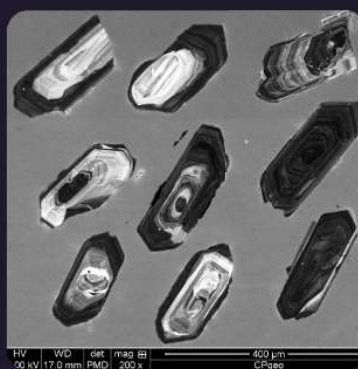


SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA

CONTRIBUIÇÕES À GEOLOGIA DO RIO GRANDE DO SUL E DE SANTA CATARINA

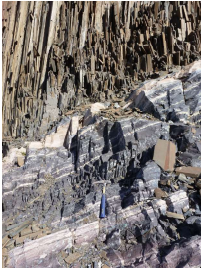
ANDRÉA RITTER JELINEK
CARLOS AUGUSTO SOMMER



IMAGENS DE CAPA E CONTRACAPA



Fotografia aérea do setor norte da Serra do Segredo, em Caçapava do Sul, RS, onde se destacam a Pedra do Segredo, em primeiro plano, e a Pedra da Abelha, logo à esquerda, geofórmulas esculpidas sobre conglomerados fluviais da Bacia do Camaquã. Ao fundo, alguns cerros formados por rochas metamórficas e o imponente alto de Caçapava, sobre granitoides diversos, rochas que registram diferentes momentos do Ciclo Brasileiro no sul do Brasil. A paisagem faz parte do Geoparque Caçapava Aspirante Unesco e é parcialmente inserida no Parque Natural Municipal da Pedra do Segredo. Imagem obtida por Felipe Guadagnin. Legenda de André Weissheimer de Borba e Felipe Guadagnin.



Contato entre rochas sedimentares da Bacia do Paraná e soleira de diabásio do Grupo Serra Geral. Pedreira Carollo, região de Montenegro, RS. Imagem e legenda de Carlos Augusto Sommer.

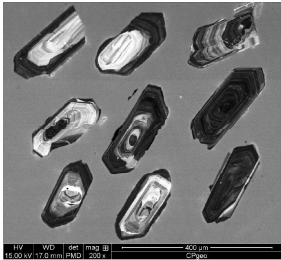


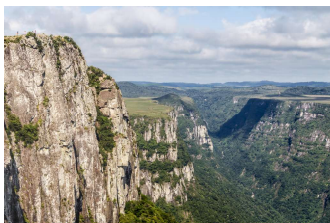
Imagem de catodoluminescência de cristais de zircão pertencentes ao Batólito de Florianópolis. Aumento de 200 vezes. Imagem e legenda de Andréa Ritter Jelinek.



Fotografia aérea oblíqua apresentando a morfologia da região correspondente ao extremo do Litoral Norte do RS, à direita observa-se a cidade de Torres/RS. Em primeiro plano observa-se a morfologia do campo de dunas localizado no Parque Estadual de Itapeva. Unidade essa localizada sobre o sistema Laguna-Barreira IV (holocênico). Logo após o baixio, na retaguarda do campo de dunas, ocorre a morfologia do sistema Laguna-Barreira III (pleistocênico). Ao fundo, com o relevo mais elevado, encontra-se a Formação Serra Geral pertencente à Bacia do Paraná. Imagem obtida por Eduardo H. R. Russo. Legenda de Eduardo Guimarães Barboza.



Minas do Camaquã, Mineração de cobre a céu aberto, Caçapava do Sul. Imagem e legenda de Carlos Augusto Sommer.



Derrames ácidos do Grupo Serra Geral, Bacia do Paraná, na região do Cânion Fortaleza, Parque Nacional da Serra Geral, Cambará do Sul, RS. Imagem licenciada de Depositphotos. Legenda de Carlos Augusto Sommer.



PUBLICAÇÃO ESPECIAL DO NÚCLEO RS/SC DA
SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA

**CONTRIBUIÇÕES À GEOLOGIA
DO RIO GRANDE DO SUL E
DE SANTA CATARINA**

Editores

Andréa Ritter Jelinek
Carlos Augusto Sommer



Porto Alegre, RS, 2021.

É proibida a reprodução total ou parcial desta obra, sem autorização expressa dos autores ou da editora. A violação importará nas providências judiciais previstas no artigo 102, da Lei nº 9.610/1998, sem prejuízo da responsabilidade criminal. Os textos deste livro são de responsabilidade de seus autores.

ISBN E-book: 978-65-89013-03-7

Edição: 1ª

Ano: 2021

Editora Compasso Lugar Cultura

Responsável André Suertegaray Rossato

Porto Alegre - RS - Brasil

Telefones (51) 984269928

compassolugarcultura@gmail.com

www.compassolugarcultura.com

Editores:

Andréa Ritter Jelinek

Carlos Augusto Sommer

Diagramador: Gabriel Zambom

Revisão de Texto: Gustavo Saldivar

Conselho Editorial Compasso Lugar Cultura

Álvaro Heidrich

Carlos Henrique Aigner

Cláudia Luíza Zeferino Pires

Dakir Larara Machado da Silva

Dilermando Cattaneo da Silveira

Dirce Maria Antunes Suertegaray

Helena Copetti Callai

Jaeme Luiz Callai

João Osvaldo Rodrigues Nunes

Laurindo Antonio Guasselli

Maíra Suertegaray Rossato

Nelson Rego

Roberto Verdum

Rosa Maria Vieira Medeiros

Sinthia Batista

Realização

Sociedade Brasileira de Geologia

Diretoria Núcleo RS/SC:

Diretora Presidente: Andréa Ritter Jelinek

Diretor Vice-Presidente: Carlos Augusto Sommer

Diretor Secretário: Lucas Debatin Vieira

Diretor Financeiro: Breno Leitão Weichel

Diretora de Programação Técnico-Científica: Rosemary Hoff

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

J47c

Jelinek, Andréa Ritter.

Contribuições à Geologia do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina /Andréa Ritter Jelinek e Carlos Augusto Sommer, organização – Sociedade Brasileira de Geologia - Porto Alegre : Compasso Lugar-Cultura, 2021.

504 p., il. col.

ISBN E-book: 978-65-89013-03-7

<https://doi.org/10.29327/537860>

1. Geologia 2.Sociedade Brasileira de Geologia 3. Coletâneas de textos I. Jelinek, Andréa Ritter II. Sommer, Carlos Augusto III. Título

CDD 551

CDU 551.1/.4

Bibliotecária Responsável: Catarina Strapação Guedes Vianna CRB-10/2469

Índices para catálogo sistemático:

1. Geologia 551

Depósitos de ametista do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina

Lauren da Cunha **Duarte**^{1*}, Léo Afraneo **Hartmann**²,
Pedro Luiz **Juchem**¹, Larissa Lanes **Tononi**²

¹ Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

² Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

*autor correspondente: lauren.duarte@ufrgs.br

1 INTRODUÇÃO

A ametista – variedade de quartzo de cor violeta – é a mais apreciada e valorizada, entre os minerais da família da sílica, sendo utilizada desde a Antiguidade, quando era proveniente do Egito, do sudeste asiático, dos Montes Urais e de parte do oeste europeu (Fron del, 1962; O’Donoghue, 1987). Atualmente, entre os vários países produtores, o Brasil é um dos maiores fornecedores mundiais desse bem mineral, destacando-se o Rio Grande do Sul como o maior produtor nacional, devido à qualidade e ao volume produzido.

A maioria dos materiais gemológicos do Rio Grande do Sul está associado às rochas do Grupo Serra Geral, da Bacia do Paraná, sendo a ametista uma das gemas mais importantes, com o mesmo tipo de depósito ocorrendo, também, em Santa Catarina. A Figura 1 mostra as principais unidades geológicas do RS e de SC, com a localização dos principais depósitos de ametista (em exploração ou que mostram potencial de aproveitamento econômico), indicando, ainda, as quatro principais regiões de extração desse bem mineral. Nesses depósitos, a ametista ocorre preenchendo cavidades centimétricas a métricas (geodos), podendo ocorrerem associados ágata, ônix, cornalina, cristal de rocha, quartzo rosa, calcita, gipsita, barita, jaspe, apofilita, zeólitas e opala. Esses minerais são aproveitados economicamente nos mercados brasileiro e internacional, como minerais de coleção, como gemas ornamentais ou como gemas lapidadas.

