2% em peso, 2 - **basaltos baixo TiO₂**: teores de TiO₂ inferiores ou iguais a 2% em peso.

Peate *et al.* (1992) com base nos elementos comumente determinados pelo método de difração de raios X, tais como Ti, Zr e Y que são geralmente imóveis

durante alteração hidrotermal e processos intempéricos e razões de elementos incompatíveis, divide os basaltos do Grupo Serra Geral em seis tipos químicos principais: alto TiO₂ (Urubici, Pitanga e Paranapanema) e baixo TiO₂ (Ribeira, Esmeralda e Gramado). As rochas ácidas são divididas pelo mesmo autor em dois grupos: **Palmas** e **Chapecó**.

No que se refere à geocronologia, Roisenberg, (1989) afirma que o vulcanismo teria sido ativo durante um período de aproximadamente 20Ma, entre 110 e 145Ma. Turner, *et al.*, (1994) e Mantovani *et al.*, (1995) aplicaram o método Ar-Ar e concluíram que a duração da atividade magmática foi no período de 137 a 127Ma.

Datações do tipo Ar⁴⁰/Ar³⁹ realizadas por Renne *et al.*, 1992 e Turner *et al.*, 1994 em vulcanitos da bacia, apontam idades aproximadas de 132Ma. A idade do início da sedimentação da Formação Botucatu é inferida através da identificação de icnofósseis vertebrados por Bonaparte, (1996) e remetem a uma idade aproximada entre Jurássico superior e Cretáceo inferior.

No que se refere à mineralização a ametista, Gomes *et al.*, 1996 define 12 derrames na seqüência estudada na região do Alto Uruguai e classifica-as em tipos químicos Alto Ti e Baixo Ti, enquadrada na classificação de Peate (1989). Estruturalmente, os derrames se diferenciam em dois grupos, de acordo com a presença de geodos e estilo da fraturamento Gomes (1996). Os derrames do tipo I se caracterizam pela presença de um nível contendo geodos com mineralização de ametista e calcita em três derrames e ametista, calcita, selenita em um derrame. Os derrames do tipo II não apresentam geodos e são intensamente fraturados em padrões colunados e entablamentos. O nível portador de geodos situa-se no topo do nível maciço, acima do qual há uma camada de basalto livre de vesículas e fraturado, que o separa do nível vesicular superior.

A denominação de Depósitos de Ágata do Tipo Salto do Jacuí para os depósitos basálticos – dacíticos do Salto do Jacuí foi dada por Heemann, 1997 que caracterizou através de parâmetros litológicos, estruturais e estratigráficos três associações de derrame que compreendem basaltos a dacitos. A primeira associação regional é caracterizada por derrames basálticos com textura intergranular que ocorre entre o topo da Fm. Botucatu e a base do intertrape de arenito da mesma Formação. A segunda associação regional é caracterizada pela intercalação de derrames ácidos e básicos com textura glomeropórfira e por fim, a terceira associação regional é composta por derrames dacíticos com textura holocristalina. Os depósitos de ágata ocorrem no

Derrame Jacuí, que é um derrame basáltico de afinidade toleítica composto por matriz vítrea hipohialina e por glomeropórfiros de plagioclásio, clinopiroxênio e minerais opacos, com textura vesículo-amigdaloidal. A ocorrência mais marcante na descrição de Heemann no Salto do Jacuí e que de alguma maneira se assemelha aos depósitos de São Martinho da Serra é a associação dos geodos aos diques arenítico e/ou material vítreo de cor castanho, com estruturas do tipo enclave de cor preta e de forma elíptica do nível dacítico semi vítreo, que ocorrem assimilados pelo nível portador, o que permitirá a extensão dos trabalhos de investigação comparativa sobre a gênese dessas ocorrências minerais.

A caracterização geológica e gemológica das ágatas de Santana do Livramento, foi feita por Acauan (2004) onde conclui que as gemas desse depósito têm como rocha hospedeira o basalto e o basalto-andesítico, que apresentam fraturamento horizontal e vertical, texturas ofítica a subofítica e são compostos por plagioclásio, piroxênio e minerais opacos. A principal diferença dos depósitos de Salto do Jacuí reside no fato de os geodos estarem preenchidos por ágata e quartzo incolor. Depósitos coluvionares também são encontrados na área.

1.2 Interação Lava-Sedimento

As feições de interação lava sedimento podem ser formadas em diversos ambientes onde a sedimentação e o vulcanismo estão associados, como em ambientes lacustres, marinhos e deltáicos. Na literatura vários autores já descreveram este processo, em especial injetitos de areia. Entre eles, destacam-se: Whitham *et al.* 2004, Jonk *et al.* 2005b, Waterston 1950, Jonk *et al.* 2003, Richter 1966. A abordagem sobre interação lava - sedimento em ambiente desértico ainda é pouco difundida, na Bacia do Paraná, Petry *et al.* 2007 descrevem as feições lava-sedimento no Grupo Serra Geral encontradas na região de Torres, RS. Os autores descrevem mecanismos de formação e a sua interação, como por exemplo: estriações de fluxo, diques clásticos e brechas peperíticas e sugerem que a injeção de diques é associada com a formação de peperitos quando a areia é injetada no interior do fluxo. Waichel *et al.* 2007 descrevem as interações lava-sedimento na porção central da província Basáltica Continental do Paraná e constata a ocorrência de peperitos fluidais e afirma que a gênese destes peperitos está relacionada a interação de derrames e sedimentos úmidos, predominantemente silte e argila., depositados em ambiente lacustre.

A importância da interação lava-sedimento no estudo do ambiente deposicional pretérito ao evento vulcânico e as características reológicas do magma que interagiu com os sedimentos são relatadas por Jerram e Stollhofen (2002). Os autores descrevem a formação de diques clásticos no Etendeka pela migração de areia em fraturas, atribuindo a esta feição causas tectônicas. Porter, 1987 trabalhou com os depósitos de arenito jurássico de Aztec, localizado ao sul da Califórnia, onde areias eólicas formam pods e lentes intercamadas com rochas vulcânicas, vulcanoclásticas, aluviais e depósitos de sabka.

Processos de fluidização, liquefação, degazeificação, compactação, vesiculação, alteração e fusão ocorrem durante a interação lava sedimento, que é o caso descrito por Skilling, 2002 onde o autor destaca a importância dos peperitos para o entendimento da interação magma-água e eventos hidrovulcânicos explosivos. Evidências de que posicionamento de diques, para a intrusão, é causado pelo movimento ao longo do plano de falha e a penetração de areia por alta pressão de fluidos são descritos por Martill e Hudson, 1989 em seus estudos na intrusão de Dogsthorpe os autores discorrem sobre a injeção de diques e a relação na compactação e formação de concreções.

As condições favoráveis para formação de argilominerais e zeolitas em seqüências vulcânicas são a atuação de eventos hidrotermais e metamorfismo de baixo grau. A formação de vesículas é a resposta da degazeificação do magma ainda durante o resfriamento e conseqüente preenchimento das cavidades está relacionada aos fluidos hidrotermais.

A hipótese de formação dos geodos portadores de ágata e ametista foi abordado por vários autores como no trabalho de Bossi e Caggiano (1974) que apontam a incorporação e de arenitos pela lava basáltica e conseqüente formação dos geodos silíceos. Strieder e Heemann (2006) atribuem à gênese dos geodos a fusão dos arenitos eólicos da Formação Botucatu, demonstrando como evidências xenólitos de basalto e arenito nas lavas vesiculares basálticas, diques de arenito que cortam os basaltos e a conexão dos arenitos com os geodos. A afirmação dos autores para explicar a não mistura da areia com o basalto é o alto contraste de densidade entre o basalto vesicular e o arenito, onde o papel dos voláteis é de grande importância para a fusão dos arenitos.

A formação e preenchimento das vesículas e a relação com os processos atuantes durante o resfriamento de um derrame basáltico da Formação Serra Geral são itens de interesse destacados na obra de Schenato *et al.* 2003, onde os autores inferem

que a albitização do plagioclásio, associada com a cristalização de zeolitas e a mudança na composição de argilominerais são atribuídas a interação água/basalto, durante o baixo grau metamórfico sofrido pelo pacote vulcânico.

A preservação das estruturas presentes nos depósitos desérticos da Formação Botucatu é analisada por Scherer, 2002 que discorre sobre que o fluxo de lava que cobriu dunas eólicas ativas, protegendo assim, os depósitos da erosão e conclui que o vulcanismo associado com uma subsidência flexural causada pelo peso dos derrames permitiu a preservação do pacote sedimentar.

1.3 Metodologia

Para a determinação dos objetivos deste estudo e reconhecimento da área foi realizado um trabalho de campo com duração de dois dias. Posteriormente, foram traçados quatro perfis perpendiculares aos derrames com o propósito de coletar amostras dos basaltos em diferentes cotas altimétricas para confecção de lâminas delgadas, análise química em rocha total, análise dos minerais por microsonda eletrônica e difração de raio x.. O trabalho de campo de detalhe permitiu a delimitação das seqüências vulcânicas, através do reconhecimento em campo das litologias, estruturas e texturas, além da completa caracterização do derrame portador dos geodos de ágata e ametista.

Em análise na lupa binocular, foram selecionadas 2 amostras de basaltos, 3 de basalto andesítico e 5 de riolitos totalizando 10 amostras para a confecção de lâminas delgadas. Estas seções delgadas representam a litologia de cada derrame, com suas variações. Na descrição em microscópio petrográfico, observou-se a textura e estrutura da rocha com a completa descrição dos minerais principais secundários e acessórios, além daqueles de alteração, quando presentes. Para melhor organização e estruturação na interpretação da gênese da rocha, foram feitos croquis esquemáticos e fotografias das principais estruturas.

Foram previamente selecionadas através da análise em microscópio petrográfico 14 amostras para serem estudadas em termos de elementos maiores (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , TiO_2 e P_2O_5) e traços (Ba, Sr, Y, Zr, Be, V, Ag, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, Bi, S, Au, As, Br, Co, Cr, Cs, Hf, Hg, Ir, Mo, Rb, Sb, Sc, Se, Ta, Th, U e W) no *Acme Brazil Laboratório*, Goiás, pelos métodos de Fluorescência de Raio-X e ICP-MS. Os dados de química mineral e química de rocha total foram tratados

através dos *software* Minpet 2.02 e EXCEL. Foram analisadas 10 lâminas em microsonda eletrônica. A análise objetivou a classificação dos minerais constituintes das rochas presentes nos basaltos, facilitando assim a sua interpretação petrogenética. Estas análises mineralógicas quantitativas foram realizadas na Alemanha (Institut für Kristallchemie und Mineralogie Stuttgart Universität) com o apoio de Leonardo Manara. Os dados foram processados no *software* Calcmin, a fim de confeccionar diagramas que possibilitassem a classificação das diferentes fases minerais presentes nas amostras estudadas. A microsonda eletrônica permite a identificação e dosagem dos elementos químicos com número atômico superior a 4, ou seja, a partir do boro, possibilitando efetuar análises químicas qualitativas e microscopia eletrônica de varredura o que permite a obtenção de cartas de raios X da distribuição dos elementos, além de imagens de elétrons secundários e imagens de elétrons retroespalhados.

A emissão de imagens de elétrons retroespalhados (BSE) é o resultado dos eventos elásticos entre elétrons preliminares e outros elétrons dentro do espécime que estão sendo analisados. A intensidade da emissão de BSE é uma função do número atômico do espécime; isto é, quanto mais elevado o número atômico maior o brilho e a intensidade da imagem.

A técnica utilizada para a identificação da paragênese mineral que preenche as cavidades tardi-magmáticas é a difração de raio x. Esta técnica é a mais precisa para a identificação das fases minerais, pois os átomos se ordenam em planos cristalinos separados entre si por distâncias da mesma ordem de grandeza dos comprimentos de onda dos raios x. A difração de raio x ocorre segundo a Lei de Bragg, a qual estabelece a relação entre o ângulo de difração e a distância entre os planos que a originaram, que é característico de cada fase cristalina.

Os minerais secundários que preenchem as vesículas foram identificados através da sua estrutura cristalina utilizando a técnica de difração de raio x. Para a realização das análises naturais foram selecionadas diferentes vesículas com mineralogia distinta, e diferentes frações. A identificação foi realizada com um difratômetro Siemens D5000 do Laboratório de Difratometria de Raio X do Centro de Estudos de Petrologia e Geoquímica (CPGq) do Instituto de Geologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. A radiação utilizada foi $K\alpha$ Cu, nas condições 40Kv e 30mA, corrente de filamento e intervalo 2 θ .

