

## Ocorrências de ametista em basaltos do Triângulo Mineiro (Minas Gerais): descrição e comparações com depósitos similares do Rio Grande do Sul

Coralie Heinis DIAS<sup>1</sup>, Mario Luiz de Sá Carneiro CHAVES<sup>1</sup>, Pedro Luiz JUCHEM<sup>2</sup> & Antônio Wilson ROMANO<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centro de Pesquisa Manoel Teixeira da Costa, Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais. Av. Antônio Carlos, 6627, CEP 31.270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil (co.dias.minas@gmail.com, mlschaves@gmail.com, romanoaw@gmail.com).

<sup>2</sup> Laboratório de Gemologia, Departamento de Mineralogia e Petrologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9.500, CEP 91.540-000, Porto Alegre, RS, Brasil (labogem@ufrgs.br).

**Resumo.** Depósitos de ametista de classe mundial ocorrem associados à Formação Serra Geral (Cretáceo Inferior) no sul do país e imediações, particularmente nas regiões de Ametista do Sul (RS) e de Artigas (Uruguai). Tais derrames se estendem para norte até a região do Triângulo Mineiro (MG), onde foram estudados duas ocorrências e um depósito de pequenas proporções (Fazenda Barreiro, Pedreira Incopol e Tembezinho), juntamente com seus basaltos encaixantes. O objetivo principal deste trabalho foi caracterizar a geologia e a mineralogia destas ocorrências, bem como compará-los aos que ocorrem em derrames congêneres do sul. Petrograficamente, tais basaltos mostraram plagioclásio, piroxênio, vidro vulcânico e opacos, além da alteração do vidro e dos minerais silicáticos da matriz para argilominerais, e preenchimentos secundários de calcedônia, esmectita, quartzo micro e macrocristalino e calcita. Análises geoquímicas indicaram basaltos com altos teores de Ti (2,67-3,98% TiO<sub>2</sub>); somente uma amostra foi caracterizada como andesito basáltico segundo o diagrama TAS. Comparadas a seus congêneres do sul do país, são rochas quimicamente similares aos basaltos mineralizados de alto Ti de Ametista do Sul. As ocorrências de ametista estudadas estão associadas a derrames que possuem espessuras aparentes menores que 50 m, preenchendo fraturas verticais ou formando geodos de forma semi-esférica a cônica. Calcita e celadonita, minerais comuns e abundantes associados à ametista do RS, foram observados apenas na ocorrência da Pedreira Incopol. Com base nas altitudes observadas, considerou-se a possibilidade de existência de pelo menos três derrames distintos da Formação Serra Geral na região do Triângulo Mineiro.

**Palavras-chave.** Vulcanismo, Formação Serra Geral, petrografia, mineralogia.

**Abstract.** AMETHYST OCCURRENCES IN BASALTS FROM TRIÂNGULO MINEIRO REGION (MINAS GERAIS): DESCRIPTION AND COMPARISONS WITH SIMILAR DEPOSITS FROM RIO GRANDE DO SUL. In southern Brazil and surrounding areas, especially in Ametista do Sul (RS) and Artigas (Uruguay) regions, global-class amethyst deposits occur associated to Serra Geral Formation (Lower Cretaceous). They extend to the north up to Triângulo Mineiro region (MG), where two amethyst deposits and one occurrence (Barreiro Farm, Incopol Quarry and Tembezinho) with small proportions, along with their host basalts, have been studied. The main objective of this work was to characterize geologically and mineralogically such occurrences, as well as to compare them to the deposits which occur in akin basalt flows in the south. Petrographically these basalts present plagioclase, pyroxene, volcanic glass and opaque minerals, besides devitrification and alteration of glass and silicate minerals from the rock mesostasis to clay minerals, as well as secondary fillings of chalcedony, smectite, micro and macrocrystalline quartz and calcite. Geochemical analyses indicated they are high Ti (2.67-3.98% TiO<sub>2</sub>); only one sample has been characterized as basaltic andesite according to TAS diagram. When compared to their southern counterparts, they are rocks chemically similar to mineralized high Ti basalts from Ametista do Sul. Studied amethyst occurrences are associated to basaltic flows with apparent thickness less than 50 m, filling vertical fractures or semi-spherical to conical geodes. Calcite and celadonite, which are common and abundant minerals associated with amethyst from RS, were only observed at Incopol Quarry. Based on observed elevations, possibly at least three different lava flows can be considered for the Serra Geral Formation at Triângulo Mineiro region.

**Keywords.** Water pollution, Land use, Basic sanitation, Environmental degradation.

## 1 Introdução

O Brasil é o maior produtor mundial da variedade ametista do quartzo, sendo cerca de 80% de sua produção derivada dos depósitos contidos em rochas vulcânicas do Rio Grande do Sul, associadas à Bacia do Paraná. Tais derrames basálticos podem atingir a espessura máxima de 1.700 m, cobrindo uma área aproximada de 917.000 km<sup>2</sup> no Brasil, Uruguai, Paraguai e Argentina (Piccirillo & Melfi, 1988; Frank *et al.*, 2009). Em Minas Gerais, este tipo de mineralização ocorre exclusivamente na região do Triângulo Mineiro, no oeste do estado; tais ocorrências possuem, no entanto, pequena importância econômica em comparação aos depósitos do sul do país. Outros estados brasileiros que se destacam na produção de ametista, embora de outros tipos genéticos, são Bahia, Espírito Santo e Pará.

As mineralizações estudadas se associam a basaltos, sendo tipicamente geradas em derrames de lavas da Formação Serra Geral, onde cavidades podem ser preenchidas por ametista e/ou outras variedades de quartzo como calcedônia, ágata e quartzo hialino, além de zeólitas, opala, calcita, gipsita, e mais raramente barita (Juchem *et al.*, 1990; Juchem, 2013). Apesar de serem relacionadas principalmente a geodos em basaltos, são reportadas também ocorrências de ametista deste tipo em rochas ácidas, como riodacitos, no Rio Grande do Sul (Juchem, 2014). Em Minas Gerais, ocorrências ou depósitos de ametista de tipologias genéticas distintas relacionam-se a veios hidrotermais da Serra do Espinhaço e a pegmatitos da Província Pegmatítica Oriental do Brasil (Scholz *et al.*, 2012).