Muitos trabalhos acadêmicos foram desenvolvidos, para o entendimento das condições de mineralização destes importantes depósitos de classe mundial do Brasil (*e.g.* Gomes, 1996; Scopel, 1998; Juchem, 1999; Gilg *et al.*, 2003, 2014; Proust & Fontaine, 2007a, 2007b; Juchem *et*

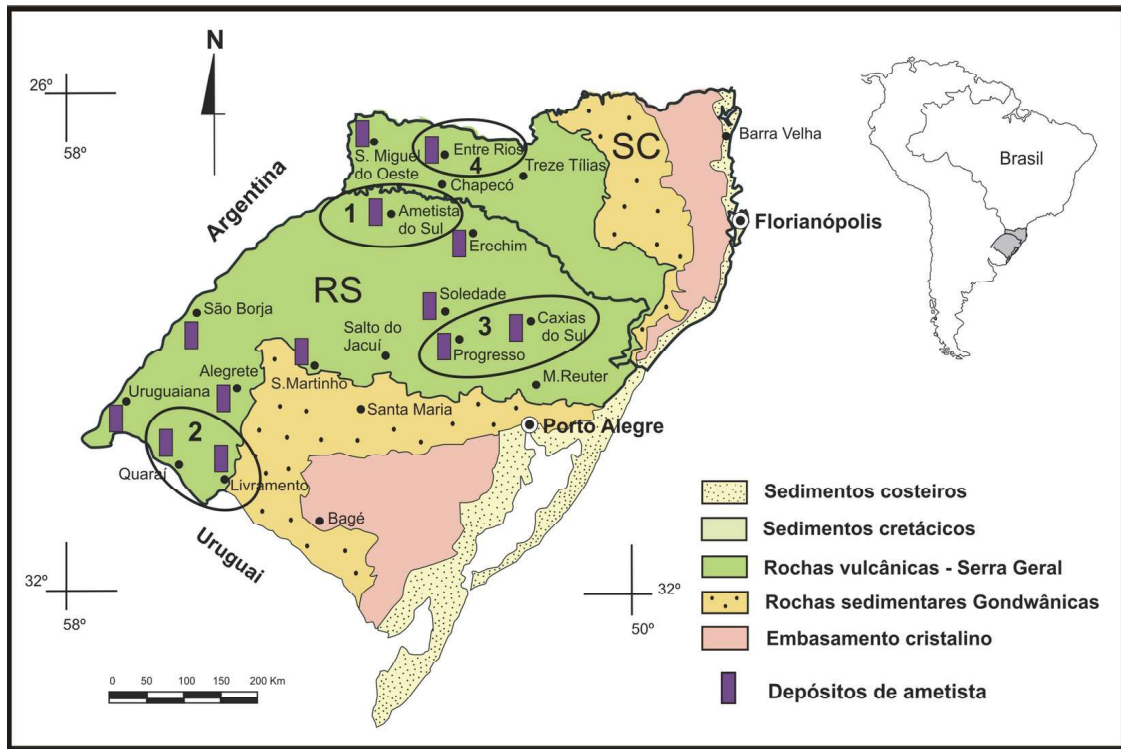


Figura 1 – Esboço geológico do RS e de SC, com a localização dos principais depósitos de ametista, indicando as quatro regiões, em que, atualmente, existe extração desse bem mineral: 1) Distrito Mineiro de Ametista do Sul; 2) Região da Fronteira Oeste do RS; 3) Região de Nova Bréscia-Progresso e Caxias do Sul; e 4) Região de Entre Rios (SC) (modificado de Juchem, 2014).

al., 2009; Hartmann *et al.*, 2010, 2012a, 2015; Juchem & Hartmann, 2011; Rosentengel & Hartmann, 2012; Pertille *et al.*, 2013) e, também, do Uruguai (Bossi & Caggiano, 1974; Duarte, 2008; Duarte *et al.*, 2009, 2010; Techera, 2009), que possui continuidade com os depósitos da fronteira sudoeste do RS. Questões referentes aos episódios de mineralização e à cronologia dos eventos ainda são investigadas, com hipóteses distintas para esses importantes depósitos mine-rais.

O material gemológico explorado e que é comercializado, inclui, preferencialmente, geodos preenchidos por ametista de boa qualidade. Para materiais com caracte-rísticas estéticas de qualidade inferior, po-dem ser feitos tratamentos, para melhoria e para modificação da cor (Fischer, 1999; To-noni *et al.*, 2020), que geram considerável in-cremento de valor comercial.

2 GEOLOGIA DOS DEPÓSITOS

2.1 Distrito Mineiro de Ametista do Sul

Os principais depósitos de ametista estão localizados no norte do Rio Grande do Sul, na região do Alto Uruguai, denominada Distrito Mineiro de Ametista do Sul (DMAS). A produção se concentra, principalmente, nos municípios de Ametista do Sul, de Planalto, de Frederico Westphalen, de Iraí e de Rodeio Bonito, ocorrendo também áreas de produção em Alpestre, em Cristal do Sul, em Gramado dos Loureiros e em Trindade do Sul. Em Santa Catarina, foram identificados garimpos de ametista no município de En-tre Rios, mas existem registros de depósitos explotados esporadicamente em Pinhalzi-nho, em Saudades, em Palmitos, em Maravi-lha, em São Miguel do Oeste, em Chapecó e

em São Carlos (Juchem, 1999).

Nesse distrito mineiro, foram identificados três derrames mineralizados do tipo basalto toleítico (Rosenstengel & Hartmann, 2012). O maior produtor é o derrame Veia Alta, tendo, subjacentes a ele, os derrames Veia do Meio e Veia Baixa (Fig. 2A). Esses derrames são do tipo químico Pitanga e podem ser classificados como tipo I, na classificação proposta por Gomes (1996).

Os geodos têm, em geral, dimensões decimétricas a métricas e estão parcialmente preenchidos por uma camada milimétrica a centimétrica de quartzo microcristalino (caldônia, por vezes bandada, caracterizando a variedade ágata), seguida de uma camada centimétrica de quartzo macrocristalino incolor a leitoso, que grada progressivamente para ametista. É comum ocorrer calcita crescida sobre a ametista e, mais raro, gipsita (variedade selenita), além de barita e de quartzo rosa, representando episódios de cristalização mais tardios (Fig. 3). A extração dos geodos mineralizados é feita por garim-

peiros, através de lavra subterrânea. São abertos túneis horizontais (com extensões de 100 m a 400 m) no basalto maciço, com o uso de explosivos caseiros à base de pólvora, de salitre e de carvão, e os geodos são extraídos com marteletes pneumáticos, com martelos manuais, com ponteiros e com talhadeiras (Figs. 2B e 2C) (Juchem, 1999).

O nível dos geodos mineralizados ocorre em um basalto cinza a cinza esverdeado, com poucas fraturas horizontais e verticais, às vezes irregulares, mas sempre muito espaçadas, o que confere à rocha uma porção maciça, com 2 a 3 m de espessura, denominada pelos garimpeiros de "laje". Acima da zona mineralizada, ocorre um nível de basalto cinza escuro a preto (de 0,5 a 1,0 m de espessura), com um sistema de fraturas irregulares bastante marcante, que origina blocos decimétricos, denominado pelos garimpeiros de "cascalho" e que constitui o topo das galerias subterrâneas (Fig. 2B).

O principal derrame portador, o Veia Alta (Rosenstengel & Hartmann, 2012), é um

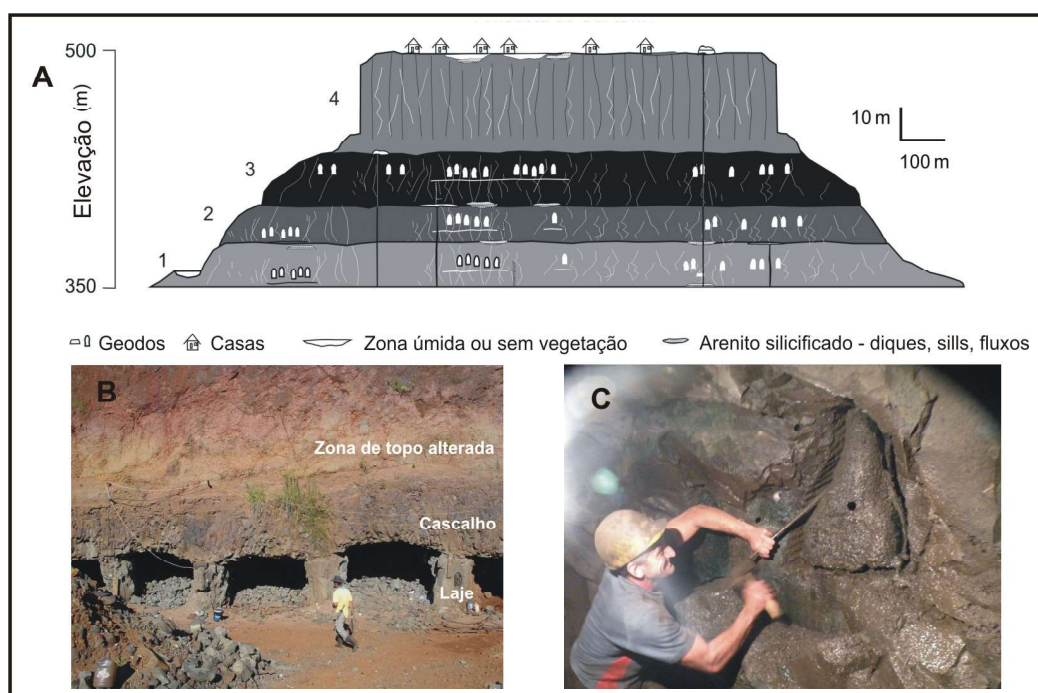


Figura 2 – Distrito Mineiro de Ametista do Sul: A) Perfil esquemático mostrando o empilhamento dos derrames mineralizados, com as principais estruturas relacionadas (modificado de Hartmann *et al.*, 2012); B) Frente de lavra mostrando o sistema de exploração em galerias subterrâneas horizontais; e C) Garimpeiro no processo de retirada de um geodo.



Figura 3 – Exemplos de geodos mineralizados com ametista e minerais associados. : A) e B) Geodos parcialmente preenchidos por ametista, partidos ao meio e expostos para comercialização – observa-se que alguns foram submetidos a tratamento térmico que transformou a ametista em citrino; em (B) o geodo maior tem 3,16 m e pode-se observar alguns cristais de calcita tardia; C) Detalhe de um geodo, com um agregado de cristais de calcita crescidos sobre ametista; D) Geodo preenchido parcialmente com quartzo incolor a leitoso e uma fase final de quartzo rosa; E) Detalhe de um geodo com um agregado radiado de cristais tabulares de barita; e F) Agregado paralelo de cristais tabulares de gipsita (variedade selenita), crescidos sobre cristais de quartzo violeta acinzentados.

basalto afanítico a afírico. A textura, em geral, é holocristalina seriada a porfirítica, podendo ser intergranular, intersertal e, por vezes, localmente glomeroporfirítica e traquítica (Fig. 6A). Ocorrem algumas vesículas milimétricas, ovóides a irregulares, preenchidas por argila de cor verde e/ou por ágata e por quartzo. Os fenocristais (0,5-1,2 mm) perfazem em torno de 5% da rocha e são de difícil identificação macroscópica, sendo constituídos por plagioclásio (An 40-60), em geral, zonados (teor de An diminuindo do centro para o bordo), e, mais raro, por augita. É comum a alteração do piroxênio para celadonita (argila verde). Muitas vezes, os fenocristais mostram feições de desequilíbrio com a matriz, produzindo reações que formam massas argilosas e óxidos de ferro nos seus bordos. Na matriz podem ocorrer as mesmas fases minerais identificadas nos fenocristais, as quais, muitas vezes, constitu-

em uma textura seriada com os fenocristais, gradando de microcristais ou micrólitos a grãos de 0,5 mm de comprimento. Além do plagioclásio e da augita, é comum a presença de minerais opacos, identificados como ilmenita e como magnetita titanífera. Todos esses minerais, em geral, estão envolvidos por uma massa muito fina, identificando-se, por vezes, pequenas porções de vidro muito alterado.