Referências

- Acauan, R. B. Caracterização Geológica e Gemológica das Ágatas e Ametistas de Santana do Livramento, Sudoeste do Rio Grande do Sul. Monografia (Graduação) – Instituto de Geociências, Curso de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- Bellieni, G.; Comin-Chiaramonti, P.; Marques, L.S.; Melfi, A.J.; Nardy, A.J.R.; C.; Piccirillo, E.M.; Roisenberg, A. 1984 High and low-TiO₂ flood basalts from the Parana Plateau (Brazil): petrology and geochemical aspects bearing on their mantle origin. **N.J. Mineral. ;Abhl.150**: 273-306.
- 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 thr Paraná Plateau (Brazil): mineralogical nad petrochemical relationships. **Journal of Petrology 27**: 915-944.
- Bonaparte, J. F. 1996. Late Jurassic vertebrate communities of eastern and western Gondwana. **Geores. Forum 1**, 427-432.
- Bossi, J.& Caggiano, W. 1974. Contribución a la geologia de los yacimientos de amatista del Departamento de artigas (Uruguay). In: Congresso Brasileiro de Geologia, 28, 1974, Porto Alegre, RS. **Anais...** Porto Alegre, SBG, v.3, P. 301-318.
- Gomes, M. E. B. **Mecanismos de resfriamento, estruturação e processos pós-magmáticos em basaltos da Bacia do Paraná – região de Frederico Westphalen (RS) Brasil.** 1996. 264f Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Curso de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.
- Heemann, Roberto. 1997. 107f. **Geologia, controles e guias prospectivos para depósitos de ágata na região do Salto do Jacuí.** Dissertação (Mestrado em engenharia), Programa de Pós - Graduação em engenharia de Minas, Metalurgia e dos Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.
- Jerram D. A., Stollhofen H. 2002.Lava-sediment interaction in desert settings; are all peperite-like textures the result pf magma – water interaction? **Journal of Volcanology and Geothermal Research 114**: 231-249.
- Jonk, R., Parnell, J., Hurst, A. 2005. Aqueous and petroleum fluid flow associated with sand injectites. **Basin Research 17**: 241-255.

- Mantovani, M. S. M.; Stewart, K.; Turner, S.; Hawkesworth, A. J. Duration of Paraná magmatism and implications for the evolution and sources regions of continental flood basalts. Proceedings of the Symposium on the Physics and the Chemistry of the upper mantle, São Paulo. **Anais da Academia Brasileira de Ciências** **67**, supl. 2, p. 163-170.
- MINPET: Mineralogical and Petrological analysis software, versão 2.02 (1997).
- Melfi, A.J.; Piccirillo, E.M.; Nardy, A.J.R. 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**. São Paulo: IAG-USP. 1-13.
- Peate, D.W; Hawkesworth, C.J.; Mantovani, M.S.M. 1992. Chemical stratigraphy of the Paraná lavas (South America): classification of magma types and their spatial distribution. **Bulletin of Volcanology**, **55**:119-139,
- Petry, C.; Jerram, D.A.; Almeida, D.P.M.; Zerfass, H. 2007. Volcanic-sedimentary features in the Serra Geral Fm., Paraná Basin, Southern Brazil: Examples of dynamic lava-sediment interactions in an arid setting. **Journal of Volcanology and Geothermal Research** **159**: 313-325.
- Piccirillo, E.M.; Raposo, M.I.B.; Melfi, A.J.; Comin-Chiaramonti, P.; Bellieni, G.; Cordani, U.G. And Kawashita, K. 1987. Bimodal fissural volcanic suites from the Paraná basin (Brazil): K-Ar age, Sr-isotopes and geochemistry. **Rev. Geochemical Bras** **1**, 53-69.
- Piccirillo, E.M.; Melfi, A.J.; Comin-Chiaramonti, P.; Bellieni, G.; Ernesto, M.; Marques, L.S.; Nardy, A.J.R.; Pacca, I.G.; Roisenberg, A.; Stolfa, D. 1988. Continental flood volcanism from the Paraná Basin (Brazil). In: MacDougall, J. D. (Ed.) Continental flood basalts. **Kluwer Acad.** 195-238.
- Porter, M. L. 1987. Sedimentology of an ancient erg margin – The Lower Jurassic Aztec Sandstone, Southern Nevada and Southern California. **Sedimentology** **34**, 661-680.
- Renne, P.R., Ernesto, M., Pacca, I.G., Coe, R.S., Glen, J., Prevot, M., and Perrin, M. 1992 The age of Paraná flood volcanism, rifting of Gondwanaland, and the Jurassic-Cretaceous boundary. **Science** **258**, 975-979.
- Richter, D. 1966. On the New Red Sandstone Neptunian Dykes of the Tor Bay Area (Devonshire). **Proc. Geology Association** **77**: 173-186.

- Roisenberg, A. 1989. 285f. **Petrologia e geoquímica do vulcanismo ácido mesozóico da província meridional da Bacia do Paraná**. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Curso de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1989.
- Schenato, F. ; Formoso, M. L. L. ; Dudoignon, P. ; Meunier, A. ; Proust, D. ; MAS, A. 2003. Alteration process of a thick basaltic lava flow of the Paraná basin (Brazil): petrographic and mineralogical studies. **Journal of South American Earth Sciences** **16(5)**: 423-443.
- Scherer, C. M.S. 2002. Preservation of eolian genetic units by lava flows in the Lower Cretaceous of the Paraná Basin, southern Brazil. **Sedimentology**. 49, 97-116.
- Skilling, I.P., White, J.D.L., McPhie, J., 2002. Peperite: a review of magma-sediment mingling. In: Skilling, I.P., White, J.D.L., McPhie, J. (Eds), Peperite: processes and products of magma-sediment mingling. **Journal of Volcanology Geothermal Research.**, **114**:1-17.
- Stewart, k., Turner, S., Kelley, S., Hawkesworth, C., Kirstein, L. and Mantovani, M., 1996. 3-d $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronology in the Paraná continental flood basalt province: **Earth and Planetary Science Letters**, **143**: 95-109.
- Strieder, A.J., Heemann, R. 2006. Structural constraints on Paraná basalt volcanism and their implications on agate geode mineralization (Salto do Jacuí, RS, Brazil). **Pesquisas em Geociências** **33**: 37-50.
- Turner, S.; Regelous, M.; Kelley, S.; Hawksworth, C.; Mantovani, M. 1994. Magmatism and Continental break-up in the South Atlantic: high precision ^{39}Ar - ^{40}Ar geochronology. **Earth and Plan. Sc. Let.**, **121**, 333-348.
- Waichel, B. L.; lima, E. F.; Sommer, C. A.; Lubachesky, R. 2007 Peperite formed by lava flows over sediments: An example from the central Paraná Continental Flood basalt, Brazil. **Journal of Volcanology and Geothermal Research** **159**, 343-354.
- Waterstson, C. D. 1950. Note on the sandstone injections of Eathie Haven, Cromarty. **Geology Magazine** **87**: 133-139.
- Whitham, A. G; Morton, A. C. & Fanning, C. 2004. Insights into Cretaceous – Palaeocene sediment transport paths and basin evolution in the North Atlantic from a heavy mineral study of sandstone from southern East Greenland. **Petrology Geoscience** **10**: 61-72.

Os resultados obtidos nesta dissertação encontram-se no artigo abaixo intitulado: ***“Seqüência de formação das cavidades no basalto e seu preenchimento com zeolitas, arenito, ágata e ametista, derrame Miolo, São Martinho da Serra, Rio Grande do Sul, Brasil.”*** Submetido á Revista Pesquisas em Geociências.

Seqüência de formação das cavidades no basalto e seu preenchimento com zeolitas,
arenito, ágata e ametista, derrame Miolo, São Martinho da Serra, Rio Grande do Sul,
Brasil.

Sequence of formation of the vesicles in basalt and there filling with zeolites, sandstone,
agate and amethyst, derrame Miolo, São Martinho da Serra, Rio Grande do Sul, Brazil.

Cassiana R. L. Michelin¹, Léo A. Hartmann¹,
Carlos Alberto F. Pires², Leonardo Manara Rosenstengel¹

¹ Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento
Gonçalves, 9500; 91501-970 Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil

² Departamento de Geografia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio
Grande do Sul, Brasil

Abstract

Integrated techniques of geological inquiry are used in the study of agate formation in volcanic rocks from the Alegrete Formation, Serra Geral Group, in the Sao Martinho da Serra agate and amethyst mining district, state of Rio Grande do Sul, Brazil. The techniques include the interpretation of aerial photos, geologic mapping, back-scattered electron imaging, x-ray diffraction and chemical analyses of minerals with the electron microprobe. The deposits of agate and amethyst are related to fractures in the basalt. The sequence of formation of the cavities and their filling indicates the formation of the vesicles by degassing of the lava flow at high temperature and their low temperature, partial filling with clinoptilolite (in the rims of the vesicles), followed by celadonite (in the core). The following event was the fluidization of sand and its intrusion, triggered by successive earthquakes. The hydrothermal fluid recrystallized the matrix of the sand into agate and caused the reprecipitation of the dissolved silica in fractures and in the internal part of vesicles. In many vesicles, clinoptilolite and celadonite were dissolved and replaced by agate. Some vesicles are partially or totally filled by zeolite, celadonite, sandstone or agate. Igneous mineralogy is constituted of plagioclase (An_{31-61}), augite and pigeonite, magnetite and ilmenite. This investigation demonstrates the hydrothermal origin of agate, precipitated from the fluid after dissolution of quartz grains from the Botucatu sandstone. This process was younger and occurred at lower temperature than the precipitation of mordenite and clinoptilolite at 150 °C.

Keywords - zeolite, sand injectites, clay minerals, mineral chemistry, basalt geochemistry.

Resumo

Técnicas integradas de investigação geológica foram utilizadas no estudo da origem das ágatas dos derrames basálticos da Formação Alegrete, Grupo Serra Geral, no distrito mineiro de ágata e ametista de São Martinho da Serra (RS). As técnicas incluem a interpretação de fotos aéreas, mapeamento geológico, imageamento de elétrons retroespalhados, difratometria de raios-x e análises químicas de minerais por microsonda eletrônica. As jazidas de ágata e ametista estão relacionadas às fraturas nos basaltos. A seqüência de formação das cavidades e seu preenchimento indicam a formação das vesículas por desgaseificação da lava basáltica e seu preenchimento parcial em baixa temperatura por clinoptilolita e mordenita (na borda das vesículas), seguido de celadonita (no núcleo). O evento seguinte foi a fluidização de areia e a intrusão de injetitos ocasionada por sucessivos abalos sísmicos. O fluxo hidrotermal alterou a matriz da areia para ágata e reprecipitou a sílica dissolvida em fraturas e na parte interna de vesículas. As zeolitas e celadonita foram lixiviadas pelo fluido, sendo as vesículas preenchidas por ágata. Dessa forma, algumas vesículas estão parcialmente ou totalmente preenchidas por zeolitas, celadonita, areia, ágata e ametista. A mineralogia ígnea é constituída de plagioclásio (An_{31-61}), augita e pigeonita, magnetita e ilmenita. Com esta investigação, está demonstrada a origem hidrotermal dos geodos de ágata, sendo esse evento mais jovem que o preenchimento de vesículas com clinoptilolita e mordenita.

Palavras-chave: ágata, injetitos de areia, zeolita, química mineral, geoquímica de basaltos.

Introdução

Vesículas preenchidas com zeolitas e outros minerais são comuns nos derrames basálticos do mundo e também nas lavas do Grupo Serra Geral do sul do Brasil. Em São Martinho da Serra, Rio Grande do Sul, há uma particularidade que exige explicação adequada, pois as vesículas da porção vesicular de um derrame contêm zeolitas, mas também constituem uma jazida de ágata e ametista, localmente explorada por garimpeiros. A relação das ágatas nos geodos e fraturas com abundantes injetitos de areia torna essencial o esclarecimento da seqüência de formação das cavidades e de seus preenchimentos.

Apresentamos neste artigo a primeira descrição da geologia e da mineralização de ágata e ametista de São Martinho da Serra. O mapeamento geológico foi essencial para o entendimento da seqüência de processos mineralizantes, mas foi necessário buscar o apoio de técnicas avançadas, inclusive difratometria de raios-x e análises químicas de minerais por microsonda eletrônica. Os resultados alcançados mostram que o entendimento dos processos de mineralização de ágata e ametista no Grupo Serra Geral exige a integração de mapeamento geológico do derrame mineralizado, suas encaixantes e a observação cuidadosa da seqüência de formação de vesículas e seu preenchimento. A percepção da intensa atividade sísmica durante o vulcanismo basáltico faz parte integral da avaliação geológica dos processos mineralizadores.