O objetivo principal do estudo é caracterizar a geologia e a mineralogia das ocorrências em basaltos de Minas Gerais, bem como compará-las aos seus congêneres que ocorrem no Rio Grande do Sul e no Uruguai.

## 2 Área, material e métodos

Os vulcanitos em questão foram designados como Formação Serra Geral – Grupo São Bento por Gordon Jr. (1947), termo

largamente difundido na literatura, e ocorrem na porção sul do país (Fig. 1). Para Wildner *et al.* (2007) e Hartmann (2014), essa unidade envolve, além de basaltos, também andesitos basálticos, andesitos, riolitos e riodacitos, e poderia ser enquadrada na categoria de Grupo, uma vez que tais autores identificaram unidades distintas mapeáveis em campo, com base em dados químicos, litológicos e estratigráficos. Juntamente com suas equivalentes na Namíbia (África Ocidental), tais rochas vulcânicas constituem a Província Magmática Paraná-Etendeka (Erlank *et al.*, 1984; Peate, 1997). O Grupo São Bento é integrado ainda pelos arenitos eólicos da Formação Botucatu, que aparecem abaixo ou localmente intercalados nos derrames, e da Formação Piramboia, que não ocorre na área de estudo.

Na região do Triângulo Mineiro, os derrames cobrem de 20-25% da superfície da Bacia do Paraná (Fig. 2). O substrato da bacia ocorre ao norte e a leste, sendo principalmente composto por rochas neoproterozoicas dos grupos Canastra e Araxá, além de intrusões graníticas. Na parte leste dessa região, na área da ocorrência de Tembezinho, os derrames capeiam rochas xistosas do Grupo Araxá, principalmente micaxistos granatíferos com intercalações de quartzito micáceo e anfibolito (Pinto & Silva, 2014; Chaves & Dias, 2017a, 2017b) (Fig. 2).

A origem dos derrames em questão relaciona-se à atividade vulcânica ocorrida na plataforma Sul Americana associada à abertura da porção sul do Oceano Atlântico. Thiede & Vasconcelos (2010), utilizando o método Ar-Ar, encontraram uma idade de  $134,7 \pm 1$  Ma para tais rochas, sugerindo um evento curto de erupção ( $< 1,2$  Ma). De outro modo, Dodd *et al.* (2015) apresentaram dados paleomagnéticos que demonstram um período de atividades vulcânicas com mais de 4 Ma. Em Minas Gerais, poucas informações estão disponíveis sobre esse evento (e.g., Barbosa *et al.*, 1970; Sgarbi, 1997), além de inexistirem dados geocronológicos a respeito.

Nas áreas enfocadas, os litotipos da Formação Serra Geral são sobrepostos por depósitos sedimentares continentais das formações Vale do Rio do Peixe e Marília, do Grupo Bauru (Cretáceo Superior), além

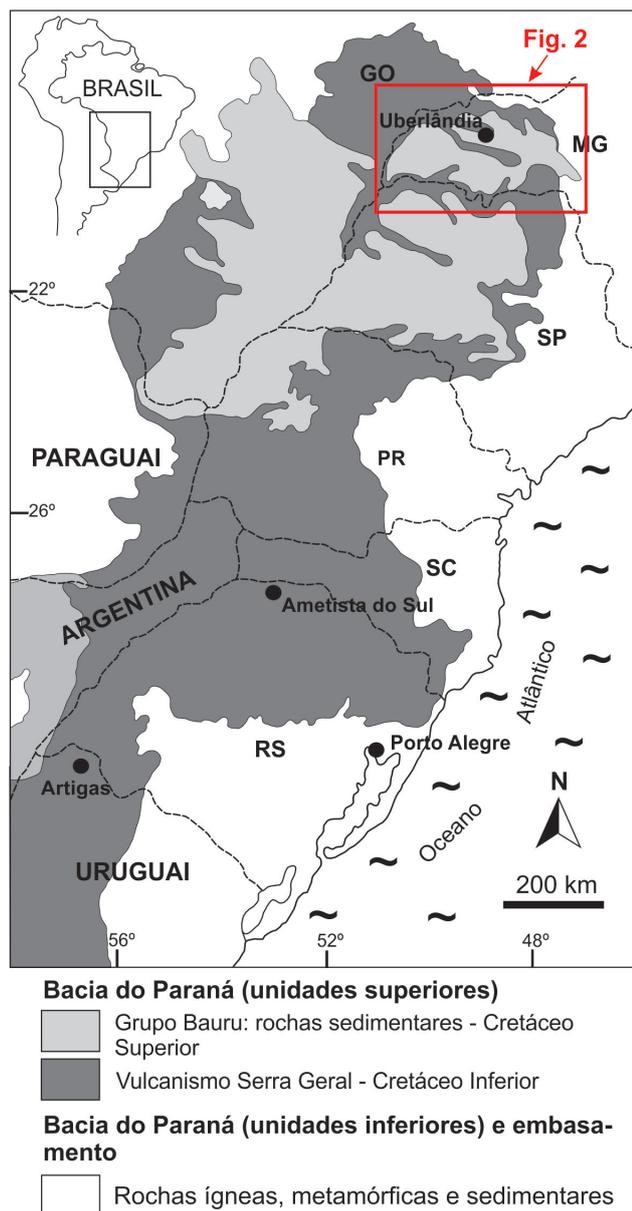


Figura 1. Distribuição espacial aproximada das rochas vulcânicas da Formação Serra Geral (modificado de Hartmann, 2014), ressaltando a nordeste a região das ocorrências estudadas no Triângulo Mineiro (MG).