As rochas mineralizadas dessa região foram afetadas pela percolação de fluidos hidrotermais, que alteraram a matriz vítrea e os cristais de piroxênio para uma mineralogia secundária. Esta alteração hidrotermal está bem caracterizada pela percolação de fluidos das porções mais inferiores da bacia, desde a base da formação Botucatu (Gilg *et al.*, 2003). Resultante da alteração, a celadonita é um importante guia prospectivo para os garimpeiros da re-

gião e indica os estágios mais avançados dos processos de mineralização (Duarte *et al.*, 2010).

2.2 Região da Fronteira Sudoeste do RS (Quaraí e Livramento)

Nessa região, a sequência de derrames está em contato direto com os arenitos eólicos da Formação Botucatu (Fig. 4) e o pacote vulcânico possui por volta de 200 m de espessura. As rochas, classificadas como do fácies Alegrete, como proposto por Wildner (2003), são andesitos a andesitos basálticos, classificados como baixo-Ti, tipo Gramado, de acordo com a proposição de Peate *et al.* (1992). Essas rochas são petrograficamente semelhantes e têm continuidade estratigráfica com as rochas

mineralizadas a ametista de Artigas, no Uruguai, onde Techera (2009) identificou seis derrames. Dois desses derrames são mineralizados e denominados *Colada Catalán* e *Colada Cordillera* (Duarte, 2008), sendo *colada* a palavra em espanhol para derrame. Posteriormente, Hartmann *et al.* (2010) indicaram que os derrames são cinco, tendo a *Colada Catalán* um núcleo maciço e um nível de aproximadamente 10 m de mineralização pervasiva, e a *Colada Cordillera*, um derrame espesso, com a porção mineralizada maciça e com disjunção colunar.

Segundo Acauan (2004), os geodos mineralizados do lado brasileiro ocorrem principalmente, em colúvios e em aluviões, mas também podem ser encontrados na rocha vulcânica, com diferentes graus de alteração. Esses geodos, têm em média 40 cm de

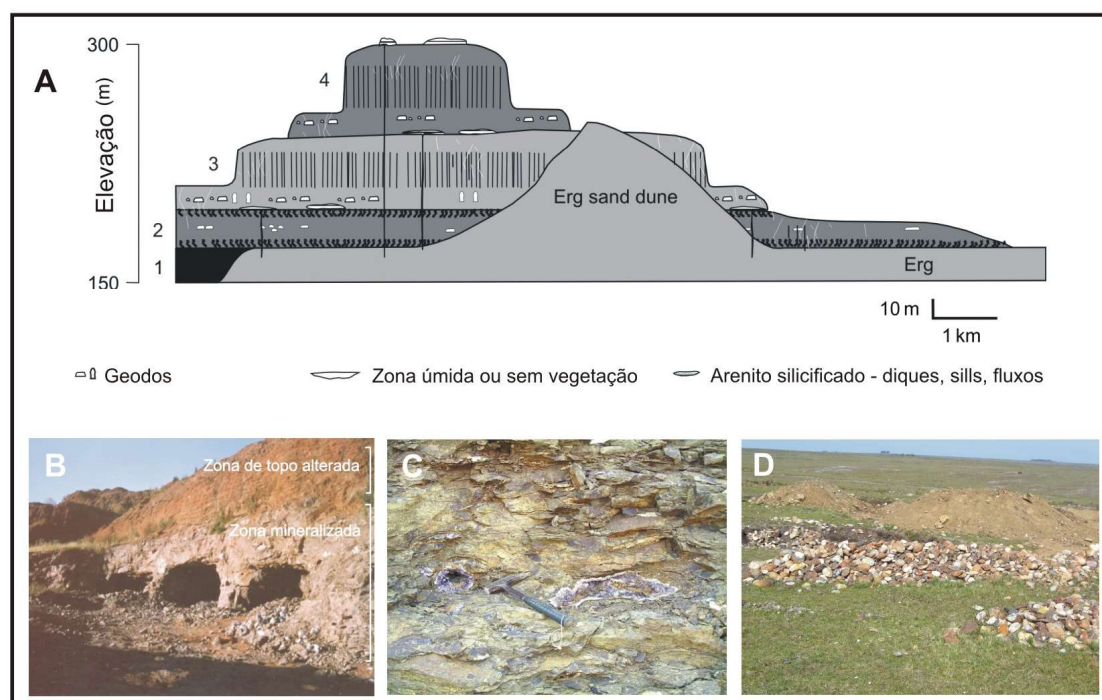


Figura 4 – Região de Quaraí/Artigas: A) Perfil esquemático, indicando os derrames mineralizados, com as principais estruturas relacionadas à mineralização e a proximidade com a Formação Botucatu (modificado de Hartmann *et al.*, 2012); B) Frente de lavra, representativa do derrame Catalán, em Artigas, em que se observa a parte superior de onde se extraem os geodos de ágata, em extração que evoluiu de lavra a céu aberto à porção desenvolvida em galerias horizontais subterrâneas, para a extração de geodos de ametista; C) Geodos mineralizados com ametista, aflorando em corte feito na rocha menos alterada, no Garimpo do Vivi, em Livramento; D) Geodos mineralizados com ágata e com ametista, extraídos do solo (camada mais superior da *Colada Catalán*) na região de Quaraí/Livramento.

diâmetro e ocorrem parcial ou totalmente preenchidos por calcedônia/ágata; quando em preenchimento parcial, essa fase microcristalina ocorre como bandas milimétricas a centimétricas, seguidas de quartzo incolor a leitoso, que grada progressivamente para ametista. Na porção brasileira, a *Colada Catalán* aflora no Garimpo do Vivi (em Livramento), uma das poucas explorações que possui um histórico de ser economicamente ativa. Na porção superior da cava, devido ao grau de alteração dessa rocha, o desmonte podia ser feito por escavadeiras, que retiraram predominantemente geodos de ágata. Desde 2009, a cava chegou na rocha mais sã e passou a ter ocorrências de geodos de ametista (Hartmann *et al.*, 2010; Bergmann *et al.*, 2020). Os cristais de ametista são, em geral, límpidos e apresentam tonalidades de cor agradáveis, com boa aceitação no mercado de gemas (Augustin *et al.*, 2007).

O derrame portador (*Colada Catalán*) é afanítico, com cor cinza escuro a avermelhado. É constituído de microfenocristais de plagioclásio e de piroxênio (por vezes, formando glomeropórfiros), dispersos em uma matriz, composta também por plagioclásio e por piroxênio, além de minerais opacos – magnetita titanífera e ilmenita. Todos esses minerais estão envoltos por uma massa de restos de vidro vulcânico alterados para argilominerais. Observam-se também, fraturas, vesículas e cavidades poliédricas preenchidas por argilominerais, além de quartzo fino e de calcedônia. Os microfenocristais de plagioclásio são labradorita (An 50-60), enquanto o plagioclásio da matriz é de composição mais sódica (An 40-50). Já o piroxênio (augita), tanto na matriz como os fenocristais, pode apresentar bordos transformados em pigeonita (Fig. 6B). A rocha mineralizada da *Colada Catalán* está intensamente alterada na zona mineralizada, destruindo principalmente a pigeonita, que é alterada para esmectita, ocupando até 60%

do volume das rochas, nas quais a alteração foi mais severa.

2.3 Região de Progresso-Nova Bréscia e Caxias do Sul

Alguns depósitos de interesse econômico ocorrem em rochas vulcânicas ácidas, em Caxias do Sul (Sirtoli *et al.*, 2005; Fianco *et al.*, 2006; Juchem, 2014) e na região entre os municípios de Progresso, de Nova Bréscia e de Fontoura Xavier (Hoppe, 2012; Juchem, 2014). Na classificação litogeoquímica proposta por Bellieni *et al.* (1986), por Peate *et al.* (1992) e por Nardy *et al.* (2008), essas rochas apresentam características do tipo magmático Palmas (ATP), com aspecto macroscópico afanítico a afírico e com textura hipohialina, ao microscópio. Várias rochas têm características petrográficas e geoquímicas do subgrupo Caxias do Sul, enquanto outras não se enquadram em qualquer um dos outros subtipos propostos (Juchem *et al.*, 2015).

Nesses depósitos, as mineralizações estão associadas a rochas vítreas, com diferentes graus de alteração. Na região de Progresso-Nova Bréscia (NB), foram estudados cinco garimpos e identificados cinco níveis mineralizados, enquanto que na região de Caxias do Sul, ocorrem mais dois níveis mineralizados (Fig. 5A). A rocha mineralizada tem uma espessura em torno de 2,0 m a 5,0 m e é constituída por uma rocha preta, de aspecto vítreo a resinoso (*pitchstone*), não alterada ou com diferentes graus de alteração. Intercaladas com esses níveis vítreos ocorrem rochas afaníticas a afíricas, de cor cinza a cinza acastanhado, com diferentes graus de alteração e que podem conter vesículas, preenchidas por calcedônia e por quartzo. Como os níveis vítreos mineralizados podem estar bem preservados, por vezes a exploração é feita em cavas horizontais subterrâneas, com 30 a 50 m de extensão

(Figs. 5C e 5D), ocorrendo, também, mineração a céu aberto, onde as rochas estão em estado mais avançado de alteração (Fig. 5B).