Metodologia

Para a determinação dos objetivos deste estudo e reconhecimento da área foi realizado um trabalho de campo regional. Posteriormente, foram levantados quatro perfis perpendiculares aos derrames com o propósito de coletar amostras dos vulcanitos em diferentes cotas para confecção de lâminas delgadas, análise química em rocha total, análise dos minerais por microsonda eletrônica e difração de raio-X.

O trabalho de campo de detalhe permitiu a delimitação da seqüência vulcânica, através do reconhecimento em campo das litologias, estruturas e texturas, além da completa caracterização do derrame Miolo, portador dos geodos de ágata e ametista.

Em análise na lupa binocular, foram selecionados basaltos, basaltos andesíticos (classificados com base em análises químicas), riolitos e arenitos, para a confecção de

lâminas delgadas. Estas seções delgadas são representativas de cada derrame, além dos arenitos pertencentes a Formação Botucatu, que incluem arenitos intertrap e erg. Na descrição em microscópio petrográfico, observou-se a textura e estrutura da rocha com a descrição dos minerais principais, secundários e acessórios, além daqueles hidrotermais. Para melhor organização e estruturação na interpretação da gênese da rocha, foram feitos croquis esquemáticos e fotografias das principais estruturas. Foram previamente selecionadas através da análise em microscópio petrográfico 14 amostras para serem estudadas em termos de elementos maiores, traços e elementos terra raras no *Acme Brazil Laboratório*, Goiás, pelos métodos de Fluorescência de Raio-X e ICP-MS. Os dados de química mineral e química de rocha total foram tratados através dos *software* Minpet 2.02 e EXCEL.

Foram realizadas análises químicas pontuais em cristais de plagioclásio, piroxênio, zeolitas, argilominerais e minerais opacos por microsonda eletrônica. A análise objetivou a classificação dos minerais constituintes das rochas presentes na Formação Alegrete do Grupo Serra Geral, facilitando assim a sua interpretação petrogenética, além de permitir a caracterização e identificação da seqüência mineral que preenche as vesículas tardi-magmáticas. Estas análises mineralógicas quantitativas foram realizadas na Alemanha (Institut für Kristallchemie und Mineralogie, Stuttgart Universität) com o apoio de Leonardo Manara Rosenstengel. Os diagramas para classificação das fases minerais foram processados no *software Calcmin*. Imagens de elétrons retroespalhados (BSE) foram utilizadas para a caracterização da estrutura interna dos minerais analisados por microsonda eletrônica, já que a intensidade da emissão de BSE é uma função do número atômico médio de cada pixel; isto é, quanto mais elevado o número atômico maior a intensidade de emissão de elétrons (e o brilho e a intensidade da imagem).

Geologia regional

O derrame mineralizado a ágata e ametista faz parte do vulcanismo basáltico da Formação Alegrete, Grupo Serra Geral. Este grupo recobre uma área aproximada de 1.300.000 km² no sul do Brasil, Paraguai, Argentina e Uruguai. A figura 1 apresenta a localização da área em estudo e apresenta algumas feições tectônicas da Bacia do Paraná. O Grupo Serra Geral faz parte da Bacia do Paraná é formada por uma sucessão de rochas vulcânicas com espessura máxima aproximada de 1.500 m, incluindo basaltos

As condições favoráveis para formação de argilominerais e zeolitas em seqüências vulcânicas são a atuação de eventos hidrotermais e metamorfismo de baixo grau. A formação de vesículas é a resposta da desgazeificação do magma ainda durante o resfriamento e conseqüente preenchimento das cavidades está relacionada aos fluidos hidrotermais.

Diversos autores já descreveram feições de interação lava-sedimento, em especial injetitos de areia (Waterston, 1950; Richter, 1966; Whitham *et al.*, 2004; Jonk *et al.*, 2005b; entre outros). Na Bacia do Paraná, Petry *et al.* (2007) descrevem as feições lava-sedimento do Grupo Serra Geral encontradas na região de Torres, RS. Os autores apresentam mecanismos de formação e a sua interação, como por exemplo: estriações de fluxo, diques clásticos e brechas peperíticas e sugerem que a injeção de diques é associada com a formação de peperitos quando a areia é injetada no interior do fluxo.

A hipótese de formação dos geodos portadores de ágata e ametista foi abordado por vários autores como no trabalho de Bossi e Caggiano (1974) que apontam a incorporação de arenitos pela lava basáltica e conseqüente formação dos geodos silíceos. Strieder e Heemann (2006) atribuem à gênese dos geodos a fusão dos arenitos eólicos da Formação Botucatu, demonstrando como evidências xenólitos de basalto e arenito nas lavas vesiculares basálticas, diques de arenito que cortam os basaltos e a conexão dos arenitos com os geodos. A afirmação dos autores para explicar a não mistura da areia com o basalto é o alto contraste de densidade entre o basalto vesicular e o arenito, onde o papel dos voláteis é de grande importância para a fusão dos sedimentos.

A importância da interação lava-sedimento no estudo do ambiente deposicional e as características reológicas do magma que interagiu com os sedimentos são relatadas por Jerram e Stollhofen (2002). Os autores descrevem a formação de diques clásticos no Etendeka pela migração de areia em fraturas, atribuindo a esta feição causas tectônicas.

Processos de fluidização, liquefação, desgazeificação, compactação, vesiculação, alteração e fusão ocorrem durante a interação lava-sedimento, que é o caso descrito por Skilling, 2002 onde o autor destaca a importância dos peperitos para o entendimento da interação magma-água e eventos hidrovulcânicos explosivos. Evidências de que posicionamento de diques, para a intrusão, é causado pelo movimento ao longo do plano de falha e a penetração de areia por alta pressão de fluidos são descritos por Martill e Hudson, 1989 em seus estudos na intrusão de

Dogsthorpe os autores discorrem sobre a injeção de diques e a relação na compactação e formação de concreções.

A formação e preenchimento das vesículas e a relação com os processos atuantes durante o resfriamento de um derrame basáltico da Formação Serra Geral são itens de interesse destacados na obra de Schenato *et al.* 2003, onde os autores inferem que a albitização do plagioclásio, associada com a cristalização de zeolitas e a mudança na composição de argilominerais são atribuídas a interação água/basalto, durante o baixo grau metamórfico sofrido pelo pacote vulcânico.

Geologia local

O derrame Miolo é o terceiro derrame acima do contato com os arenitos da Formação Botucatu. O derrame 1 tem espessura aproximada de 11 m. Acima do primeiro derrame, ocorre uma camada descontínua de arenito da Formação, que serviu de substrato para o extravasamento da lava do derrame 2, que possui uma espessura de 9 m que está abaixo e em contato com o derrame Miolo.

O derrame 4 é do tipo II e pode ser observado no topo do derrame mineralizado com espessura aproximada de 12 m, apresenta disjunção vertical. A figura 2 é a coluna estratigráfica gerada pelo empilhamento de fácies vulcânicas e eólicas que compõem a região de São Martinho da Serra.

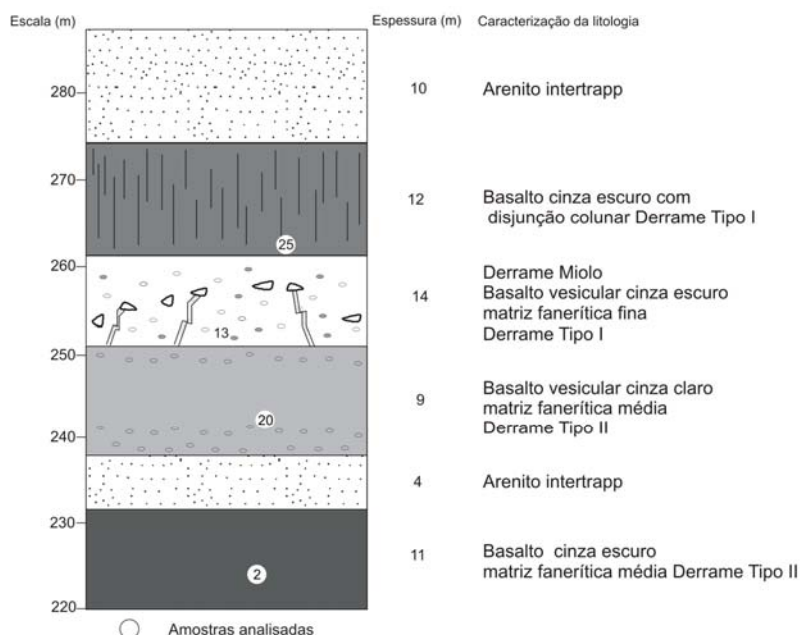


Figura 2: Coluna estratigráfica gerada pelo empilhamento de fácies vulcânicas e eólicas que compõe a região de São Martinho da Serra

A ágata ocorre no derrame Miolo em veios e vesículas. A espessura aproximada dos veios é de 30 cm (0,1-40,0 cm), e os injetitos de areia estão conectados com estes veios. O tamanho das vesículas com ágata é de aproximadamente 0,1 mm a 3 cm. Fraturas e amígdalas podem estar preenchidas parcialmente por ágata e arenito. A figura 3 apresenta fotografias de campo, com a relação entre a ágata e os injetitos de arenito.

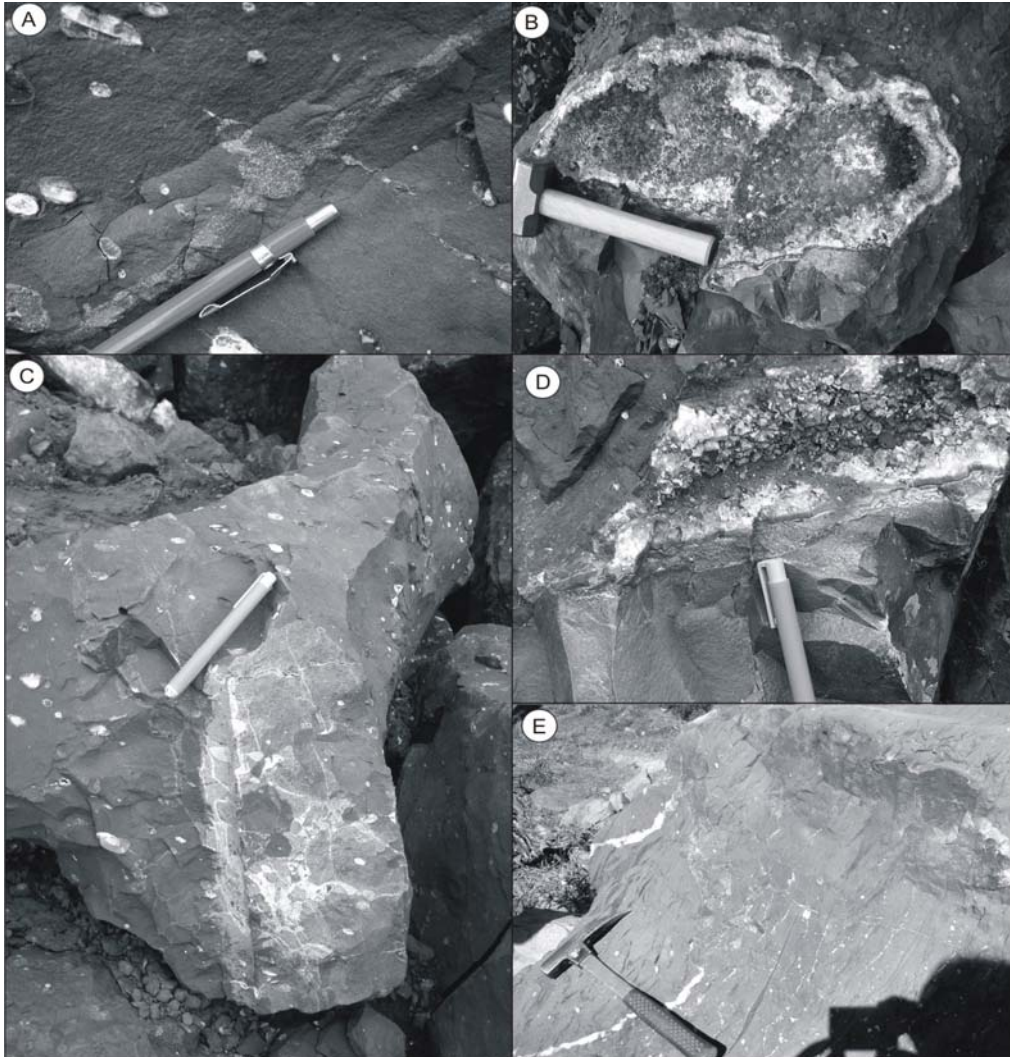


Figura 3: Fotografias de campo do Derrame Miolo. A: Injetito de areia preenchendo totalmente um veio. As ramificações deste injetito dão origem aos geodos de ágata. Escala com tamanho aproximado de 14 cm. B Geodo de ametista com formato tabular e conexão com arenito. Na borda deste geodo é possível observar os canais alimentadores de fluido. Escala com tamanho aproximado de 12,5 cm. C Enxame de diques de arenito que se ramificam preenchendo as vesículas com sílica. D Detalhe do contato do geodo de ametista com o arenito. E Feições de brechação. Escala com tamanho aproximado de 30 cm.