Figure 1. Approximated special distribution of the Serra Geral Formation volcanic rocks (modified from Hartmann, 2014), showing at northeast the region of the studied occurrences in the Triângulo Mineiro (MG).

de coberturas detrito-lateríticas cenozoicas (Heineck *et al.*, 2003; Pinto & Silva, 2014). A deposição dos arenitos da Formação Vale do Rio do Peixe é relacionada a ambiente eólico, enquanto os pelitos, arenitos e conglomerados da Formação Marília são associados a sistemas lacustres, aluviais e de leques aluviais (Batezelli *et al.*, 2006).

A gênese das estruturas conhecidas como "geodos" (embora nem todas, como o nome assim supõe, sejam esféricas ou semiesféricas)

em basaltos e outras rochas vulcânicas, bem como os mecanismos de preenchimento dessas cavidades não são completamente entendidos, suscitando ainda discussões de diversas ordens. Modernamente, duas principais hipóteses sobre sua formação parecem predominar: a) geração de "bolhas" através da desgaseificação do magma ascendente por exsolução dos componentes voláteis inicialmente dissolvidos (e.g., Proust & Fontaine, 2007; Morteani *et al.*, 2010); e b) formação epigenética por processos hidrotermais em baixas temperaturas, havendo brechação pela atuação de fluidos durante um estágio inicial de ruptura e posterior abertura das cavidades com a deposição dos minerais de preenchimento (e.g., Duarte *et al.*, 2009; Commin-Fischer *et al.*, 2010).

Esta segunda hipótese é ilustrada na figura 3, que mostra a percolação de fluidos de baixa temperatura através de fraturas. Juchem (1999) e Commin-Fischer *et al.* (2010) atribuíram o preenchimento destas cavidades à circulação de fluidos enriquecidos em sílica, e a sequência de deposição dos minerais à concentração de sílica nesse fluido. Ainda segundo tais autores, a deposição de calcedônia é favorecida a partir de uma solução supersaturada, enquanto o decréscimo de concentração de sílica possibilita o crescimento mais lento de cristais de quartzo maiores, ocorrendo um estágio final oxidante que pode resultar na cor da ametista.

Com relação à origem do fluido mineralizante, a maioria dos autores acredita que esteja relacionada ao Arenito Botucatu, subjacente, que encerra o Aquífero Guarani (Gilg *et al.*, 2003; Morteani *et al.*, 2010; Hartmann, 2014). Entretanto, Commin-Fischer *et al.* (2010) não descartaram também a possibilidade de contribuição magmática direta para a origem de tal fluido; neste caso a fonte da sílica para a cristalização da ametista poderia ser o vidro intersticial altamente reativo dos basaltos hospedeiros (conforme Gilg *et al.*, 2003; Proust & Fontaine, 2007), embora contribuições dos arenitos da Formação Botucatu ainda terem sido consideradas.

Dados obtidos de inclusões fluidas sugerem temperaturas abaixo de 100° C para o preenchimento dos geodos, logo, para a formação

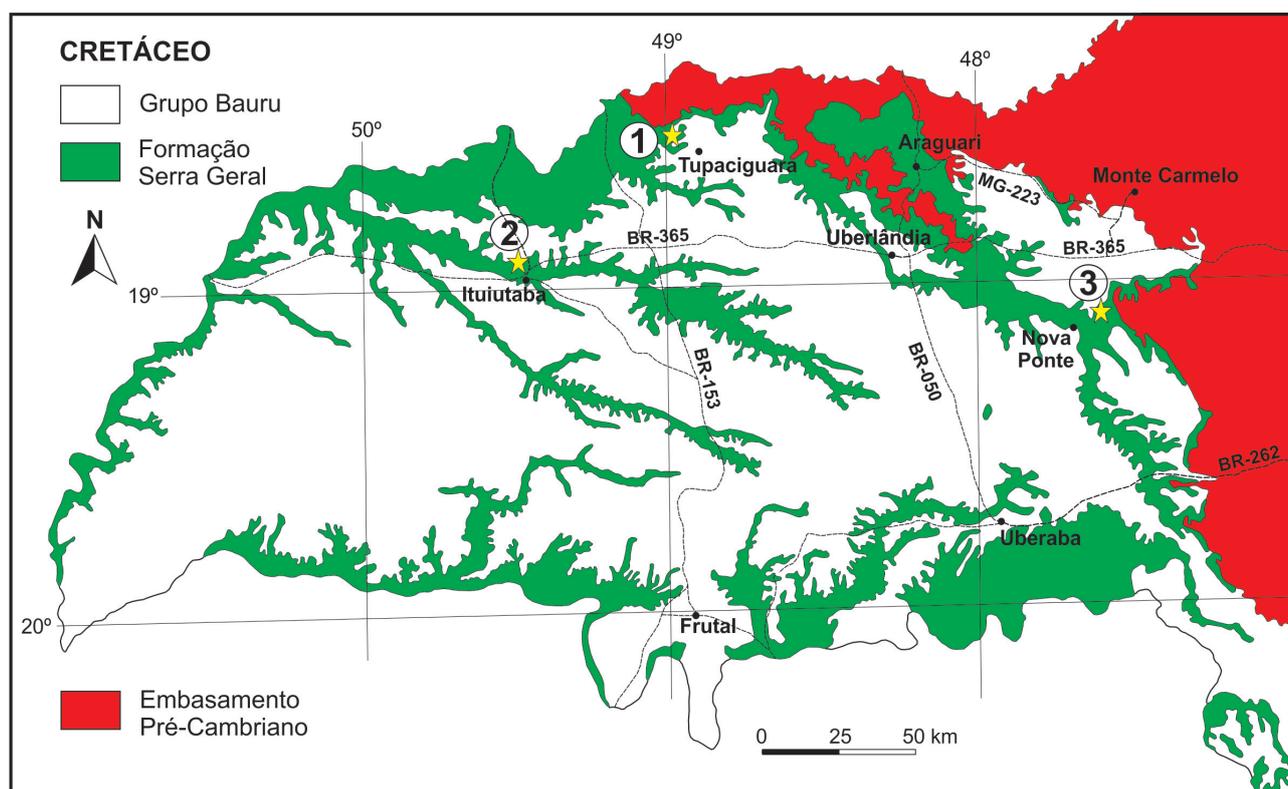


Figura 2. Geologia simplificada da região do Triângulo Mineiro (modificado de Pinto & Silva, 2014), ressaltando a distribuição da Formação Serra Geral com a localização das ocorrências de ametista estudadas neste trabalho. 1: Fazenda Barreiro (Tupaciguara); 2: Pedreira Incopol (Ituiutaba); 3: Tembezinho (Nova Ponte).