As rochas portadoras de ametista dos depósitos estudados são semelhantes entre si, contendo sempre vidro vulcânico em diferentes proporções, com microfenocristais de plagioclásio (labradorita/andesina) e de piroxênio (augita/pigeonita) e opacos (magnetita titanífera) e micrólitos de mesma composição, inseridos em matriz vítrea. Podem ocorrer texturas glomerporfírica e cumulo porfírica, envolvendo, principalmente, microfenocristais de plagioclásio e de piroxênio e, por vezes, opacos. Na matriz, são identificados inícios de cristalização de minerais, na forma de cristálitos fibrosos a aciculares,

dispostos por vezes em agregados radiados a esferulíticos, como núcleos de desvitrificação e como alteração para minerais argilosos (Fig. 6C). A principal diferença observada entre as rochas de aspecto vítreo em amostra de mão e as rochas afaníticas/afíricas é que as primeiras, ao microscópio, apresentam uma massa vítrea, em geral, igual ou superior a 60% do volume da rocha, enquanto nas rochas que não apresentam tal aspecto em amostra de mão, a matriz vítrea ocupa cerca de 40% do volume da rocha (Juchem, 2014). A proporção de vidro é um dos pontos relevantes para o desenvolvimento de condições de mineralização por fluidos hidrotermais no modelo epigenético (Duarte et al., 2010).

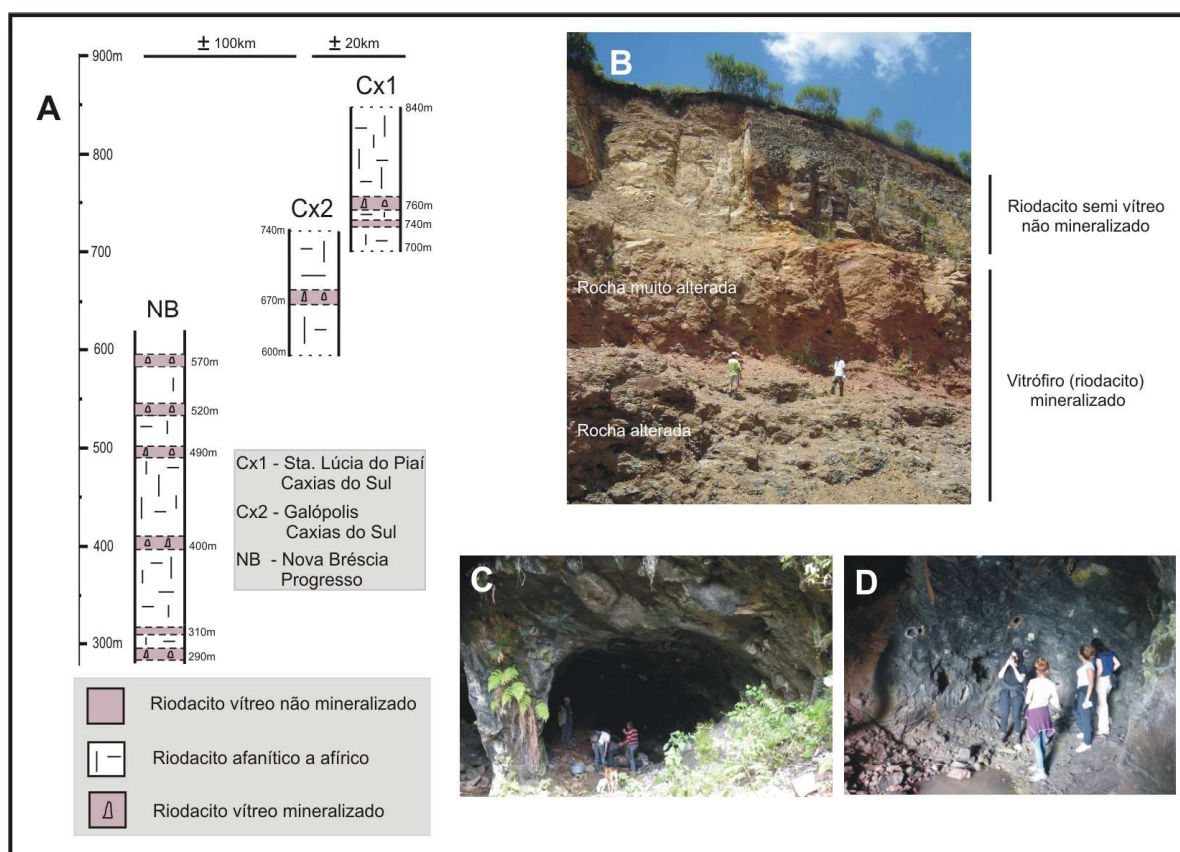


Figura 5 – Região de Progresso-Nova Brésia e Caxias do Sul: A) Perfis litológicos esquemáticos indicando o empilhamento e a distribuição dos derrames mineralizados e não mineralizados, identificados nas rochas ácidas; B) Frente de lavra a céu aberto de onde são retirados geodos de ametista em dois níveis vítreos de um vitrófiro ácido, seguidos por um nível de topo menos alterado (riódacito semi-vítreo); C) Entrada de uma galeria de extração de geodos de ametista, aberta na rocha vítrea; D) Detalhe do interior dessa galeria, onde se observa nas paredes a rocha vítrea de cor preta e geodos centimétricos mineralizados.

3 MODELOS GENÉTICOS

Os depósitos de ametista, pelo seu grande volume e pela sua importância econômica, necessitam de entendimento de seus processos de mineralização, para viabilizar a prospecção de novos depósitos econômicos. Existem diferentes hipóteses para a formação e para o preenchimento dos geodos: formação das cavidades por coalescência de fases fluidas, a temperaturas de 1150 °C; formação das cavidades por processos de dissolução e de deformação da rocha, a 150 °C; por incorporação de areia, pelo magma; por participação de fluidos hidrotermais, provenientes das litologias subjacentes; e por fluidos do próprio magma. Os processos não são excludentes entre si, podendo ser observados aspectos de um dos processos sendo corroborados por aspectos de outro.

Leinz (1949) sugeriu a presença de uma zona superior amigdaloidal nos derrames, formada pelo enriquecimento em gases sob alta pressão, que foram aprisionados, para explicar a formação dos geodos (Correa *et al.*, 1994). Trabalhos mais recentes (Proust & Fontaine, 2007a) sugerem que magmas supersaturados em água formam geodos por coalescência das fases voláteis (Correa *et al.*, 1984; Juchem, 1999; Gilg *et al.*, 2003; Scopel *et al.*, 1998; Gomes *et al.*, 2005). Magma basáltico supersaturado em água pode ser gerado pela passagem da lava sobre um substrato saturado, que, em ambientes desérticos, estaria relacionado a interdunas. Para esse modelo, o volume de voláteis seria responsável pela abertura das cavidades e o preenchimento destas se daria pelo restante do fluido, que interage com as porções vítreas da rocha, lixiviando sílica e precipitando-a nos geodos. Gilg *et al.* (2003, 2014) indicam, também, a formação dos protogeodos na fase magmática, mas com o preenchimento em estágio tardio, devido ao aporte de fluidos hidrotermais e salinos, proveniente dos arenitos da Forma-

ção Botucatu. As fontes sugeridas de sílica são as porções vítreas intersticiais da rocha hospedeira ou a sílica lixiviada das rochas sedimentares da Bacia do Paraná (*e.g.* Formação Botucatu).

Um modelo epigenético foi apresentado pela primeira vez, por Duarte *et al.* (2005). Em observações feitas nas galerias de extração em Ametista do Sul, foram identificadas fraturas sub-horizontais que acompanham toda a sua extensão, e que estão muito bem expostas na Mina da Vinícola e na Mina Ametista Parque, locais adaptados à visita turística, que tiveram os assoalhos rebaixados em relação aos assoalhos das demais galerias ativas. A ocorrência de “geodos alongados”, alojados ao longo destas fraturas, que em nada lembram as formas de bolhas de desgaseificação (Figs. 7A-7B), e, também, de geodos conectados por fraturas (Figs. 7C e 7E) e canais de preenchimento (Fig. 7F) indicam processos rúpteis atuantes durante a mineralização epigenética. A interrupção do preenchimento, pelas fases minerais, pode se dar pelo escape de fluido, associado a fraturas observadas no topo dos geodos (Fig. 7D).

Estruturas importantes relacionadas à mineralização epigenética, são as brechas na base dos geodos (Fig. 8), constituídas por blocos da rocha cimentados por calcedônia (adicionada de zeólita, no Uruguai). Na *Colada* Catalán, a brecha é cimentada por clinoptilolita e por heulandita (Duarte *et al.*, 2010). A razão $(Ca+Mg)/(Na+K)$ destas zeólitas pode indicar variação nos conteúdos de Na e de K, relacionada a variações na temperatura do fluido, durante os processos de mineralização.

O aporte de fluido hidrotermal, com temperatura da ordem de até 150 °C, consegue desenvolver explosão freática, pois excede a pressão exercida pela espessura de rocha, de até 20 m (Duarte *et al.*, 2009), gerando uma rede de fraturas sub-horizontais.