Injetitos de arenito

Injetitos de arenito são abundantes no basalto mineralizado e apresentam espessura entre 0,1-0,5 m, possuem bordas irregulares e descontínuas, e não apresentam uma relação da espessura da borda com a espessura do dique. Por ser muito resistentes ao intemperismo, estas estruturas ressaltam nas exposições mais alteradas, o contato dos diques com o basalto é abrupto. É possível observar feições de brechação e falhamento no arenito. A textura do arenito apresenta duas características principais: grãos de quartzo (dominantes, pouco feldspato) são arredondados, sem evidência de recristalização. Os grãos estão cimentados por ágata, que constitui 40% do volume do arenito.

Os diques de arenito presentes na área em estudo possuem 90% em volume de quartzo, resquícios de feldspatos são observados. O processo de agatização é evidenciado pelo crescimento de ágata na periferia dos minerais presentes no arenito. Em lâmina delgada é possível observar que o arenito apresenta fraturas e que estas fraturas estão totalmente preenchidas por ágata. A figura 4 contém as fotomicrografias dos injetitos de arenitos.

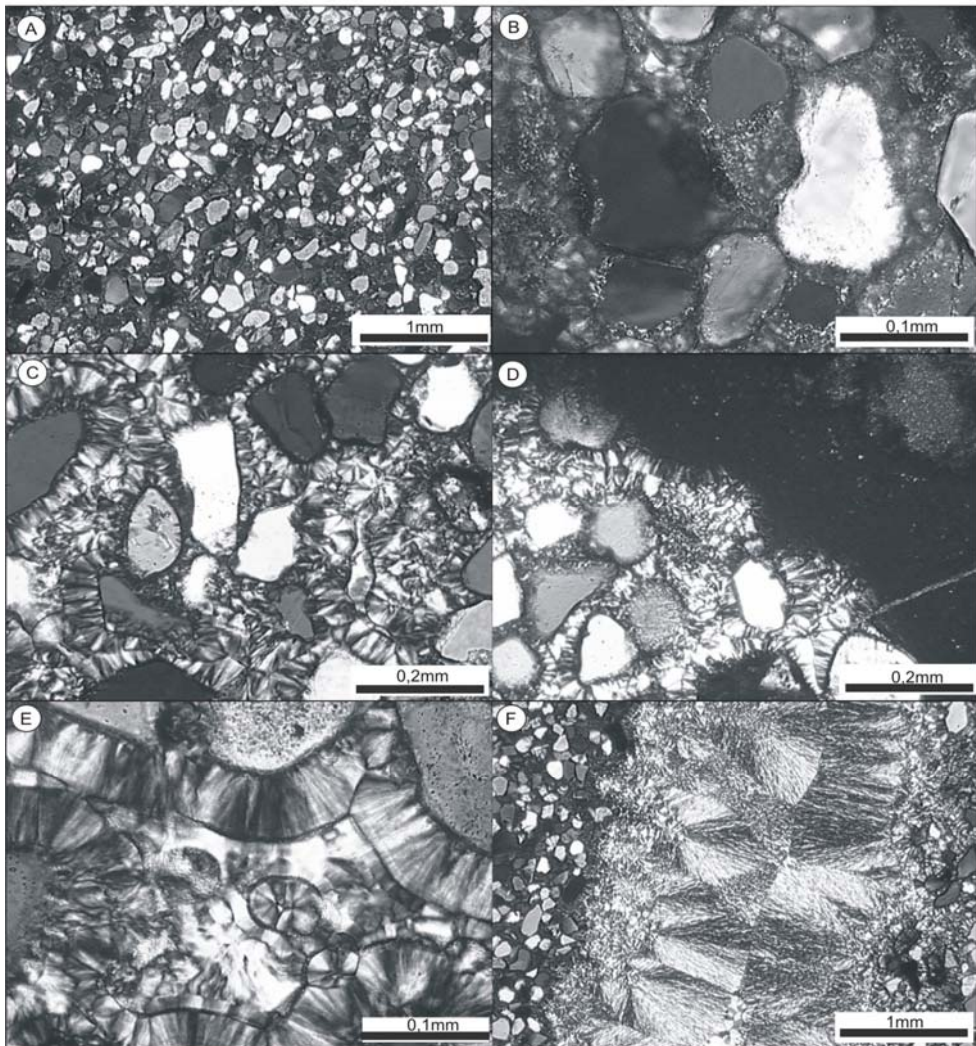


Figura 4: Fotomicrografias dos arenitos. A: Matriz do arenito que preenche os veios. B: Detalhe da borda dos grãos de quartzo e da matriz. C, D e E: Detalhe da substituição por sílica. F: Fratura preenchida por sílica.

Mineralogia do Derrame Miolo

Em análise petrográfica, é possível observar que os basaltos possuem aproximadamente 48% de plagioclásio, 40% de piroxênio, além de minerais opacos (principalmente titanita). Em função do grau de alteração hidrotermal da rocha não foi possível medir o teor de An dos cristais de plagioclásio. Os tipos de piroxênio presentes são: augita e pigeonita, sendo possível observá-los na forma de cristais subédricos a anédricos na matriz e euédricos como fenocristais. A matriz do basalto andesítico mineralizado está altamente alterada por hidrotermalismo.

O derrame Miolo foi estudado com mais detalhe incluindo imageamento de elétrons retro-espalhados (Fig. 5) e análises químicas de minerais por microsonda eletrônica nas vesículas preenchidas.

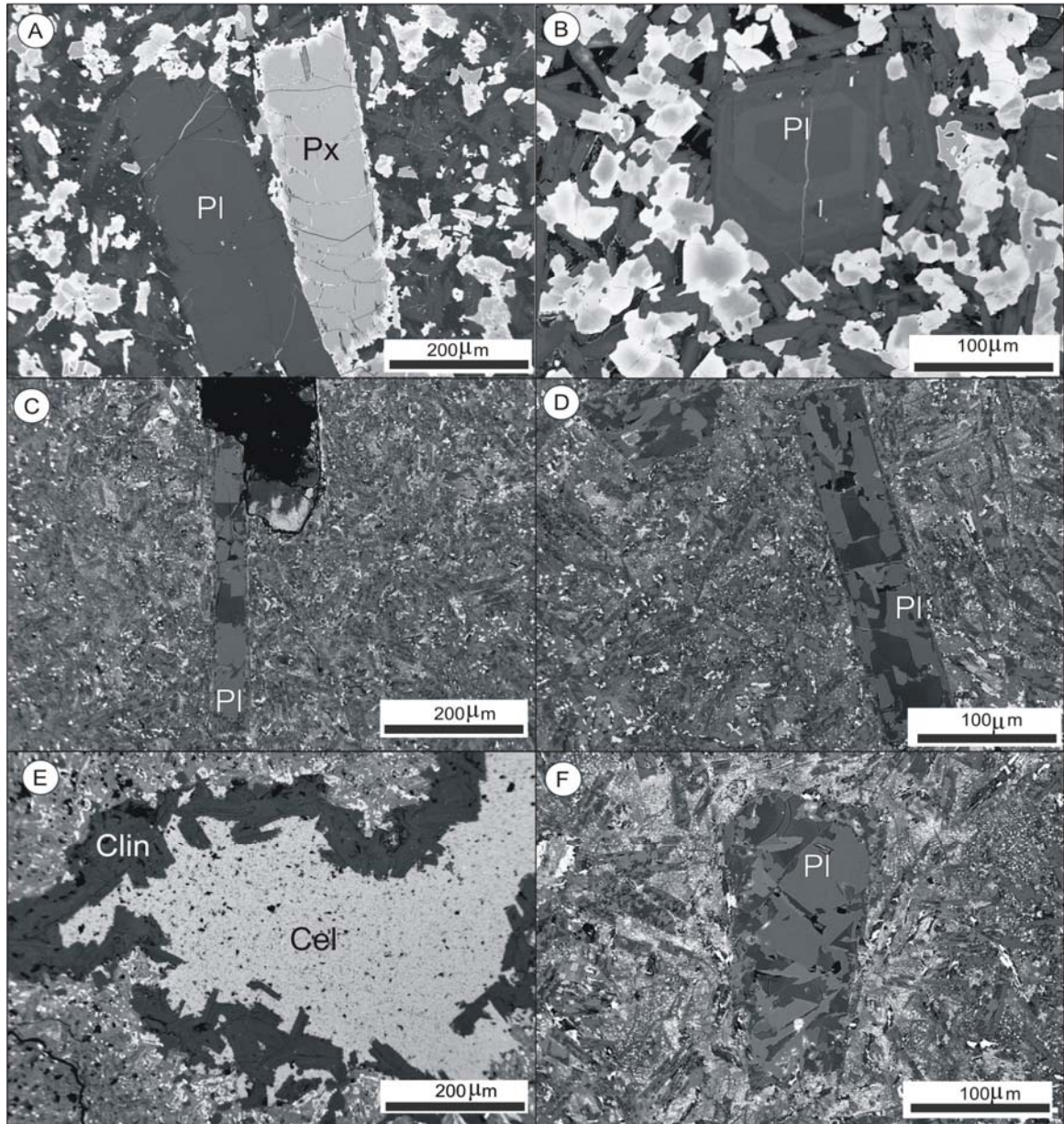


Figura 5: Imagens BSE das amostras analisadas por microsonda eletrônica. **A** e **B**: basalto não alterado. **C**, **D**, **E** e **F** Derrame Miolo, basalto alterado. Legenda: **clin**: clinoptilolita, **px**: piroxênio, **pl**: plagioclásio **cel**: celadonita.

Geoquímica dos basaltos

Os limites de detecção das técnicas analíticas usadas, assim como os resultados constam da tabela 1 (em anexo). A tabela contendo os dados estudados está dividida por litologias classificadas após tratamento dos dados. As análises referentes a óxidos, estão expressas em porcentagem em peso, os elementos traços em ppm, exceto Au, que se encontra em ppb. Os dados químicos de rocha total foram tratados através do *software Minpet 2.02*, onde foram confeccionados diagramas para a classificação química da rocha, empilhamento dos derrames existentes e análise de elementos traços. As análises cujos teores de PF ultrapassaram 3 peso %, foram recalculadas.

As amostras correspondem a três basaltos, cinco basaltos andesíticos e cinco riolitos. O diagrama de classificação dos vulcanitos consta da figura 6.

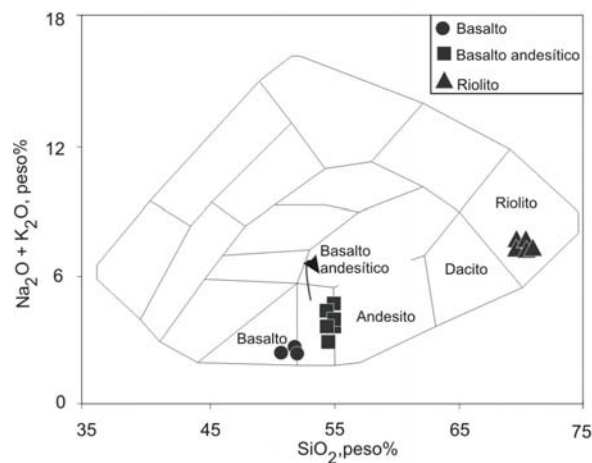


Figura 6: Diagrama de classificação das rochas vulcânicas proposto por Cox et al, 1979.

Tabela 1: Composição química das rochas analisadas da região de São Martinho da Serra, RS. Óxidos em peso %, elementos traço em ppm, exceto Au em ppb. PF: perda ao fogo. Legenda: B: Basalto, Ba: Basalto andesítico, Rio: Riólito.