Figure 2. Simplified geology of the Triângulo Mineiro region (modified from Pinto & Silva, 2014), showing the distribution of the Serra Geral volcanism with the location of the amethyst occurrences studied in this work. 1: Barreiro Farm (Tupaciguara county); 2: Incopol Quarry (Ituiutaba county); 3: Tembezinho (Nova Ponte county).

da ametista e outros minerais associados (Juchem, 1999; Gilg *et al.*, 2003; Commin-Fischer *et al.*, 2010). Outros pesquisadores, no entanto, propuseram temperaturas consideravelmente maiores, alcançando até 204-238° C (Proust & Fontaine, 2007). Estudos de inclusões fluidas em ametista dos depósitos em basaltos do Triângulo Mineiro estão sendo conduzidos, a fim de fornecer informações adicionais sobre tal controvérsia.

No presente trabalho, duas ocorrências e um depósito com características ligeiramente distintas foram abrangidos (Fig. 2). O depósito de ametista da Fazenda Barreiro está localizado no município de Tupaciguara, nas proximidades da rodovia BR-452 (18°30'45" S e 49°01'45" W, altitude 700-710 m). A Pedreira Incopol (município de Ituiutaba) está localizada na periferia desta última cidade (18°57'36" S e 49°28'25" W, altitude 525-550 m), às margens da rodovia BR-365. A ocorrência de ametista da localidade de Tembezinho se situa no município de Nova Ponte

(19°06'19" S e 47°37'32" W, altitude 880-890 m), nas proximidades da represa homônima no Rio Araguari.

Os trabalhos consistiram em etapas de campo e etapas de laboratório e escritório. Nas etapas de campo, ocorridas ao longo de 2016 no âmbito do Projeto Triângulo Mineiro (CODEMIG/UFMG-IGC-CPMTC), foram visitados os locais descritos no presente trabalho, e coletaram-se amostras para posteriores análises geoquímicas. Em termos de estratigrafia dos derrames, não foi observada em campo nenhuma exposição contínua e completa da Formação Serra Geral desde sua base até o topo, impossibilitando a individualização de derrames conforme apresentado por Gomes (1996) e Juchem (1999). Estes autores definiram a estruturação dos derrames com base na presença de vesículas e no padrão de fraturamento dos diferentes níveis dos derrames.

Em laboratório, foram realizadas análises petrográficas dos basaltos coletados. Os

serviços de laminação e descrição das lâminas delgadas foram conduzidos nas dependências do Centro de Pesquisa Manoel Teixeira da Costa. Foram também enviadas ao Laboratório da SGS-GEOSOL, em Vespasiano-MG, seis amostras de basaltos coletados para determinação da geoquímica de rocha total, a partir do método de fusão com metaborato de lítio - ICP OES/MS.

A fim de corroborar as descrições petrográficas, efetuaram-se também análises de difração de raios X em argilominerais presentes nos basaltos coletados, pelo método de glicolação (saturação das amostras pulverizadas em etilenoglicol), no Laboratório de Raios X do Departamento de Engenharia de Minas (DEMIN – EE/UFMG). As amostras de argilominerais foram obtidas a partir de raspagem das cavidades preenchidas com tamanhos suficientes para extração do material com canivete ou instrumento de dentista.

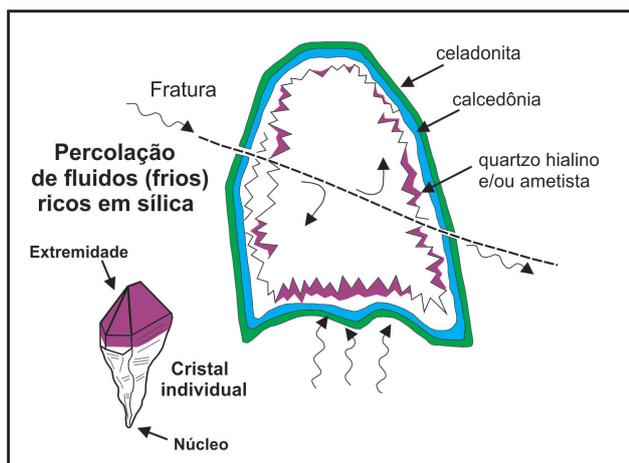


Figura 3. Modelo idealizado da formação de um geodo de ametista em cavidade basáltica (conforme Commin-Fischer *et al.*, 2010; modificado; figura esquemática; sem escala).

Figure 3. Idealized model of formation of an amethyst geode within basalt cavity (according to Commin-Fischer *et al.*, 2010, ; modified, ; schematic figure, ; without scale).

### 3 Resultados

Existem pouquíssimas referências a depósitos de ametista (ou de ágata) na região do Triângulo Mineiro, todas elas fazendo menções curtas (e.g. Leonardos, 1956; Mattos, 1974; Favacho-Silva, 2000). São detalhadas a seguir as ocorrências estudadas neste trabalho, bem como a geoquímica de suas rochas encaixantes.

#### 3.1 Fazenda Barreiro

O depósito situa-se no topo de uma colina com inclinações suaves para nordeste e sudeste, possuindo área aproximada de 1.000 m<sup>2</sup>. No local, segundo informações do proprietário da fazenda, a extração de geodos e cristais de ametista se dá desde 2011, atualmente integrando uma área minerária de Permissão de Lavra Garimpeira (PLG).