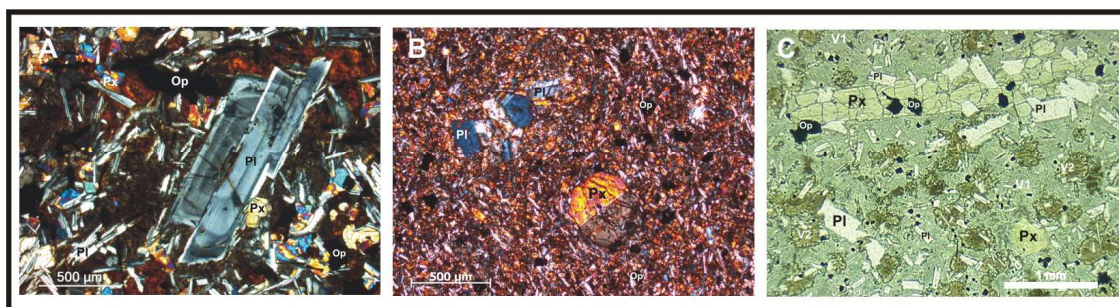


Figura 6 – Imagens representativas das características microscópicas das rochas portadoras de geodos com ametista: A) Distrito Mineiro de Ametista do Sul (RS) e da região de Entre Rios (SC) – microfenocristais de plagioclásio (pl - Na 40-60) e de piroxênio (px - augita) e opacos (op - ilmenita e magnetita titanífera), envolvidos por uma matriz de mesma composição e, por vezes, de vidro alterado; B) Região de Quaraí/Livramento – microfenocristais de plagioclásio (pl - An 50-60) e de piroxênio (px - augita/pigeonita), envolvidos por micrólitos de plagioclásio (pl - An 40-50) e de piroxênio (px - augita/pigeonita) e em uma matriz de vidro muito alterado para argilo-minerais; C) Região de Progresso-Nova Brésia e Caxias do Sul – microfenocristais e micrólitos de plagioclásio (pl - labradorita/andesina) e de piroxênio (px - augita/pigeonita) e opacos (op - magnetita titanífera), inseridos em uma matriz vítrea, com cristálitos aciculares a fibrosos (V1), com núcleos de desvitrificação e, por vezes, com cristálitos radiados (V2) e com alterações para minerais argilosos.

O derrame, para possibilitar esta sobrepressão do fluido, deve ter comportamento de um aquitardo, em relação ao Botucatu. Morteani *et al.* (2010) também indicam o papel dos derrames como o de um aquitardo. O sistema de fraturas viabiliza a continuidade de aporte do fluido, que passa a alcançar as porções maciças do derrame pela migração, através da porosidade dictitaxítica (Duarte *et al.*, 2010), ou, mesmo, por porosidade secundária, desenvolvida em derrames do tipo *pahoehoe* (Barreto *et al.*, 2017). Um intenso processo de alteração hidrotermal modifica a reologia da rocha, devido à alteração da mineralogia primária (*e.g.* pigeonita) para minerais secundários (esmectita+celadonita) (Duarte *et al.*, 2009; Rosenstengel & Hartmann, 2012). Para exceder a pressão exercida pela espessura de rocha sobrejacente, os eventos de mineralização devem ocorrer derrame-a-derrame (Duarte *et al.*, 2009), a partir de uma zona preferencial de aporte de fluidos, desde as porções mais basais da Bacia. Esta canalização de fluidos para uma região específica corrobora o fato de sempre ocorrer mais de um nível mineralizado no mesmo distrito mineiro: dois, em Artigas/Quaraí (Catalán e Cordillera); três, em Ametista do Sul (Veia Alta, Veia do Meio e Veia Baixa); e cinco,

na região de Progresso-Nova Brésia.

Para a formação dos geodos com formatos oblatos e prolatos, processos de deformação por empuxo do fluido foram simulados em *softwares* de análise de elementos finitos (Duarte, 2008; Hartmann *et al.*, 2012b; Hartmann *et al.*, 2015), indicando que uma rocha alterada para argilominerais e saturada em água pode evoluir para a abertura de vazios. O fluido migra em pulsos, desde as porções sedimentares subjacentes, até as unidades vulcânicas da Bacia do Paraná (Duarte *et al.*, 2010; Gilg *et al.*, 2014). Esses eventos são marcados por sequências e por repetições de sequências de minerais silicosos, depositados dentro dos geodos, ou por eventos de escala regional. Hartmann *et al.* (2012a) identificaram três eventos hidrotermais (H1-H2-H3), que descrevem uma sequência de eventos, relacionada ao processo epigenético de mineralização. Esses eventos são conexos ao selamento da porosidade do derrame (H1), à introdução de areia por injetitos (H2) e à formação e ao preenchimento dos geodos (H3) predominantemente pelas fases silicosas (Hartmann *et al.*, 2012a), mas, também, pelas fases carbonáticas ou sulfatadas tardias (Juchem & Hartmann, 2011).

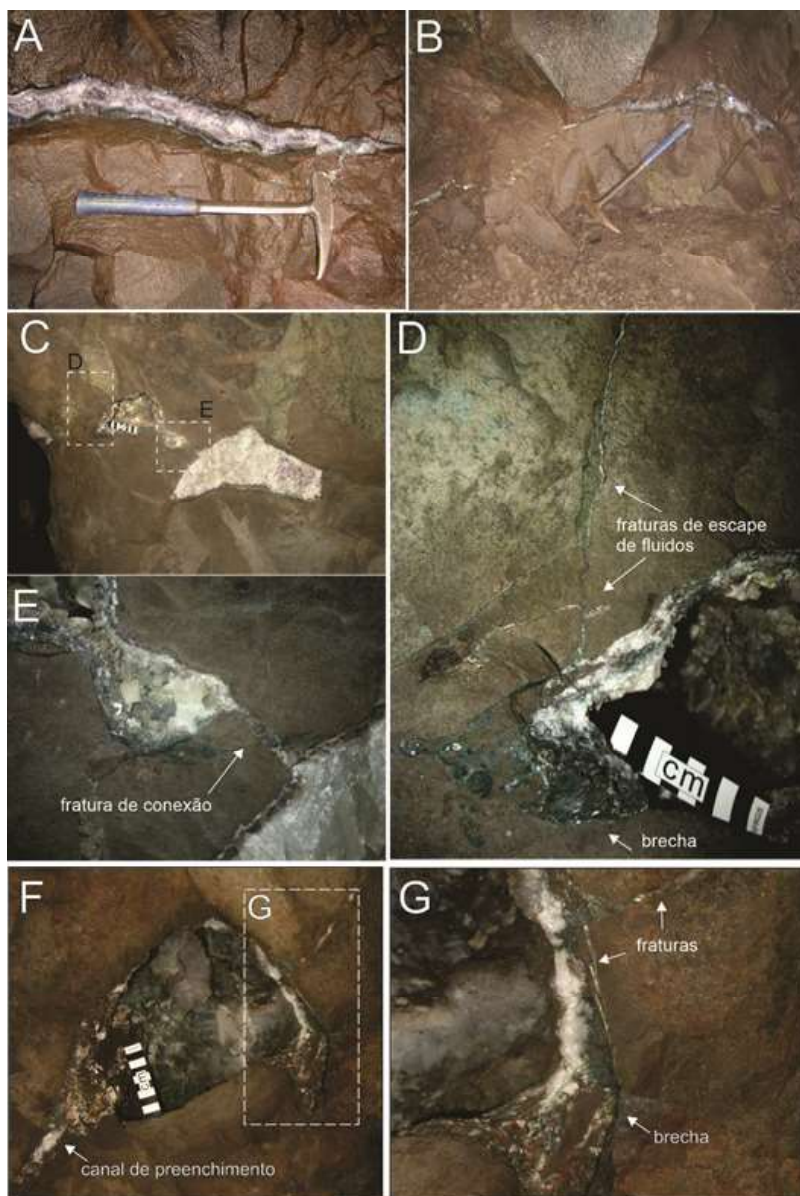


Figura 7 – Marcadores de processos epigenéticos: A) Fratura sub-horizantal preenchida pela mesma sequência de mineralização que está presente nos geodos; (B) Fratura sub-horizantal, preenchida por calcedônia, observada na base das galerias de extração de geodos no nível mineralizado; (C) Sequência de geodos conectados por fraturas indicando conexão tridimensional do sistema de cavidades; (E) Detalhe da fratura de conexão, com um dos limites bem definido, preenchida pelas mesmas fases minerais que preenchem os geodos; (D) Geodo com brecha na base e com canal de escape de fluido, associado à porção de topo da cavidade; (F) Geodo com dois canais de preenchimento associados à base; (G) Detalhe das fraturas associadas às bordas, e da brecha, associada ao canal de preenchimento, formada por clastos da rocha hospedeira, envolvidos pelos minerais de sílica.

Para a abertura das cavidades, também há a contribuição de processos de dissolução de alguns minerais máficos (Duarte *et al.*, 2009). A pigeonita é totalmente alterada para esmectita (Duarte *et al.*, 2010), tendo, como relictos, cristais de plagioclásios, imersos em mesóstase neo-formada. Nas

brechas da base dos geodos, os clastos cimentados pela matriz de zeólitas mostram processo avançado de dissolução, com cavidades neo-formadas sendo preenchidas pelas fases silicosas (calcedônia).