	6	7	9	10	14	16	1001	1004	1009	4016	2	13M	20	25	13M*	20*
	Ba	Ba	Rio	Rio	Ba	Rio	B	B	Rio	Rio	Ba	B	Ba	B	Ba	Ba
SiO ₂	54,44	55,15	69,63	69,22	54,21	68,77	51,67	51,83	69,43	69,78	55,23	49,99	53,63	51,86	53,58	55,88
Al ₂ O ₃	13,16	13,08	12,02	12,54	13,56	12,32	14,14	14,05	12,1	12,11	12,69	13,25	12,6	13,87	14,2	13,12
Fe ₂ O ₃	14,54	13,85	5,73	5,67	12,79	5,96	12,16	12,04	5,77	5,66	14,55	14,61	13,94	12,15	15,66	14,52
MgO	3,05	2,86	0,63	0,72	4,34	0,73	6,84	6,71	0,67	0,85	2,83	3,63	2,88	6,64	3,89	3
CaO	6,76	6,45	1,63	1,85	7,92	1,74	10,44	10,43	1,43	1,87	6,4	6,3	5,57	10,49	6,75	5,8
Na ₂ O	2,41	2,53	2,32	2,45	2,42	2,36	1,83	1,8	2,16	2,45	2,51	1,9	2,06	1,76	2,03	2,14
K ₂ O	1,48	1,7	4,87	5,02	1,96	5,23	0,53	0,68	5,25	4,95	1,71	1,51	3,14	0,74	1,61	3,27
TiO ₂	1,66	1,71	0,7	0,72	1,36	0,71	0,92	0,91	0,71	0,72	1,64	1,74	1,78	0,85	1,86	1,85
P ₂ O ₅	0,23	0,21	0,21	0,22	0,21	0,2	0,12	0,11	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,08	0,21	0,2
MnO	0,19	0,2	0,07	0,08	0,18	0,08	0,19	0,2	0,08	0,07	0,22	0,16	0,17	0,17	0,17	0,17
Cr ₂ O ₃	0,001	0,002	<,001	<,001	0,002	<,001	0,007	0,006	<,001	<,001	0,002	0,003	0,002	0,009	0,032	0,0028
Ni	16	15	14	11	27	11	68	70	18	<5	16	17	7	74		
Sc	33	33	15	16	36	15	42	42	15	15	32	34	33	42		
PF	2	2,2	2,1	1,4	1	1,8	1,1	1,2	2,1	1,1	1,7	6,4	3,2	1,3		
TOT/C	0,06	0,01	0,01	0,02	0,01	0,05	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04	0,04	0,02		
TOT/S	0,02	0,03	<,01	<,01	0,01	<,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	<,01	0,01		
Total	99,93	99,95	99,91	99,89	99,95	99,9	99,96	99,98	99,9	99,76	99,69	99,7	99,17	99,94		

* recálculo das amostras cujos teores de PF ultrapassaram 3 % peso.

Tabela 1: Composição química das rochas analisadas da região de São Martinho da Serra, RS. Óxidos em peso %, elementos traço em ppm, exceto Au em ppb. PF: perda ao fogo. Legenda: B: Basalto, Ba: Basalto andesítico, Rio: Riolito.

	6 Ba	7 Ba	9 Rio	10 Rio	14 Ba	16 Rio	1001 B	1004 B	1009 Rio	4016 Rio	2 Ba	13M Ba	20 Ba	25 B
Ba	413,6	390,4	639,2	738,9	334,4	741	217,7	168,4	662,7	668	407,6	382	457,7	201,4
Be	1	1	3	3	<1	3	<1	<1	3	3	2	2	2	1
Co	39,7	37,2	5,3	5,8	40,1	7,4	48,3	48,1	6	6,8	40,7	42,3	38,2	49,2
Cs	2,9	3,6	10,2	8,9	1,6	9,5	0,6	0,4	11,3	9,2	3,1	1,3	2,4	0,8
Ga	19,6	19,9	17,4	18,1	19,8	17,1	16,5	16,7	17,3	17,4	19,8	20,3	19,8	15,7
Hf	5,3	6,1	9,1	9,1	4,2	9,1	2,8	2,7	8,8	8,8	5	5,7	5,3	2,1
Nb	12,9	13,9	23,4	24,4	11,4	24	5,7	5,6	23,8	25,3	14,5	15,6	15,2	5
Rb	71,6	94,4	212,6	236,1	66,7	233,4	23,6	17,9	238,5	214,9	83,8	41,6	104,1	40
Sn	2	3	6	7	2	6	1	1	6	6	2	2	2	1
Sr	256,3	236,1	106,1	103,9	210,9	107	218,1	232	96,2	105,6	222,6	346,2	939,3	257,1
Ta	0,9	0,9	1,9	1,9	0,8	1,8	0,4	0,4	1,9	1,9	0,8	0,9	0,8	0,3
Th	7,6	8,7	18,5	17,7	5,2	18,2	2,7	2,3	15,9	15,9	9,1	10,7	9,7	2,6
U	1,5	2,1	4,6	5	1,5	5,1	0,7	0,7	4,4	5,2	2,2	2,2	2,3	0,7
V	381	380	29	28	359	30	309	304	26	29	397	425	409	283
W	0,6	0,7	1,8	1,5	0,3	1,7	0,1	<,1	1,9	1,8	0,9	0,4	0,9	0,1
Zr	166,5	181,6	286,8	292,6	137,2	295,3	80	80,8	293,4	302,8	181,7	193,6	186,5	71,7
Y	34,1	35,3	53,9	54,5	31,4	65,2	22,1	20,5	51,1	62,6	38	39,9	37,8	20,2
La	27	28,7	45,4	47,6	22,2	51,9	12	10,8	47,1	47,2	28	29	28,9	10,2
Ce	57	61,6	94,1	99,9	47,1	112,3	25,5	24,9	96,9	98,6	62	65,6	62,4	23
Pr	7,13	7,59	11,66	11,97	5,95	13,29	3,36	3,19	12,23	12,31	7,72	8,22	8,1	2,99
Nd	28,8	30,4	45	43,6	24,6	51,6	14,3	13,8	46,1	46,6	31,9	32,5	31,4	12,8
Sm	6,12	6,67	9,31	9,46	5,36	10,68	3,47	3,17	9,52	9,58	6,13	6,46	6,32	2,82
Eu	1,56	1,59	1,72	1,69	1,46	1,9	1,02	0,94	1,74	1,74	1,61	1,79	1,64	0,91
Gd	6,08	6,2	8,73	8,61	5,49	9,9	3,59	3,47	8,8	9,06	5,95	6,32	6,18	3,02
Tb	1,11	1,15	1,7	1,65	1,06	1,91	0,68	0,65	1,69	1,7	1,19	1,3	1,22	0,6
Dy	5,8	5,7	8,6	8,85	5,41	9,82	3,56	3,55	8,56	8,9	6,35	6,83	6,28	3,19
Ho	1,15	1,21	1,74	1,77	1,08	2,01	0,74	0,7	1,74	1,79	1,2	1,32	1,26	0,66
Er	3,06	3,4	5,07	5,13	2,98	6,01	2,22	2,01	4,84	5,19	3,38	3,53	3,49	1,9
Tm	0,5	0,48	0,79	0,79	0,47	0,88	0,33	0,3	0,74	0,75	0,51	0,54	0,49	0,26
Yb	3,05	3,13	4,82	4,86	2,94	5,3	1,96	1,97	4,58	4,7	3,17	3,25	3,17	1,79
Lu	0,46	0,51	0,77	0,75	0,45	0,85	0,3	0,29	0,74	0,74	0,49	0,5	0,49	0,27
Mo	0,5	0,6	0,8	0,8	0,3	0,7	0,2	0,3	0,7	0,6	3,4	2,0	1,0	2,4
Cu	55	49,9	25,1	27,1	99,5	25,3	134,1	155,2	28	24,2	45,4	48,8	50,2	98,9
Pb	4,2	2,7	2,6	2,7	2	3	3,1	3,1	3,1	2,9	2,8	10,6	4,0	3,1
Zn	42	50	51	61	28	57	19	31	52	49	53,0	84,7	70,3	25,6
Ni	4,8	4	2,3	2,5	9,3	2,6	11,8	15,1	2,5	1,8	4,2	7,0	5,3	17,9
As	0,5	0,6	1,1	1,1	<,5	1,5	<,5	<,5	1,4	1,4	0,3	0,1	1,2	0,1
Cd	0,1	<,1	0,1	0,1	<,1	0,1	<,1	<,1	<,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0
Sb	<,1	<,1	0,2	0,1	<,1	0,2	<,1	<,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1
Bi	0,1	<,1	0,2	0,2	<,1	0,2	<,1	<,1	0,2	0,2	0,0	0,1	0,1	0,0
Ag	<,1	<,1	<,1	<,1	<,1	<,1	<,1	<,1	<,1	<,1	21,0	30,0	21,0	27,0
Au	0,5	<,5	1	0,8	0,8	0,7	10,6	13,5	0,9	0,8	0,5	0,8	0,9	11,7
Hg	0,01	<,01	0,01	<,01	<,01	<,01	<,01	<,01	0,01	<,01	5,0	5,0	5,0	5,0
Tl	<,1	0,1	0,1	0,1	<,1	0,1	<,1	<,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
Se	<,5	<,5	<,5	<,5	<,5	<,5	<,5	<,5	<,5	<,5	0,1	0,1	0,1	0,1

A técnica de interpretação utilizada para a identificação das litologias modificadas consiste na análise do diagrama Ce/Zr vs Nb/Y para diferenciação dos vulcanitos do Grupo Serra Geral modificados dos geoquimicamente pouco modificados. As razões de elementos incompatíveis permanecem semelhantes durante os processos de fusão parcial no manto, quando os líquidos basálticos são gerados. Ao examinar esse tipo de diagrama (figura 7), podem-se identificar as amostras menos modificadas geoquimicamente daquelas que sofreram alteração mais significativa. Essa técnica foi utilizada por Lopes & Hartmann (2004) no estudo de metabasaltos da Mina da Palma, RS. Através da aplicação deste recurso pode-se observar que basaltos, basaltos andesíticos e riolitos plotam em campos distintos.

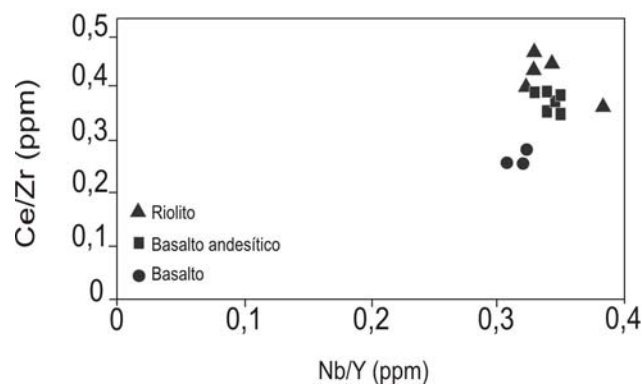


Figura 7: Diagrama Ce/Zr vs Nb/Y para diferenciação das rochas vulcânicas da Formação Serra Geral modificadas das geoquimicamente primitivos.

Segundo Peate (1992), é possível classificar as rochas basálticas em dois grupos: alto TiO_2 (Urubuci, Paranapanema, Ribeira e Pitanga) e baixo TiO_2 (Gramado e Esmeralda). Para efetuar esta classificação os teores de TiO_2 e MgO foram plotados no diagrama da figura 8. Pode -se observar que os vulcanitos presentes na região de São Martinho da Serra são classificadas como baixo TiO_2 .

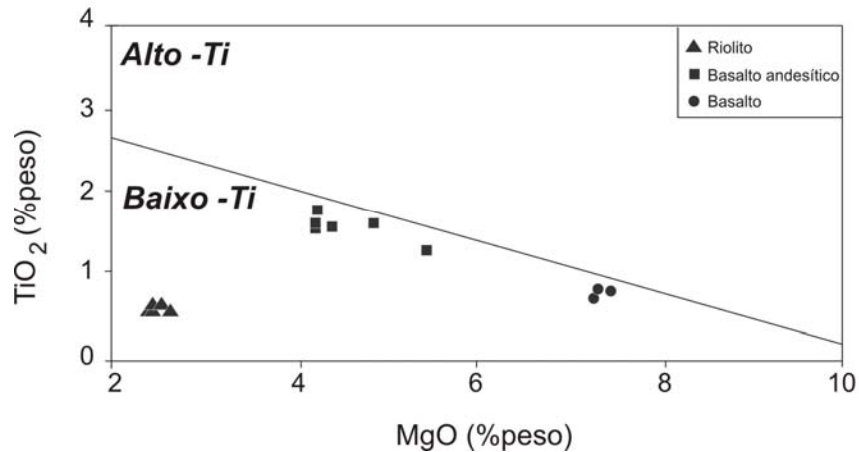


Figura 8: Diagrama TiO_2 vs MgO para a classificação dos basaltos em alto e baixo TiO_2

Na análise do diagrama de elementos terras raras normalizado para condrito é possível observar que os três grupos de rochas apresentam comportamento semelhante frente ao enriquecimento de elementos terras raras leves e pesados. A anomalia de Eu para os riolitos é bastante proeminente, sugerindo um fracionamento de feldspatos durante a gênese das rochas vulcânicas ácidas (Gilg *et al* 2003).