O nível inferior ao depósito encontra-se bem exposto logo a nordeste, em cortes artificiais de ambas as margens da rodovia (18°31'08" S e 49°01'01" W, altitude 650 m – Fig. 4). Neste nível, a rocha apresenta padrão de fraturamento semelhante ao entablamento descrito por Gomes (1996) em basaltos do Rio Grande do Sul (Fig. 4A), e também feições de alteração intempérica como esfoliação esferoidal (Fig. 4B). Ocorrem ainda, em cotas mais elevadas do afloramento, fraturas e/ou cavidades preenchidas por quartzo leitoso e hialino (Fig. 4C e 4D). Em termos petrográficos, o basalto é hipocrystalino, de textura ofítica a subofítica, composto principalmente por plagioclásio, de composição entre andesina e labradorita (An<sub>42</sub>-An<sub>57</sub>), clinopiroxênio ferrífero e vidro vulcânico, além de minerais opacos (Fig. 5). Tais minerais encontram-se praticamente inalterados, sendo que somente o vidro exhibe processo de desvitrificação.

A rocha hospedeira do nível mineralizado, situado cerca de 50 m acima do corte da estrada, é também um basalto hipocrystalino, porém com mais vesículas e amígdalas (preenchidas por argilominerais, principalmente esmectitas), conforme foi observado no campo e em lâmina delgada (Fig. 6). Petrograficamente apresenta textura ofítica a subofítica, sendo constituído de modo majoritário por plagioclásio, de composição entre andesina e labradorita (An<sub>33</sub>-An<sub>59</sub>), clinopiroxênio ferrífero e vidro vulcânico, além de minerais secundários decorrentes de alteração hidrotermal, como óxidos/hidróxidos de ferro (Fig. 6A-B) e esmectita (Fig. 6C-D), esta comprovada por difração de raios X (Fig. 7), preenchendo cavidades ou interstícios da matriz.

A mineralização ocorre a oeste da sede da fazenda (Fig. 8A) em um regolito oriundo da alteração desse basalto, com cerca de

3-5 m de espessura. Este nível encontra-se bastante retrabalhado superficialmente pela atividade garimpeira (Fig. 8B). No local, podem ser observadas diversas pilhas com grande quantidade de cristais, aparentemente rejeitados, já quase sem a coloração violeta típica (Fig. 8C). No entanto, as amostras que foram desenterradas logo abaixo da superfície em geral apresentam um tom roxo mais evidente (Fig. 8D), indicando a perda de cor dos cristais perante exposição prolongada à luz solar.

A ametista neste depósito é encontrada principalmente em geodos esféricos a semiesféricos, às vezes um pouco alongados num dos eixos, exibindo formato cônico, de porte centimétrico a decimétrico (Fig. 8E). Tais geodos podem apresentar uma fina camada de calcedônia como preenchimento inicial, e

massas aparentemente argilosas compactas ao centro (Fig. 8F), mas também compostas de sílica conforme identificado por difração de raios X; celadonita capeando os geodos não foi observada neste local (ela é típica das amostras da região sul do país).

Individualmente, na maioria das vezes os cristais possuem formato alongado, de cristalização imperfeita, com a terminação mais larga que a base. A coloração apresenta zonamento, sendo em geral mais intensa do meio para a terminação da pirâmide dos cristais. Estes ainda exibem comumente linhas de crescimento paralelas entre si e perpendiculares ao eixo cristalográfico "c". Em termos mineralógicos e cristalográficos ressalta-se a semelhança com as ametistas em geodos do Rio Grande do Sul.