Recentemente, processos diagenéticos foram atribuídos às mineralizações de

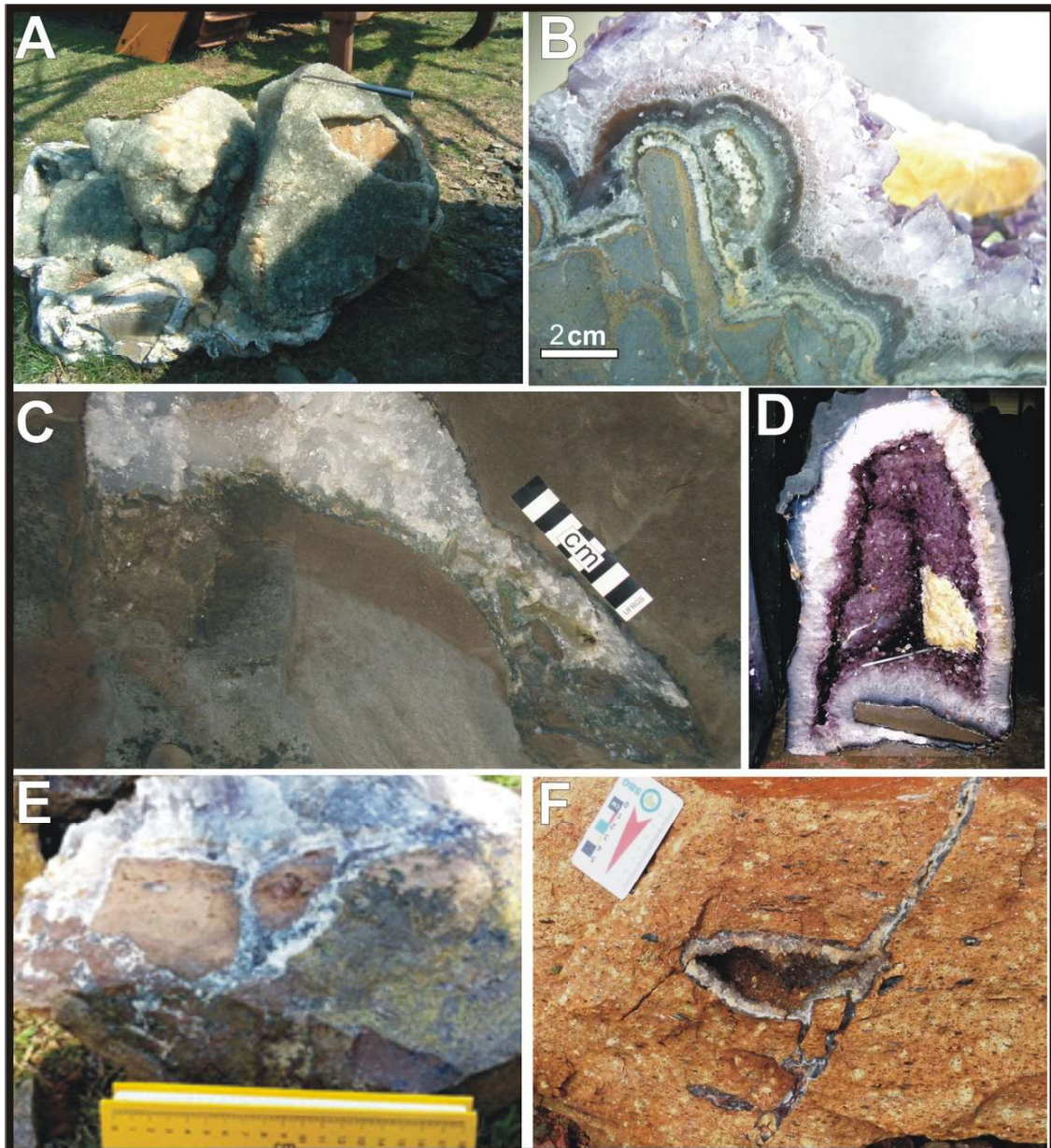


Figura 8 – Brechas hidráulicas associadas a geodos: (A) Base de geodo formada por grandes blocos brechados, envoltos pela mineralização (Artigas, UY); (B) Clastos da brecha progressivamente alterados que tendem a apresentar bordas arredondadas (Artigas, UY); (C) Brecha observada na parede da galeria de exploração (Ametista do Sul, RS); (D) Clasto envoltos pela mineralização na base de geodos, prontos para serem comercializados (Ametista do Sul, RS); (E) Clastos de diferentes dimensões e de diferentes contornos envoltos pela mineralização (Progresso, RS); (F) Brecha associada à fratura e à base de geodo, observada em bloco retirado da lavra (Progresso, RS).

ágata e de ametista na região da fronteira sudoeste (Bergmann *et al.*, 2020). Associado a estes processos de diagênese para a mineralização, tem-se a contribuição de areias e de sedimentos inconsolidados e incorporados pela lava para a fonte de sílica, para a formação da ágata e de ametista, que é aventada para a porção uruguaia (Bossi & Caggia-

no, 1974; Techera, 2009) e, também, para os depósitos de ágata do Salto do Jacuí (Heemann & Strieder, 1999; Michelin, 2014). Bossi & Caggiano (1974) descrevem que a entrada de areia ocorre com a incorporação dos grãos de areia do sistema desértico ativo, durante a erupção das lavas. Essa entrada de areia pode ocorrer pela porção de topo, com a areia pre-

enchendo as zonas de auto-brecha, ou pela porção de base, com a areia sendo incorporada pelo fluxo de lava. Para a transformação da areia em calcedônia, em quartzo incolor e em ametista, a água presente, dissolvida no magma basáltico, solubiliza a sílica; se a pressão for suficiente, haverá a formação de soluções ricas em sílica, que tendem a ascender e a formar as cavidades, que serão preenchidas, tão logo a temperatura diminua. Os autores se reportam a Holland (1967 *apud* Bossi & Caggiano, 1974), para afirmar que, em condições de altas temperatura e pressão, a água liberada pelo magma seria capaz de dissolver grandes quantidades de sílica. Os guias prospectivos, sugeridos por Bossi & Caggiano (1974), são derrames que contêm uma significativa presença de brechas no topo, com veios ou com filões de areia.

4 PREENCHIMENTO DOS GEODOS – MINERALOGIA E CONDIÇÕES DE CRISTALIZAÇÃO

O preenchimento dos geodos é atribuído a processos de baixas temperaturas (Juchem, 1999) e tem, por base, estudos de inclusões fluidas e dados de isótopos de oxigênio. Os fluidos são aquosos e de baixa salinidade, com inclusões fluidas monofásicas (Juchem, 1999; Duarte *et al.*, 2010; Gilg *et al.*, 2003, 2014). Gilg e colaboradores (2014), indicam quatro estágios de mineralização para o DMAS, marcados por diferenças de salinidade do fluido, obtidas em inclusões fluidas. A salinidade do fluido indica soluções hidrotermais, que evoluem de condições redutoras para oxidantes, com salinidades de 5,3, de 3,4 e de 0,3 wt% NaCl, respectivamente, para os estágios II, III e IV. O estágio I, constituído por celadonita, por calcedônia e por pirita, não possui inclusões fluidas. Em depósitos de Artigas (Uruguai), também foram identificados vários estágios de preenchimento ou pulsos de mineralização. Por dados isotópi-

cos, foi possível sugerir que um mesmo pulso pode mineralizar derrames sobrepostos. Estes pulsos podem ser individualizados pela repetição completa ou incompleta da sequência de minerais calcedônia-quartzo incolor-ametista (Fig. 8B e 8D) (Duarte *et al.*, 2011).

As análises de isótopos $\delta^{18}\text{O}$, combinadas aos dados de δD , sugerem fonte meteórica e soluções salinas das porções mais profundas do Sistema Aquífero Guarani para o hidrotermalismo (Gilg *et al.*, 2014). A percolação de fluido em grande escala e, até, por unidades sedimentares abaixo do Botucatu também podem ser aventadas, sugerida pelas assinaturas de isótopos de enxofre de rochas mineralizadas e alteradas, hidrotermalmente (Duarte *et al.*, 2010; Juchem & Hartmann, 2011). O intervalo de valores de isótopos $\delta^{34}\text{S}$, obtidos no nível mineralizado (-15‰ a -0,3‰) do distrito mineiro de Los Catalanes, e a depleção destes em enxofre vulcânico, sugerem contaminação relacionada às rochas sedimentares, durante a alteração causada pelos fluidos hidrotermais, que mineralizaram o basalto.

5 CONTEXTO ESTRUTURAL E GEOTECTÔNICO DOS DERRAMES MINERALIZADOS

O desenvolvimento de estruturas aptas a conter os fluidos hidrotermais que venham a exercer sobrepressão, é um dos pontos considerados, para que ocorra o desenvolvimento das condições de mineralização. O processo de mineralização no Grupo Serra Geral é considerado, aqui, epigenético (Duarte *et al.*, 2009). O aporte de fluido hidrotermal foi universal no grupo vulcânico, pois foram mineralizados os derrames que retiveram o fluido hidrotermal nas porções maciças pelo tempo necessário, resultando na alteração dos minerais primários para secundários (em 500 anos, sugere-se). A ca-

da evento de aquecimento da Bacia do Paraná, devido à fusão parcial do manto e ao esfriamento de *sills*, houve o aumento do grau geotérmico e o aquecimento do Aquífero Guarani “ancestral”. A cada evento de hidrotermalismo (Hn), corresponderam os registros H1, H2 e H3 no basalto (Hartmann *et al.*, 2012a).

Há minas de geodos de ametista em basaltos de todos os tipos químicos, como alto-Ti, médio-Ti e baixo-Ti. O derrame Veia Alta é do tipo alto-Ti, enquanto os derrames Catalán e Cordillera (no Uruguai) são baixo-Ti. No extremo, geodos ocorrem em riódacitos e em riolitos. A composição química das rochas não determina a presença ou a ausência de geodos de ametista (Juchem, 1999; Duarte, 2008; Rosenstengel & Hartmann, 2012; Hartmann *et al.*, 2010).

O Grupo Serra Geral é o único produtor de ametista em escala mundial, dentre as grandes províncias basálticas dos continentes. Um fator diferenciador foi o clima árido, pois o aporte de água da chuva, de lagos e de rios causa a formação de fraturamentos do tipo entablatura, durante o esfriamento da lava (Long & Wood, 1986). A permeabilidade dada por estas estruturas diminui o tempo de permanência dos fluidos e, em consequência, impede a alteração da rocha, para a posterior formação de geodos.