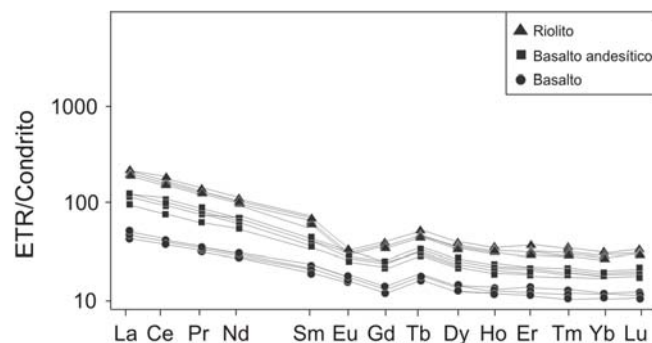


Figura 9: Diagramas normalizados para Condrito representando o teor de ETR para os vulcanitos da região de São Martinho da Serra.

Com a análise da composição do plagioclásio, utilizando-se o diagrama de Leake, (1997) podemos concluir que os minerais presentes nos basaltos têm composição variável de andesina a labradorita. Foram analisados pontos referentes à borda e núcleo dos cristais de plagioclásio, mas não foram verificadas variações nestas composições. A tabela 2 contém os dados de plagioclásios obtidos na análise por microsonda eletrônica.

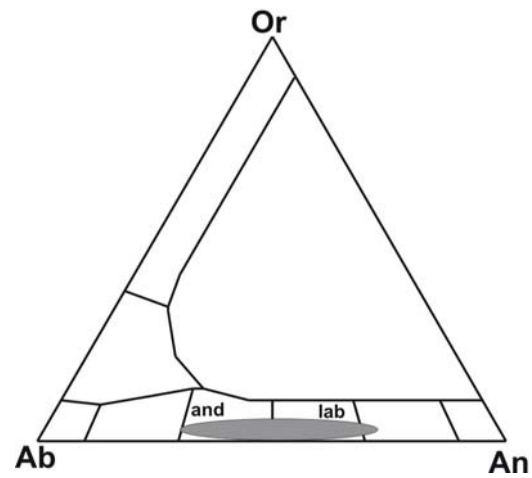


Figura 10: Diagrama ternário para classificação dos feldspatos proposto por Leake, (1997) para os vulcanitos da região de São Martinho da Serra. Legenda: And: andesina, Lab: labradorita. A área demarcada representa o campo onde plotaram as análises realizadas neste estudo.

A figura 11 apresenta a classificação dos piroxênios segundo Morimoto *et al* (1988) presentes na região em estudo onde é possível observar que as composições são compatíveis com augita e pigeonita (tabela 3)

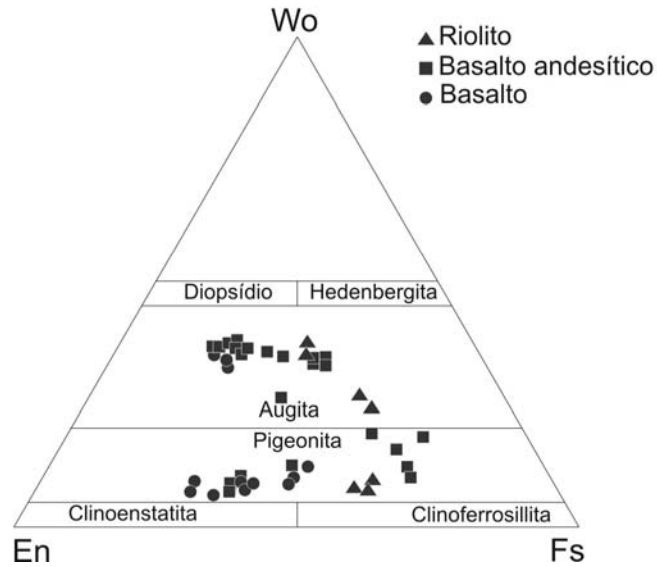


Figura 11: Classificação dos piroxênios dos vulcanitos da Serra Geral, segundo Morimoto *et al* (1988).

Tabela 3: Análises químicas por microsonda eletrônica dos piroxênios da região de São Martinho da Serra, RS, no diagrama proposto por Morimoto *et al* 1988.

Amostra	1	1	1	14	14	14	16	16	16	16	6	6	6
Análise	23	29	52	173	212	227	2	2	51	68	1	19	22
SiO ₂	49,23	49,77	50,583	49,46	48,81	49,216	49,23	49,23	42,55	48,51	46,701	49,285	49,8
TiO ₂	0,475	0,312	0,294	0,67	0,81	0,902	0,47	0,47	1,47	0,28	0,489	0,52	0,59
Al ₂ O ₃	2,103	0,843	0,758	3,36	1,051	1,306	0,92	0,92	6,01	0,55	0,497	1,391	0,95
FeO	24,383	26,418	22,95	20,49	20,83	17,961	19,97	19,97	24,51	32,88	36,797	32,89	25,915
Cr ₂ O ₃	0,009	0,004	0,006	0,009	0,006	0,016	0	0	0	0	0	0	0,032
MnO	0,469	0,562	0,466	0,45	0,44	0,412	0,75	0,75	0,53	1,16	0,704	0,58	0,544
MgO	12,969	16,024	18,861	8,58	10,16	11,9	10,37	10,37	7,16	11,59	7,866	5,501	15,402
CaO	5,66	4,605	4,754	14,04	16,2	16,51	16,817	16,817	10,19	3,83	5,548	7,652	6,02
Na ₂ O	0,104	0,065	0,074	1,15	0,27	0,218	0,198	0,198	2,4	0,061	0,093	0,125	0,08
K ₂ O	0,416	0,012	0,001	0,088	0,014	0	0,007	0,007	1,17	0,019	0	0,22	0
Total	100	100	100	99,99	100	100	99,99	99,99	100	99,99	100	100	99,99
Si	1,989	1,942	1,934	1,947	1,924	1,918	1,933	1,933	1,712	1,953	1,928	2,049	1,932
Al	0,011	0,039	0,034	0,053	0,049	0,06	0,043	0,043	0,285	0,026	0,024	0	0,043
Al	0,089	0	0	0,103	0	0	0	0	0	0	0	0,068	0
Ti	0,014	0,009	0,008	0,02	0,024	0,026	0,014	0,014	0,044	0,008	0,015	0,016	0,017
Fe3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,001
Mg	0,781	0,932	0,991	0,503	0,597	0,691	0,607	0,607	0,429	0,695	0,484	0,341	0,891
Ni	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe2	0,709	0,803	0,734	0,301	0,308	0,303	0,277	0,277	0,299	0,811	0,77	0,569	0,75
Mn	0,016	0,019	0,015	0,015	0,015	0,014	0,025	0,025	0,018	0,04	0,025	0,02	0,018
Ca	0,245	0,192	0,195	0,592	0,684	0,689	0,707	0,707	0,439	0,165	0,245	0,341	0,25
Na	0,008	0,005	0,005	0,088	0,021	0,016	0,015	0,015	0,187	0,005	0,007	0,01	0,006
K	0,021	0,001	0	0,004	0,001	0	0	0	0,06	0,001	0	0,012	0
Mg	41,86	46,483	53,254	28,204	30,114	34,922	30,424	30,424	25,092	34,652	23,912	18,472	44,546
Fe	45,01	43,916	37,1	38,63	35,38	30,26	34,12	34,12	49,25	57,12	63,97	63,07	42,95
Ca	13,13	9,601	9,647	33,17	34,51	34,822	35,459	35,459	25,666	8,23	12,121	18,467	12,513

A utilização de microsonda eletrônica foi essencial na determinação dos minerais secundários que preenchem as vesículas, através da prévia classificação em imagens de BSE e lâmina petrográfica foi possível a confecção de diagramas classificatórios (tabela 4). Para a determinação das zeolitas, utilizou-se o diagrama (Ca+Mg) – Na – K, onde os pontos analisados plotam no campo da heulandita-clinoptilolita. O que distingue a heulandita da clinoptilolita é a razão Si/Al, e para confirmar esta variação composicional, o diagrama proposto por Pe-Piper (2000) foi utilizado (fig. 12).

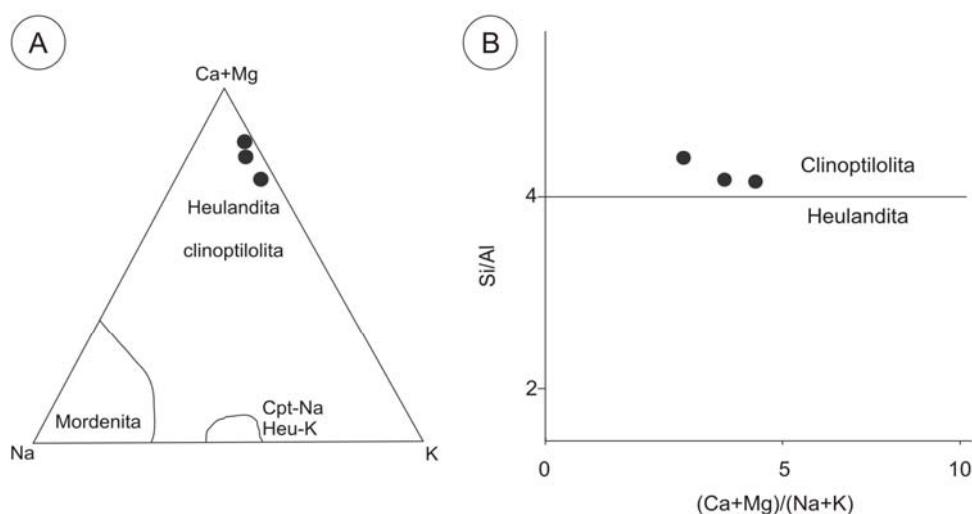


Figura12: Diagrama de composição das zeolitas que preenchem as bordas das vesículas do Derrame Miolo. A. diagrama ternário (Ca+Mg) – Na – K. B – análise da composição dos minerais do grupo da zeolita (Ca+Mg)/(Na+K) vs Si/Al. Dados de microsonda eletrônica cujo erro < 10%).

Tabela 4: Análises químicas por microsonda eletrônica das zeolitas da região de São Martinho da Serra, RS.

Amostra	13M	13M	13M
Análise	166	175	183
Zeolita	Clin	Clin	Clin
SiO ₂	65,88	63,96	62,87
Al ₂ O ₃	12,16	13,00	12,37
FeO	0,22	0,75	0,36
MgO	0,59	1,42	0,61
CaO	4,71	4,43	5,13
Na ₂ O	0,07	0,05	0,05
K ₂ O	1,37	1,11	1,24
Total	85,00	84,72	82,63
Oxigênio	72	72	72
Si	29,57	28,88	29,15
Al	6,43	6,92	6,76
Fe	0,08	0,28	0,14
Mg	0,39	0,96	0,42
Ca	2,27	2,14	2,55
K	0,78	0,64	0,73
Si/Al	4,59	4,17	4,31
E(%)	5,68	4,69	2,69

O argilomineral que ocupa o centro das vesículas, antes ocupado parcialmente ou totalmente por clinoptilolita, é a celadonita (tabela 5). O diagrama de Meunier *et al.*, (1991) demonstra que as análises pontuais plotam no campo da celadonita (fig.13).

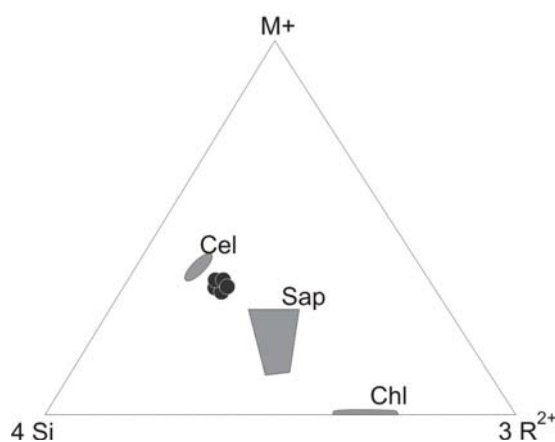


Figura 13: Classificação dos argilominerais no diagrama proposto por Meunier *et al* (1991) $M^+ - 4Si - 3R^2$ ($M^+ = 2Ca+Na+K$; $4Si = Si/4$; $3R^2 = (Fe^{2+} + Mg + Mn)/3$).

Legenda: sap: saponita, chl: clorita cel: celadonita.