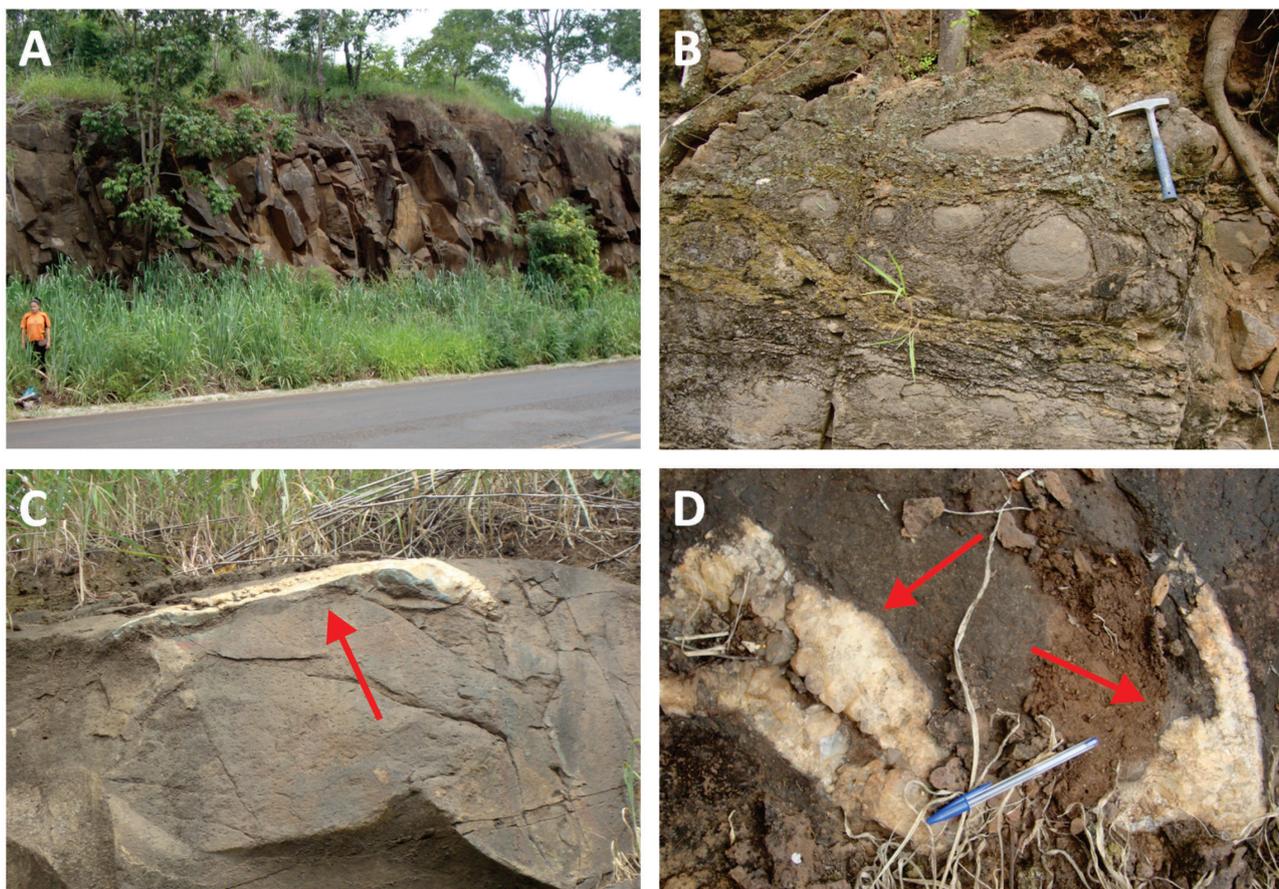


Figura 4. Aspectos gerais da rocha no nível inferior ao depósito da Fazenda Barreiro. A) Vista parcial do afloramento de basalto fraturado do nível inferior do depósito em corte da Rodovia BR-452; B) Neste mesmo afloramento, ocorrem feições de esfoliação esferoideal; C) Preenchimento de cavidade com quartzo leitoso, em forma de veio (seta); D) Detalhe de outros preenchimentos, com quartzo hialino drusiforme de forma irregular (setas).

Figure 4. General aspects of the rock at the lower level of the Barreiro Farm deposit. A) Partial view of the outcropping fractured basalt at the deposit lower level in BR-452 roadside; B) At this same outcrop, spheroidal exfoliation features occur; C) Milky quartz filling cavity with vein shape (arrow); D) Detail of other cavities filled with drusiform hyaline quartz irregularly shaped (arrows).

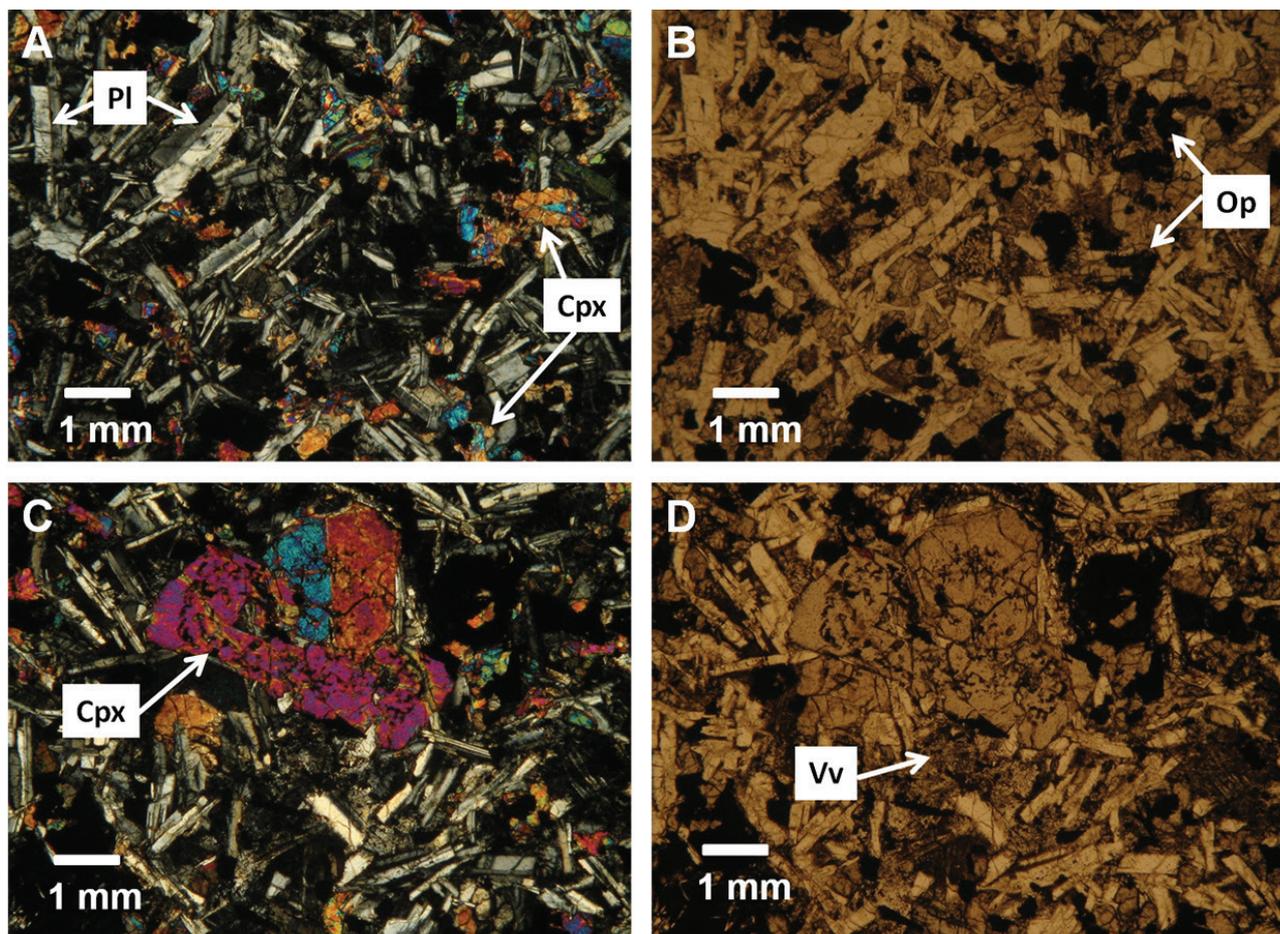


Figura 5. Fotomicrografias do basalto inferior, maciço, da Fazenda Barreiro. A) Aspecto geral da matriz da rocha (polarizadores cruzados), composta por plagioclásio (Pl), clinopiroxênio (Cpx) e vidro vulcânico (Vv); B) Mesma imagem anterior, evidenciando os opacos xenomórficos (Op) (polarizadores descruzados); C) Detalhe dos fenocristais de piroxênio (polarizadores cruzados); D) Mesma imagem anterior (polarizadores descruzados).