Geodos de ametista são produzidos em vários níveis estratigráficos do Grupo Serra Geral, incluindo o primeiro e o segundo derrames, em contato com o paleoerg Botucatu (derrame Catalán, em Quaraí e em Artigas, no Uruguai, e derrame Cordillera, em Artigas). O derrame Veia Alta, em Ametista do Sul, está, em média, 1.000 m acima do contato com a Formação Botucatu, podendo estar acima de mais de 50 derrames de basalto e de riódacito.

A composição mineralógica do derrame basáltico exerce um efeito fundamental na formação de geodos de ametista. Durante

a alteração hidrotermal, os minerais máficos (piroxênios – preferencialmente, pigeonita) são alterados intensamente para argilominerais (esmectita, celadonita), fornecendo ductilidade ao basalto, quando saturado em água, e podendo ter empuxo, como mecanismo de abertura das cavidades (Hartmann *et al.*, 2015). Minerais félsicos (plagioclásio) são pouco afetados pela alteração e persistem, mesmo nas porções mais alteradas da rocha. Ao aumentar o teor de sílica da rocha (*e.g.* riódacitos), o volume total de minerais hidratados de baixa temperatura diminui. O resultado são geodos de tamanho menor (*e.g.* região de Progresso).

Geodos tendem a estar concentrados em “bolsões”, dentro das galerias. Estas porções são limitadas por “levante” e por “rebai-xo” do “cascalho” do topo das galerias, como ocorre em Ametista do Sul. Essas estruturas são bons guias prospectivos para as mais de 300 minas ativas de Ametista do Sul e podem estar relacionadas às estruturas do tipo “*tumuli* de lavas”, comuns em derrames do tipo *pahoehoe* (Hartmann *et al.*, 2017).

A permanência do pacote vulcânico em posição horizontal, para o confinamento do fluido hidrotermal na porção maciça do núcleo, é requerida. A posição intraplaca do Grupo Serra Geral favoreceu a fixação horizontal dos derrames e a sua mineralização. Todos os basaltos intraplaca poderiam estar mineralizados a geodos de ametista, no entanto a exceção está no Grupo Serra Geral. Os derrames e suas estruturas são semelhantes em todas as províncias, mas o substrato é diferente. Somente o Grupo Serra Geral extrusionou sobre um paleoerg-transformado-em-Aquífero Guarani e, assim, obteve um volume de água suficiente para a formação dos geodos, e a trajetória ascendente desse fluido deixou marcas sequenciais nas rochas: H1 (selamento do derrame), H2 (injeção explosiva de areia fluidizada e novo selamento) e H3 (formação e preenchimento de geodos)

(Hartmann *et al.*, 2012a). Foi mineralizado o derrame que tinha a estrutura necessária para a formação dos geodos, em qualquer nível estratigráfico.

6 APROVEITAMENTO GEMOLÓGICO

A ametista é o principal produto comercializado no mercado gemológico, para fins ornamentais ou de joalheria. Existe uma classificação de cores pela saturação, que vai de fraca a extra. Sob tratamento térmico, a ametista desenvolve o amarelo acastanhado (citrino), com temperatura em torno de 500-600 °C (Fischer, 1999) e, recentemente, Cheng & Guo (2020) indicaram a temperatura de 560 °C para a formação do citrino. São selecionadas para tratamento térmico, ametista de cor fraca, associadas a cristais bem desenvolvidos e a outros fatores estéticos, como transparência (Fig. 9A).

O quartzo incolor, também conhecido como cristal-de-rocha, possui baixo valor agregado no comércio, em comparação com as outras variedades. Técnicas de tratamento, a fim de induzir ou de melhorar a cor, são comuns e são uma alternativa recorrente, pois resultam em um aumento no valor agregado do produto. O tratamento por radiação ionizante é uma dessas técnicas. No Brasil, a radiação gama, com fonte Cobalto-60, é muito utilizada para esta finalidade. As cores resultantes após o tratamento, estão relacionadas à origem genética do depósito, a impurezas e à quantidade de dose aplicada (Rossman, 1994).

O quartzo incolor do Rio Grande do Sul, ao ser exposto à radiação ionizante, pode desenvolver as cores verde acinzentada e violeta (Enokihara, 2013; Menezes, 2019; Tononi *et al.*, 2020) (Fig. 9B-9C). O Fe⁴⁺ é o agente responsável pela cor violeta da ametista, ao substituir íons de Si⁴⁺ na rede cristalina do quartzo (Rossman, 1994). Esta variedade do quartzo é muito utilizada como

material gemológico, desde o período neolítico, enquanto a variedade verde acinzentada entrou no mercado somente no início dos anos 2000 (McClure *et al.*, 2010). Para essa variedade, a cor é associada ao defeito estrutural *Non-Bridging-Oxygen Hole Center* (NBOHC), um centro de cor desenvolvido pela exposição à radiação, que possui janela de transmissão na faixa de 490 a 540 nm, que corresponde à faixa verde no espectro eletromagnético (Henn & Güttler, 2012; Enokihara, 2013). As doses recebidas para desenvolvimento da cor em quartzo incolor, variam de 200 a 900 kGy, para cristais provenientes da região do Alto Uruguai (Menezes, 2019), e são de 900 kGy para os cristais da região de Progresso (Tononi *et al.*, 2020). A dose a ser recebida, e que desenvolverá cor, pode ser calculada pelo fator Ametista (Lameiras *et al.*, 2012). Cabe salientar que a ametista e o quartzo verde perdem a cor, se expostos à radiação ultravioleta (Juchem, 1999; Enokihara, 2013).

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ametista é um dos mais importantes bens minerais do RS. Entender os processos genéticos auxilia na prospecção de novos alvos economicamente viáveis. A hipótese epigenética agrega estruturas de escalas local e regional (eventos H1-H2-H3), que indicam possíveis novos alvos. Cabe salientar que a não restrição de mineralizações a tipos químicos e litológicos é importante, para indicar fatores exógenos ao magmatismo relacionados à mineralização. O RS é o maior produtor de ametista e o aproveitamento gemológico destes minerais deve ser tratado como questão de desenvolvimento econômico para as regiões produtoras, aumentando a diversidade de materiais gemológicos disponíveis, bem como a qualidade das gemas.

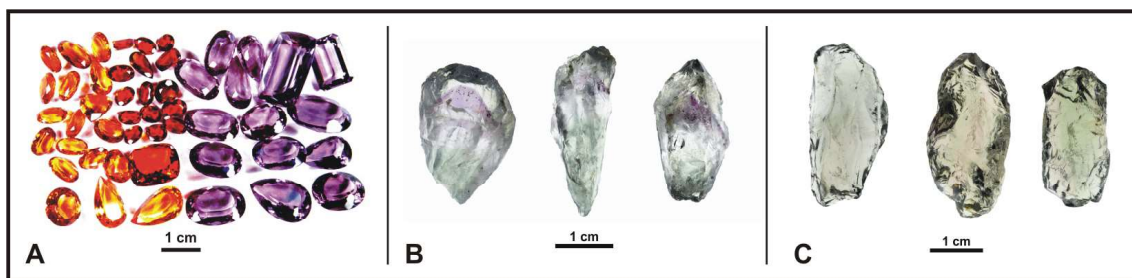


Figura 9 – Aproveitamento gemológico: A) Ametista e citrino, obtido por tratamento térmico, lapidados em facetas para uso em joalheria; B) Coloração obtida por exposição à radiação gama Co^{60} , que desenvolveu zonação de cor, indicando zonação química no cristal; C) Quartzo verde obtido após à exposição à radiação gama Co^{60} . Em (B) e em (C) os cristais eram originalmente incolores.

REFERÊNCIAS

- Acauan, R. B. 2004. *Caracterização geológica e gemológica da ametista e ágata de Santana do Livramento, Sudoeste do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, 89p. Trabalho de Conclusão de Curso, Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Augustin, A. H. 2007. *Geologia do depósito de Ágata e Ametista da Mina Novo São João, Santana do Livramento, RS*. Porto Alegre, 91p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geociência, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Barreto, C. J. S., De Lima, E. F. & Goldberg, K. 2017. Primary vesicles, vesicle-rich segregation structures and recognition of primary and secondary porosities in lava flows from the Paraná igneous province, southern Brazil. *Bulletin of Volcanology*, 79, art. 31.
- Bellieni, G., Comin-Chiaromonti, P., Marques, L. S., Melfi, A. J., Nardy, A. J. R., Papatrechas, C., Piccirillo, E. M., Roisenberg, A. & Stolfi, D. 1986. Petrogenetic aspects of acid and basaltic lavas from the Paraná plateau (Brazil): geological, mineralogical and petrochemical relationship. *Journal of Petrology*, 27: 915-944.
- Bergmann, M., Rocha, P. G., Parisi, G. N & Sander, A. 2020. *Modelo prospectivo para ametista e ágata na fronteira sudoeste do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, CPRM, 129p.
- Bossi, J. & Caggiano, W. 1974. Contribuición a la Geología de los Yacimientos de Amatista del Departamento de Artigas. In: CONGRESO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., Porto Alegre. *Anais...* Porto Alegre, SBG, p. 301-317.
- Branco, P. M. 2008. *Dicionário de Mineralogia e Gemologia*. São Paulo, Oficina de Textos, 608p.
- Cheng, R. & Guo, Y. 2020. Study on the effect of heat treatment on amethyst color and the cause of coloration. *Scientific Reports*, 10(14927): 11.
- DNPM. Departamento Nacional de Produção Mineral. 2009. *Boletim Referencial de Preços de Diamantes e Gemas de Cor*. Disponível em: <https://www.gemologiaibgm.com.br/laboratorio/wp-content/uploads/2011/11/BRP20091.pdf>. Acesso em: 04 ago. 2020.
- Duarte, L. C., Hartmann, L. A. & Vasconcellos, M. A. Z. 2005. Epigenetic geode formation in the world class amethyst deposits of the southern Paraná Basaltic Province. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE METALOGENIA, 1., Gramado. *Anais...* Gramado, Sociedade Brasileira de Geologia, 4p. 1 CD-ROM.
- Duarte, L. C., Hartmann, L. A., Vasconcellos, M. A. Z., Medeiros, J. T. N. & Theye, T. 2009. Epigenetic formation of amethyst-bearing geodes from Los Catalanes gemological district, Artigas, Uruguay, southern Paraná Magmatic Province. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 184(3-4): 427-436.