Tabela 5: Análises químicas por microsonda eletrônica dos argilominerais da região de São Martinho da Serra, RS.

Amostra	13M	13M	13M	13M	13M	13M	13M	13M
Análise	167	168	169	170	171	172	173	174
Argila	Cel	Cel	Cel	Cel	Cel	Cel	Cel	Cel
SiO ₂	53,36	53,53	53,23	53,62	53,67	53,69	53,83	53,93
Al ₂ O ₃	3,25	3,60	4,46	3,63	3,70	4,30	3,97	4,37
FeO	22,91	22,17	20,76	22,58	22,29	22,14	21,86	21,56
MgO	3,33	3,67	4,02	3,53	3,53	3,38	3,63	3,70
TiO ₂	0,04	0,03	0,02	0,04	0,03	0,02	0,01	0,02
MnO	0,02	0,03	0,03	0,03	0,02	0,04	0,03	0,01
CaO	0,06	0,06	0,07	0,02	0,05	0,03	0,02	0,07
Na ₂ O	0,00	0,03	0,01	0,00	0,02	0,02	0,02	0,04
K ₂ O	10,18	10,03	9,59	10,19	10,29	10,05	10,17	10,18
Total	93,14	93,16	92,18	93,64	93,61	93,66	93,55	93,88
Oxigênios	11	11	11	11	11	11	11	11
Si	4,10	4,09	4,07	4,08	4,09	4,07	4,09	4,07
Al_T	-0,10	-0,09	-0,07	-0,08	-0,09	-0,07	-0,09	-0,07
sum4	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
Al_O	0,39	0,41	0,47	0,41	0,42	0,46	0,44	0,46
Fe_2	1,47	1,42	1,33	1,44	1,42	1,40	1,39	1,36
Mg_P1	0,38	0,42	0,46	0,40	0,40	0,38	0,41	0,42
Ti	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mn	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
sum6	2,25	2,25	2,26	2,25	2,24	2,25	2,24	2,24
Mg_P2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ca	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
Na	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
K	1,00	0,98	0,93	0,99	1,00	0,97	0,99	0,98
M ⁺	1,01	0,99	0,95	0,99	1,01	0,98	0,99	1,00
4Si	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
3R ²⁺	0,62	0,61	0,60	0,61	0,61	0,60	0,60	0,59

A identificação dos minerais no interior das vesículas e interpretação da ordem de formação destes minerais é essencial para o entendimento da origem da ágata. A seqüência de cristalização dentro das vesículas é (da borda para o núcleo): zeolitas (mordenita, clinoptilolita) e argilomineral (celadonita). A figura 14 é um croqui esquemático que ilustra a seqüência.

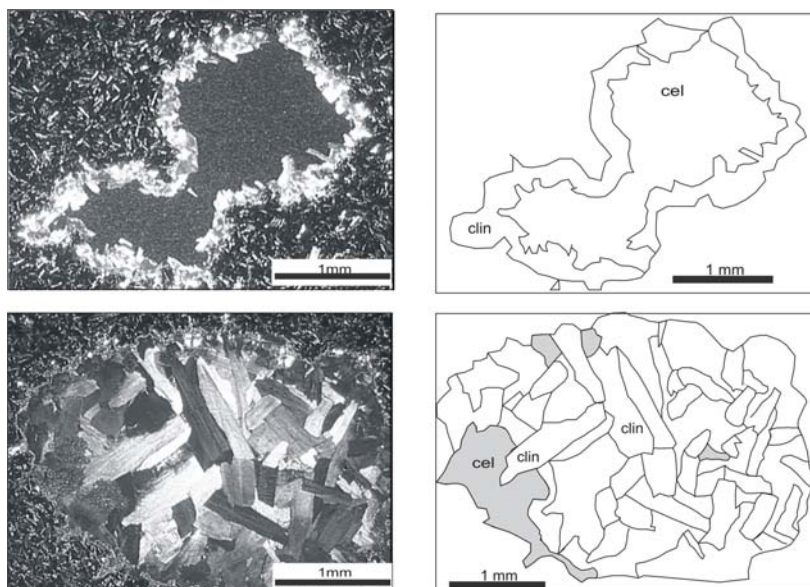


Figura 14: Croqui esquemático com a seqüência de formação dos minerais nas vesículas do Derrame Miolo. Legenda: cel: celadonita, Clin: clinoptilolita.

A identificação de outros minerais secundários que não foram analisados por microsonda eletrônica foi realizada por difração de raio x, onde foram identificados mordenita, esmectita, illita e cristobalita (fig. 15)

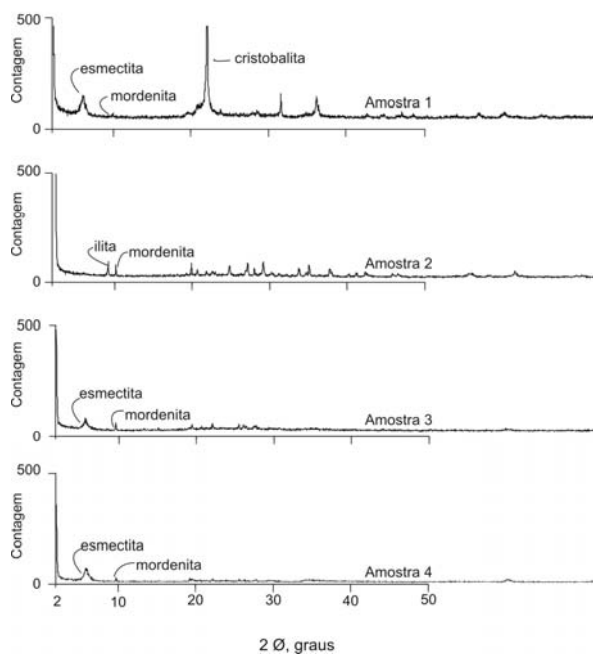


Figura 15: XRD para identificação dos argilominerais e das zeolitas que preenchem as vesículas do Derrame Miolo.

Sequência de processos mineralizantes

As relações geológicas entre o basalto, os diques de arenito e as cavidades parcialmente preenchidas com clinoptilolita, arenito, ágata, quartzo incolor e ametista nos depósitos explorados a céu-aberto em São Martinho da Serra, RS, mostram uma seqüência definida de processos atuantes (fig.16).

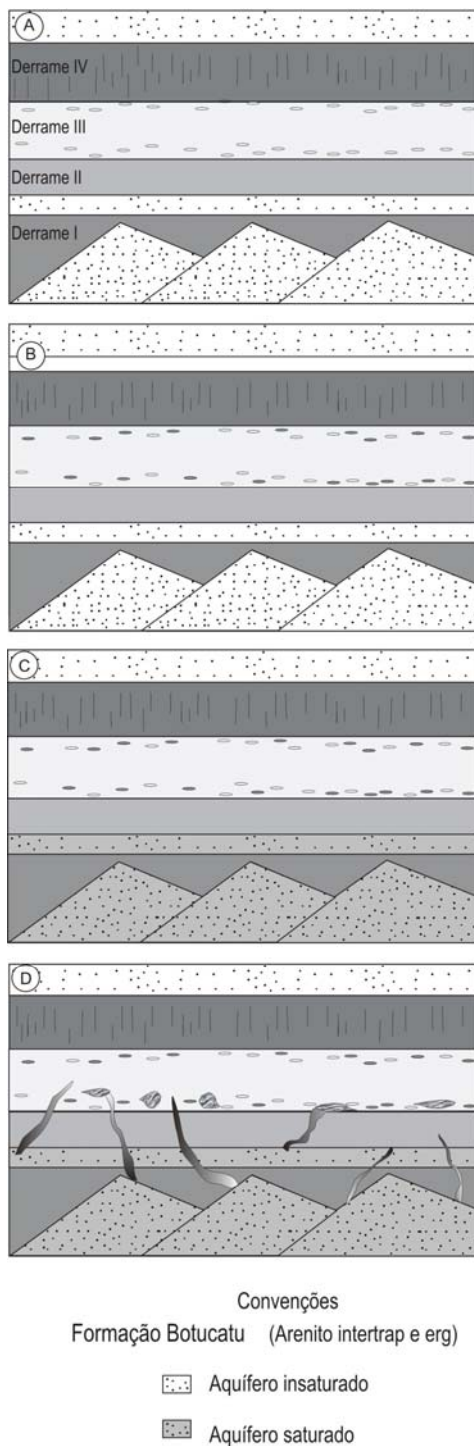


Figura 16: A: Derrame da lava e formação das vesículas na base e no topo. B: Preenchimento parcial das vesículas com mordenita e clinoptilolita. C: Saturação do

aqüífero com água e superpressão do selo basáltico. D: Abalo sísmico, com injeção da água no selo, e contínuo fluxo de água pelas fraturas e pela areia, promovendo agatização, dissolvendo e redepositando Si na forma de ágata em vários locais. Este fluxo primeiramente abre algumas cavidades, zeolitas são dissolvidas, ocorrendo o preenchimento das vesículas por ágata, celadonita e areia.

A gênese do depósito inicia com o extravasamento de lava basáltica, com a formação de um corpo de rocha com 11 m de espessura. A desgaseificação da lava, em temperatura superior a 1150 °C, com a formação de bolhas de gás com tamanhos médios de 3,0 cm variando entre 0,1-10,0 cm. As vesículas formadas são achatadas na vertical e indicam a direção de movimentação da lava. O processo segue com o arrefecimento da temperatura da lava até aproximadamente 150 °C e a percolação de fluidos hidrotermais, com deposição de fina (1 mm) camada de clinoptilolita no contorno externo das vesículas, sendo que algumas vesículas estão preenchidas totalmente, outras parcialmente.

O disparo de repetidos abalos sísmicos, com a conseqüente fluidização da areia das dunas subjacentes ao derrame basáltico (paleo-deserto Botucatu) faz com que a areia seja fluidizada e injetada no derrame basáltico formando diques clásticos e injetitos variados além de preencher parcialmente ou totalmente algumas vesículas (agora amígdalas). Celadonita é precipitada do fluido hidrotermal junto com a areia, e preenche algumas amígdalas.

A contínua percolação de fluidos hidrotermais, a baixa temperatura, causa a formação de novas cavidades (10-50 cm) por expansão de bolhas de gás, a partir de fluidos aquosos originados no paleo-aqüífero Guarani. A superfície de contato entre o arenito e o basalto serve de conduto para os fluidos e é a localização preferencial dos geodos.

As novas cavidades, e algumas vesículas já existentes, são preenchidas com ágata, quartzo incolor e ametista, e celadonita, precipitados a partir dos fluidos hidrotermais. As cavidades (10-50 cm) não têm zeolitas na borda, portanto as cavidades não existiam quando as zeolitas depositaram. Os fluidos hidrotermais percolam a 100-150 °C através da areia subjacente e dos injetitos, agatizando a matriz dos arenitos e dissolvendo parte da sílica. O fluido percola pelas fraturas e atinge as vesículas, o que faz com que ocorra a dissolução das zeolitas existentes nas bordas das fraturas. O soluto do fluido

hidrotermal reprecipita nas vesículas, em substituição as zeolitas, formando as ágatas do depósito de São Martinho da Serra. A ocorrência de novos abalos, seguidos da continuação da deposição de areia e o novo derrame de lava do tipo II finalizam a gênese do depósito. Um croqui esquemático representando a gênese do depósito é apresentado na figura 17.