Figure 5. Photomicrographs of the lower, massive basalt from Barreiro Farm. A) General aspect of the rock's matrix (crossed polarizers), composed of plagioclase (Pl), clinopyroxene (Cpx) and volcanic glass (Vv); B) Same picture as the previous, emphasizing xenomorphic opaque minerals (Op) (uncrossed polarizers); C) Detail of pyroxene phenocrystals (crossed polarizers); D) Same picture as the previous (uncrossed polarizers).

### 3.2 Pedreira Incopol

Na área da pedreira da Incopol Indústria e Comércio Pontal Ltda., que possui concessão de lavra de 590 ha, minera-se o basalto para produção de brita visando seu uso na construção civil e ainda como pó, o material mais fino resultante da fragmentação da rocha, que é utilizado em misturas de massa asfáltica. O relevo na região é razoavelmente plano, sendo abrupto em dois níveis artificiais dados pelos paredões da mina. As rochas aflorando em tais níveis podem ser bem distinguidas; no nível inferior, o basalto é visivelmente mais maciço e denso, de coloração cinza escura (alvo principal de lavra da empresa), e apresenta fraturamento semelhante ao entablamento descrito por Gomes (1996) em basaltos do Rio Grande do Sul (Fig. 9A).

No nível superior, que hospeda a mineralização de ametista (e calcita), o basalto apresenta por sua vez coloração cinza mais clara, é vesicular e amigdaloidal, sendo medianamente alterado e possuindo fraturas métricas (preenchidas ou não), além de cavidades desde milimétricas até métricas (Fig. 9B). Essas cavidades podem ser preenchidas por minerais variados, como esmectita, quartzo hialino, quartzo ametista (Fig. 9C), calcita (Fig. 9D) e celadonita.

A ametista ocorre neste nível aparentemente com pouca frequência. Entretanto, foi encontrada, entre os fragmentos gerados pela detonação com explosivos, uma amostra de excelente qualidade, com padrão de preenchimento de fratura (Fig. 9C). Além disso, o gerente da mina afirmou que o encontro dessa variedade não é incomum, e são