- Duarte, L. C., Hartmann, L. A., Ronchi, L. H., Berner, Z., Theye, T. & Massonne, H. J. 2011. Stable isotope and mineralogical investigation of the genesis of amethyst geodes in the Los Catalanes gemological district, Uruguay, southernmost Paraná volcanic province. *Mineralium Deposita*, 46: 239-255.
- Enokihara, C. T. 2013. *Estudo do quartzo verde de origem hidrotermal tratado com radiação gama*. São Paulo, 165p. Tese de Doutorado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo.
- Fischer, A. C. 1999. *Composição química e possíveis causas da cor da ametista da região do Alto Uruguai, RS*. Ouro Preto, 168p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Gemologia, Universidade Federal de Ouro Preto.
- Fron del, C. 1962. *The system of mineralogy of J. D. Dana & E. S. Dana, Yale University, 1837-1892*. 7th. ed. New York, John Wiley & Sons, Inc., 334p.
- 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: 1009-1025.
- Gilg, H. A., Krüger, Y., Taubald, H., van der Kerkhof, A. M., Frenz, M. & Morteani, G. 2014. Mineralisation of amethyst-bearing geodes in Ametista do Sul (Brazil) from low-temperature sedimentary brines: evidence from monophase liquid inclusions and stable isotopes. *Mineralium Deposita*, 49: 861-877.
- Gomes, M. E. B. 1996. *Mecanismos de resfriamento, estruturação e processos pós-magmáticos em basaltos da Bacia do Paraná - Região de Frederico Westphalen (RS)*. Porto Alegre. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Hartmann, L. A., Wildner, W., Duarte, L. C., Duarte, S. K., Pertille, J., Arena, K. R., Martins, L. C. & Dias, N. L. 2010. Geochemical and scintillometric characterization and correlation of amethyst geode-bearing Paraná lavas from the Quaraí and Los Catalanes districts, Brazil and Uruguay. *Geological Magazine*, 147: 954-970.
- Hartmann, L. A., Duarte, L. C., Massonne, H. J., Michelin, C. R., Rosenstengel, L. M., Bergmann, M., Theye, T., Pertille, J., Arena, K. R., Duarte, S. K., Pinto, V. M., Barboza, E. G., Rosa, M. L. C. C. & Wildner, W. 2012a. Sequential opening and filling of cavities forming vesicles, amygdalae and giant amethyst geodes in lavas from the southern Paraná volcanic province, Brazil and Uruguay. *International Geology Review*, 54: 1-14.
- Hartmann, L. A., Medeiros, J. T. N. & Petruzellis, L. T. 2012b. Numerical simulations of amethyst geode cavity formation by ballooning of altered Paraná volcanic rocks, South America. *Geofluids*, 11: 133-141.
- Hartmann, L. A., Medeiros, J. T. N., Baggio, S. B. & Antunes, L. M. 2015. Controls on prolate and oblate geode geometries in the Veia Alta basalt flow, largest world producer of amethyst, Paraná volcanic province, Brazil. *Ore Geology Reviews*, 66: 243-251.
- Hartmann, L. A., Pertille, J. & Duarte, L. C. 2017. Giant-geode endowment of tumuli in the Veia Alta flow, Ametista do Sul. *Journal of South American Earth Sciences*, 77: 51-57.
- Heemann, R. & Strieder, A. J. 1997. Caracterização geológica das sequências vulcânicas na Região do Salto do Jacuí (RS-Brasil). In: SIMPÓSIO SOBRE VULCANISMO E AMBIENTES ASSOCIADOS, 1., Gramado. *Boletim de Resumos*. . . Gramado, SBG, p. 7.
- Henn, U. & Guttler, R. A. S. 2012. Review of some current colored quartz varieties. *The Journal of Gemmology*, 13(1-4): 29-43.
- Hoppe, B. S. 2012. *Geologia e mineralogia dos depósitos de ametista da região entre Progresso e Nova Bréscia, RS*. Porto Alegre, 65p. Trabalho de Conclusão de Curso, Insti-

tuto de Geociência, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Juchem, P. L. 1999. *Mineralogia, geologia e gênese dos depósitos de ametista da região do Alto Uruguai, Rio Grande do Sul*. São Paulo, 224p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

Juchem, P. L., Hartmann, L. A., Massonne, H. J. & Theye, T. 2009. Oxygen isotope composition of amethyst and related silica minerals in volcanic rocks from the Paraná Province, southern Brazil. In: XII CONG. BRAS. GEOQUÍMICA, Ouro Preto. *Geochimica Brasiliensis*, UFOP, v. II, p. 599-602.

Juchem, P. L. & Hartmann, L. A. 2011. Isótopos de enxofre no Distrito Mineiro de Ametista do Sul, RS. In: XXII CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, XIII., Gramado, 2011. *Anais. . . Gramado*, v. 1, p. 1183-1186.

Juchem, P. L. 2014. Mineralizações de ametista em dacitos do Grupo Serra Geral. In: Hartmann, L. A. & Baggio, S. B. (org.). *Mineralogia e exploração mineral no Grupo Serra Geral*. Porto Alegre, IGEO/UFRGS, p. 41-54.

Long, P. E. & Wood, B. J. 1986. Structures, textures and cooling histories of Columbia River basalt flows. *Geological Society American Bulletin*, 97: 1144-1155.

McClure, S. F., Kane, R. E. & Sturman, N. 2010. Gemstone enhancement and its detection in the 2000s. *Gems & Gemology*, 46(3): 218-240.

Menezes, M. T. F. 2019. *Potencial de obtenção de prasiolita a partir de quartzo do distrito mineiro de Ametista do Sul*. Porto Alegre, 65p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Morteani, G., Kostitsyn, Y., Preinfalk, C. & Gilg, H. A. 2010. The genesis of the amethyst geodes at Artigas (Uruguay) and the paleohydrology of the Guaraní aquifer: structural,

geochemical, oxygen, carbon, strontium isotope and fluid inclusion study. *International Journal of Earth Sciences*, 99: 927-947.

Nardy, A. J. R., Machado, F. B. & Oliveira, M. A. F. 2008. As rochas vulcânicas mesozóicas ácidas da Bacia do Paraná: litoestratigrafia e considerações geoquímicoestratigráficas. *Rev. Bras. Geoc.*, 38: 178-195.

Michelin, C. R. L. 2014. *Ágata do Distrito Mineiro de Salto do Jacuí (Rio Grande do Sul, Brasil) uma caracterização com base em técnicas estratigráficas, petrográficas, geoquímicas e isotópicas*. Porto Alegre, 167p. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

O'Donoghue, M. 1987. *Quartz*. London, Butterworth, 110p.

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.

Pertille, J., Hartmann, L. A., Duarte, S. K., Arena, K., Rosa, M. L. C. C. & Barboza, E. G. 2013. Gossan characterization in the Quarai and Los Catalanes amethyst geode districts (Brazil and Uruguay), Paraná volcanic province, using rock geochemistry and gamma-spectrometry. *Journal of Geochemical Exploration*, 124: 127-139.

Proust, D. & Fontaine, C. 2007a. Amethyst-bearing lava flows in the Paraná basin (Rio Grande do Sul, Brazil): cooling, vesiculation and formation of the geodic cavities. *Geological Magazine*, 144: 53-65.

Proust, D. & Fontaine, C. 2007b. Amethyst geodes in the basaltic flow from Triz quarry at Ametista do Sul (Rio Grande do Sul, Brazil): magmatic source of silica for the amethyst crystallizations. *Geological Magazine*, 144(4): 731-739.

Rosenstengel, L. M. & Hartmann, L. A. 2012. Geochemical stratigraphy of lavas and fault block structures in the Ametista do Sul geo-

Voltar ao Sumário

de mining district, Paraná volcanic province, southern Brazil. *Ore Geology Reviews*, 48: 332-348.

Rossmann, G. R. 1994. Colored varieties of the silica minerals. In: Heaney, P. J., Prewitt, C. T. & Gibbs, G. V. (Eds.). *Silica - Physical behavior, geochemistry and materials applications. Reviews in Mineralogy*. Washington, D. C, Mineralogical Institute of America, p. 433-467.

Scopel, R. M., Gomes, M. E. B., Formoso, M. L. L. & Proust, D. 1998. Derrames portadores de ametista na região de Frederico Westphalen-Iraí-Planalto-Ametista do Sul, RS-Brasil. In: CONGRESO URUGUAYO DE GEOLOGIA, 2., 1998, Punta del Este. *Actas...* Punta del Este, DINAMIGE, p. 234-252.

Techera, J. 2009. *Proyecto agatas y amatistas - Fase II - Exploración detallada de yacimientos de amatistas en el Distrito Gemológico Los Catalanes - Artigas, Uruguay*. DINAMIGE, Uruguay Government, 92p.

Tononi, L. L., Duarte, L. C., Juchem, P. L., Lameiras, F. S., Schnellrath, J. & Menezes, M. T. F. 2020. Potential development of green and purple colors in colorless natural quartz from geodes in rhyodacites, Serra Geral Group, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 50(3): e20190114.