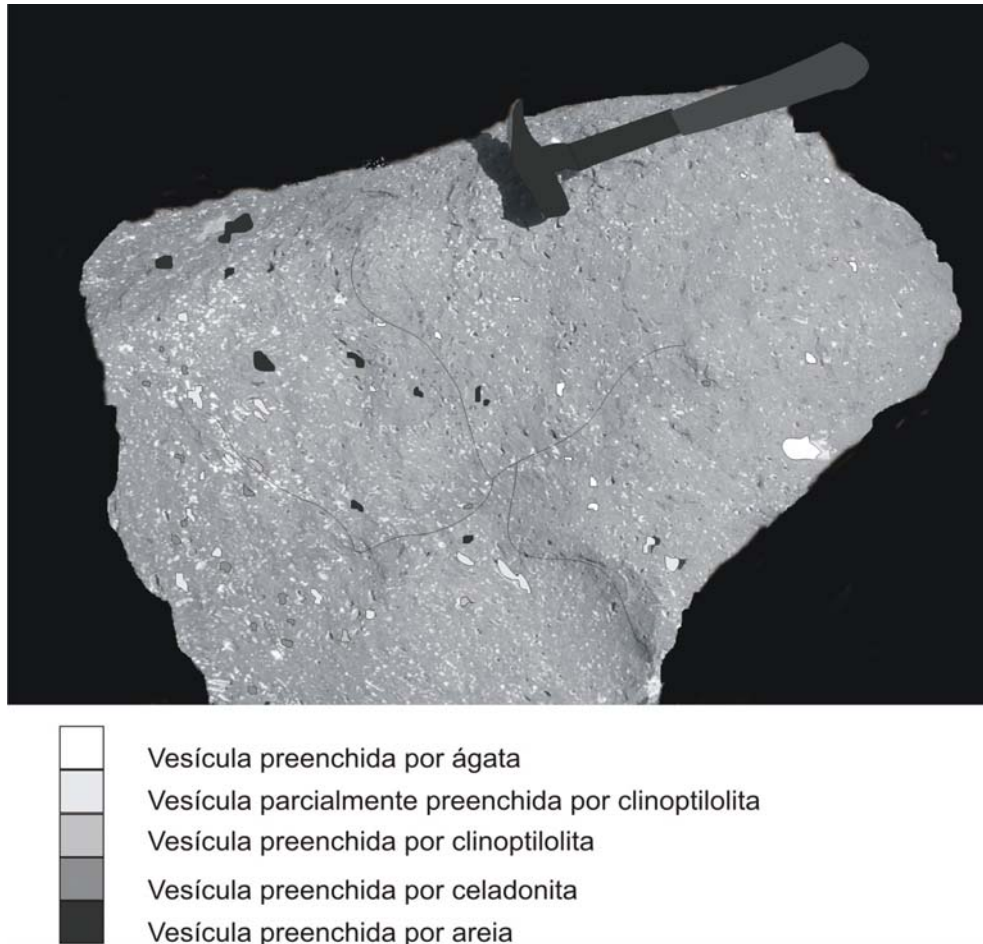


Figura 17: Fotografia que sintetiza a gênese do depósito.

Conclusões

A interação arenito-basalto não é peperítica, pois houve a deposição de uma fina camada de zeolitas na borda externa das vesículas. Somente após esse processo, ocorreu a injeção dos diques clásticos de areia e o preenchimento da parte interna de algumas amígdalas.

A fluidização da areia ocorreu devido a abalos sísmicos, não por explosão freato-magmática. São observadas brechas explosivas ao longo dos diques clásticos, demonstrando que a areia do paleo-erg já estava saturada em água no momento do

terremoto. A areia preencheu vesículas pré-existentes, rachaduras causadas pela movimentação anterior da lava a alta temperatura e espaços abertos durante os abalos sísmicos. Há algumas fraturas subhorizontais (15 cm espessura), preenchidas por ágata e quartzo e contendo fragmentos angulosos de basalto, parecem devidas ao soerguimento do teto do derrame por super-pressão de fluido hidrotermal e explosão hidráulica decorrente. A pressão do fluido tem que continuar alta, após a explosão, para manter a fratura aberta (teto soerguido) enquanto os fluidos hidrotermais percolam e depositam os minerais de preenchimento da fratura.

A seqüência de formação das cavidades e conseqüente preenchimento demonstram a origem hidrotermal dos geodos de ágata, sendo o preenchimento das vesículas com zeolitas e celadonita um evento inicial em relação à substituição completa ou parcial destes minerais por ágata ou areia.

Agradecimentos

Esta investigação foi financiada pelo projeto “Pesquisa mineral e impactos ambientais dos recursos hídricos da exploração mineral de ametista no município de São Martinho da Serra”, FAPERGS, coordenado por Carlos Alberto da Fonseca Pires e teve apoio parcial do projeto de excelência PRONEX-FAPERGS/CNPq sobre “Minerais estratégicos do sul do Brasil”, coordenado por Léo Afraneo Hartmann. Agradecemos a Thomas Theye e Hans-Joachim Massonne pela oportunidade em realizar as análises de microsonda eletrônica no Institut für Mineralogie und Kristallchemie, Universität Stuttgart, Stuttgart, Alemanha. A primeira autora agradece ao CNPq pela bolsa de mestrado concedida durante a realização deste estudo.

Referências

- 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 thr Paraná Plateau (Brazil): mineralogical nad petrochemical relationships. **Journal of Petrology** **27**: 915-944.
- Bossi, J.& Caggiano, W. 1974. Contribuição a la geologia de los yacimientos de amatista del Departamento de artigas (Uruguay). In: Congresso Brasileiro de Geologia, 28., 1974, Porto Alegre, RS. **Anais...** Porto Alegre, SBG, v.3, P. 301-318.
- Gilg, H.A., Morteani, G., Kostitsyn, Y., Preinfalk, C., Gatter, I., Strieder, A.J. 2003. Genesis of amethyst geodes in basaltic rocks of the Serra Geral Formation (Ametista do Sul, Rio Grande do Sul, Brazil): a fluid inclusion, REE, oxygen, carbon, and Sr isotope study on basalt, quartz, and calcite. **Mineralium Deposita** **38**: 1009-25.
- Jerram D. A., Stollhofen H. 2002.Lava-sediment interaction in desert settings; are all peperite-like textures the result pf magma – water interaction? **Journal of Volcanology and Geothermal Research** **114**: 231-249.
- Jonk, R., Parnell, J., Hurst, A. 2005. Aqueous and petroleum fluid flow associated with sand injectites. **Basin Research** **17**: 241-255.
- Leake, B. E. 1997.Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Minaral Names. **American Mineralogist**, 82:1019-1037.
- Lopes, A. P.; Hartmann, L. A. 2003.O platô oceânico Mina da Palma no Domínio São Gabriel, Escudo Sul-riograndense. **Pesquisas em Geociências**, **30(1)**:27-39
- Meunier, A.; Inoue, A.; Beaufort, D.; 1991 Chemiographic analysis of trioctahedral smectite-to-clorite conversion series from the Ohyu Caldera, Japan. **Clay and Clay Minerals**, **39**:409-415.
- MINPET: Mineralogical and Petrological analisys software, versão 2.02 (1997).
- Morimoto, N.; Fabries, J.; Ferguson, A.K.; Ginzburg, I. V.; Ross, M.; Seifert, F. A.; Zussman, J.; Aoki, K. & Gottardi, G. 1988. Nomenclature of Pyroxenes. **American Mineralogist**, **73**:1123-1133.
- Netoff, D. 2002. Seismogenically induced fluidization of Jurassic erg sands, south-central Utah. **Sedimentology**, **49**, 65–80.

- Peate, D.W; Hawkesworth, C.J.; Mantovani, M.S.M. 1992. Chemical stratigraphy of the Paraná lavas (South America): classification of magma types and their spatial distribution. **Bulletin of Volcanology**, **55**:119-139,
- Pe-Piper, G. 2000. Mode of occurrence, chemical variation and genesis of mordenite and other associated zeolites from Morden, Nova Scotia. **Canadian Mineralogist** **38**: 1215-1232
- Petry, C.; Jerram, D.A.; Almeida, D.P.M.; Zerfass, H. 2007. Volcanic-sedimentary features in the Serra Geral Fm., Paraná Basin, Southern Brazil: Examples of dynamic lava-sediment interactions in an arid setting. **Journal of Volcanology and Geothermal Research** **159**: 313-325.
- Richter, D. 1966. On the New Red Sandstone Neptunian Dykes of the Tor Bay Area (Devonshire). **Proc. Geology Association** **77**: 173-186.
- Schenato, F. ; Formoso, M. L. L. ; Dudoignon, P. ; Meunier, A. ; Proust, D. ; MAS, A. 2003. Alteration process of a thick basaltic lava flow of the Paraná basin (Brazil): petrographic and mineralogical studies. **Journal of South American Earth Sciences** **16(5)**: 423-443.
- Skilling, I.P., White, J.D.L., McPhie, J., 2002. Peperite: a review of magma-sediment mingling. In: Skilling, I.P., White, J.D.L., McPhie, J. (Eds), Peperite: processes and products of magma-sediment mingling. **Journal of Volcanology Geothermal Research.**, **114**:1-17.
- Stewart, k., Turner, S., Kelley, S., Hawkesworth, C., Kirstein, L. and Mantovani, M., 1996. 3-d $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronology in the Paraná continental flood basalt province: **Earth and Planetary Science Letters**, **143**: 95-109.
- Strieder, A.J., Heemann, R. 2006. Structural constraints on Paraná basalt volcanism and their implications on agate geode mineralization (Salto do Jacuí, RS, Brazil). **Pesquisas em Geociências** **33**: 37-50.
- Waterston, C. D. 1950. Note on the sandstone injections of Eathie Haven, Cromarty. **Geology Magazine** **87**: 133-139.
- Whitham, A. G; Morton, A. C. & Fanning, C. 2004. Insights into Cretaceous – Palaeocene sediment transport paths and basin evolution in the North Atlantic from a heavy mineral study of sandstone from southern East Greenland. **Petrology Geoscience** **10**: 61-72.

3 Análise integradora

As relações geológicas entre o basalto, os diques de arenito e as cavidades parcialmente preenchidas com zeolitas, arenito, ágata, quartzo incolor e ametista nos depósitos explorados a céu-aberto em São Martinho da Serra, RS, mostram uma seqüência definida de processos atuantes.

A gênese do depósito inicia com o derramamento de lava basáltica, com a formação de um corpo de rocha com 8 m de espessura. A desgaseificação da lava, em temperatura superior a 1150 °C, com a formação de bolhas de gás com tamanhos médios de 3,0 cm mas variando entre 0,1-10,0 cm. As vesículas formadas são achatadas na vertical e indicam a direção de movimentação da lava. O processo segue com o abaixamento da temperatura da lava a menos de 100 °C e a percolação de fluidos hidrotermais, com deposição de fina (1 mm) camada de zeolitas no contorno externo das vesículas, sendo algumas vesículas preenchidas totalmente.

O Disparo de repetidos abalos sísmicos, com a conseqüente fluidização da areia das dunas subjacentes ao derrame basáltico (paleo-deserto Botucatu) faz com que a areia seja fluidizada e injetada no derrame basáltico formando diques clásticos e injetitos variados além de preencher parcialmente ou totalmente algumas vesículas (agora amígdalas). Celadonita é precipitada do fluido hidrotermal junto com a areia, e preenche algumas amígdalas.

A contínua percolação de fluidos hidrotermais, a baixa temperatura, causa a formação de novas cavidades (10-50 cm) por expansão de bolhas de gás, a partir de fluidos aquosos originados no paleo-aquífero Guarani. A superfície de contato entre o arenito e o basalto serve de conduto para os fluidos e é a localização preferencial dos geodos.

As novas cavidades, e algumas vesículas já existentes, são preenchidas com ágata, quartzo incolor e ametista, precipitados a partir dos fluidos hidrotermais. As cavidades (10-50 cm) não tem zeolitas na borda, portanto as cavidades não existiam quando as zeolitas depositaram. Os fluidos hidrotermais percolam a 100-150 °C através da areia subjacente e dos injetitos, agatizando a matriz dos arenitos e dissolvendo parte da sílica. O fluido percola pelas fraturas e atinge as amígdalas, o que faz com que ocorra a dissolução das zeolitas existentes nas bordas das fraturas. O soluto do fluido hidrotermal reprecipita nas amígdalas, em substituição às zeolitas, formando as ágatas do depósito de São Martinho da Serra.

A ocorrência de novos abalos, seguidos da continuação da deposição de areia e o novo derrame de lava do tipo II finalizam a gênese do depósito.

Com a análise integrada dos resultados de campo, petrografia, microsonda eletrônica e difração de raio x é possível corroborar com os seguintes argumentos:

1. A interação arenito-basalto não é peperítica, pois houve a deposição de uma fina camada de zeolitas na borda externa das vesículas. Somente após esse processo, ocorreu a injeção dos diques clásticos de areia e o preenchimento da parte interna de algumas amígdalas.
2. A fluidização da areia ocorreu devido a abalos sísmicos, não por explosão freato-magmática. São observadas brechas explosivas ao longo dos diques clásticos, demonstrando que a areia do paleo-erg já estava saturada em água no momento do terremoto. A areia preencheu vesículas pré-existentes, rachaduras causadas pela movimentação anterior da lava a alta temperatura e espaços abertos durante os abalos sísmicos.
3. Há algumas fraturas subhorizontais (15 cm espessura), preenchidas por ágata e quartzo, e contendo fragmentos angulosos de basalto. Parecem devidas ao soerguimento do teto do derrame por super-pressão de fluido hidrotermal e explosão hidráulica decorrente. A pressão do fluido tem que continuar alta, após a explosão, para manter a fratura aberta (teto soerguido) enquanto os fluidos hidrotermais percolam e depositam os minerais de preenchimento da fratura.