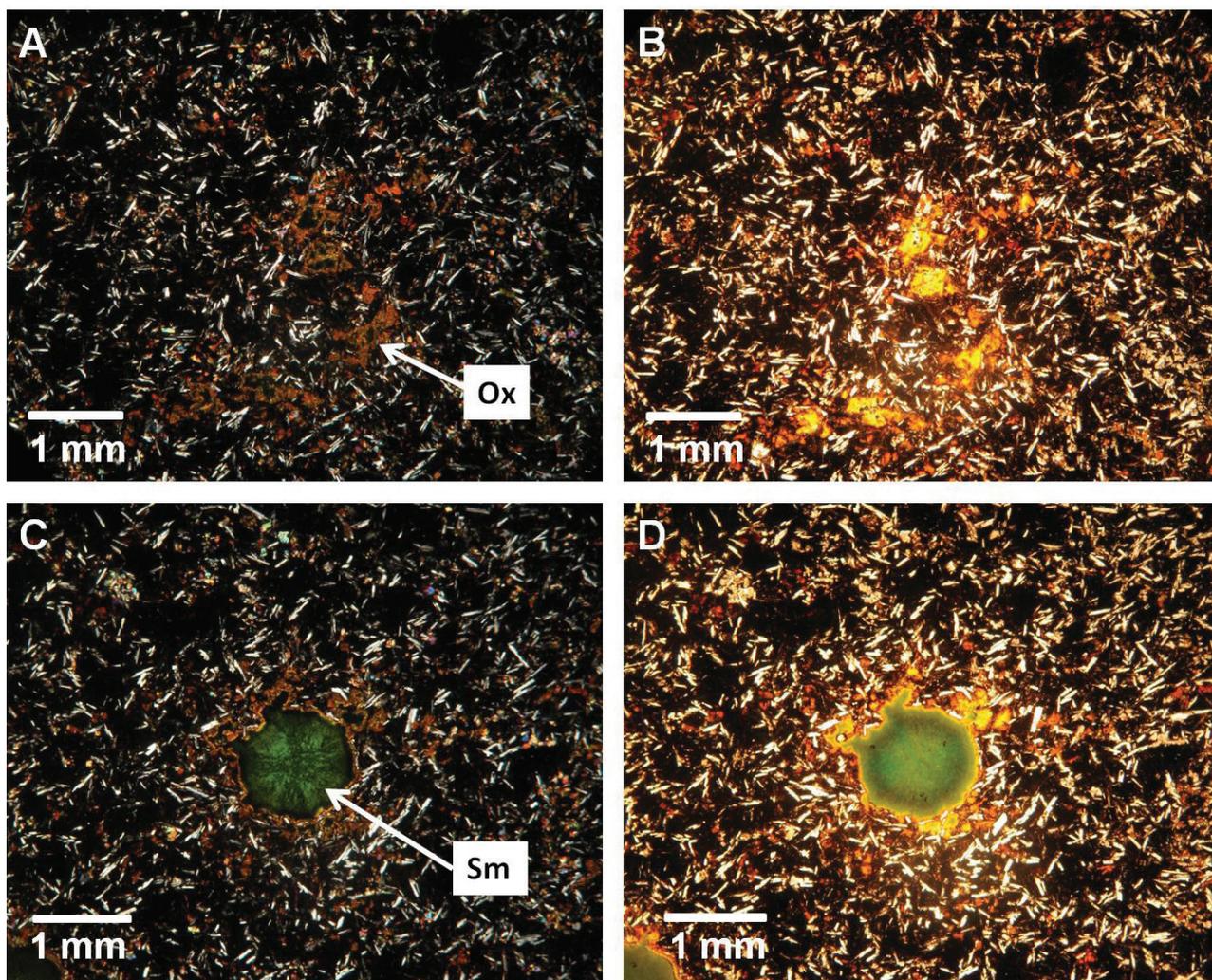


Figura 6. Fotomicrografias do basalto superior, vesicular (Fazenda Barreiro), portador da mineralização. A) Aspecto geral da matriz da rocha, composta por plagioclásio, clinopiroxênio e vidro vulcânico, além de óxidos/hidróxidos de ferro (Ox) secundários nos interstícios da matriz (polarizadores cruzados); B) Mesma imagem anterior (polarizadores descruzados); C) Cavidade preenchida por esmectita (Sm) (polarizadores cruzados); D) Mesma imagem anterior (polarizadores descruzados).

Figure 6. Photomicrographs of the upper, vesicular and mineralized basalt from Barreiro Farm. A) General aspect of the rock's matrix (crossed polarizers), composed of plagioclase, clinopyroxene and volcanic glass, besides interstitial secondary iron oxides/hydroxides (Ox); B) Same picture as the previous (uncrossed polarizers); C) Smectite (Sm) filling cavity (crossed polarizers); D) Same picture as the previous (uncrossed polarizers).

levadas pelos caminhoneiros como *souvenirs*. A maioria dos cristais de quartzo encontrada *in situ*, porém, consistia das variedades hialina ou branco leitosa. A ocorrência de minerais preenchendo cavidades mostra potencial para produção de amostras de coleção, mas como estas são dispersas e esporádicas não constituem um produto de interesse por parte da empresa.

Em lâmina delgada, foram estudadas amostras representativas tanto do nível inferior, maciço, quanto do nível superior, rico em cavidades contendo minerais secundários. A amostra do nível inferior, descrita como um basalto hipocristalino, de textura ofítica a

subofítica e matriz microporfírica, é composta na maior parte por plagioclásio, predominantemente andesina de composição entre  $An_{38}$  e  $An_{49}$ , vidro vulcânico e clinopiroxênio ferrífero. Os fenocristais de plagioclásio e piroxênio se mostram bastante alterados, e podem ultrapassar 4 mm (Fig. 10A-B). O vidro exibe processos de desvitrificação, e a calcedônia aparece preenchendo cavidades (Fig. 10C-D), sendo interpretada como resultado da alteração do próprio vidro na interação com fluidos.

As amostras do nível superior foram caracterizadas como basaltos hipocristalinos amigdaloidais, de textura ofítica a subofítica,

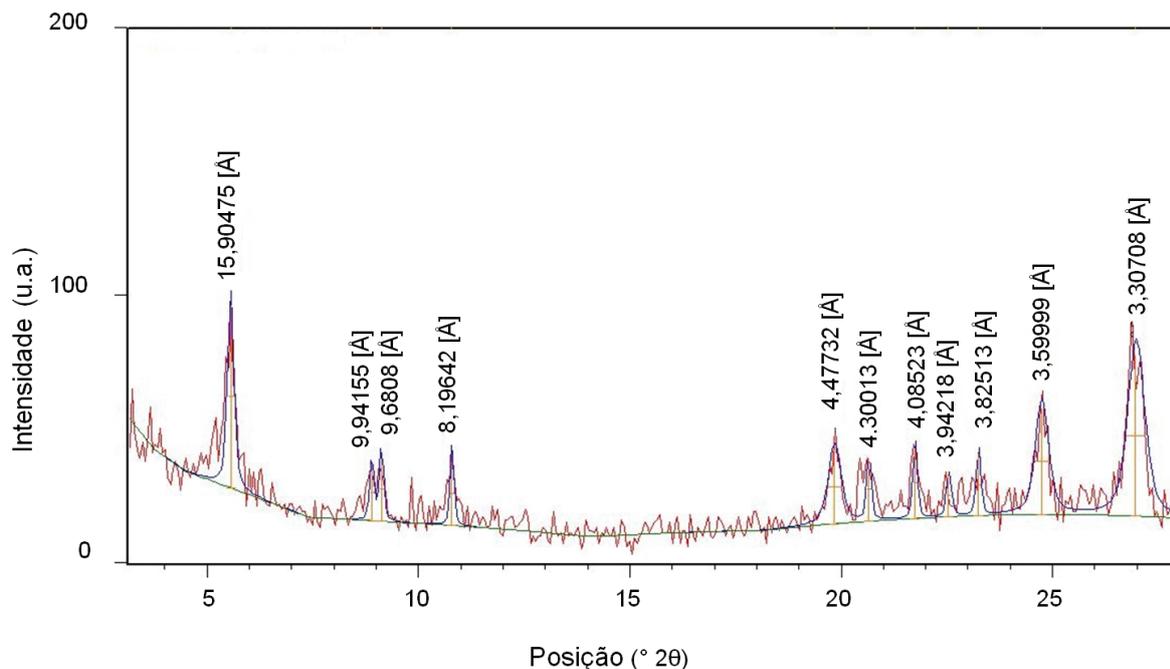


Figura 7. Difratograma de amostra de argilomineral esverdeado da Fazenda Barreiro, após glicolação, com o pico principal (15,90475 Å) comprovando a presença de esmectita.

Figure 7. Diffractogram of greenish clay mineral sample from Barreiro Farm, after glycolation, showing main peak (15,90475 Å) which certify smectite presence.

formados principalmente por plagioclásio de composição entre andesina e labradorita ( $An_{44}$  e  $An_{57}$ ), clinopiroxênio ferrífero e vidro vulcânico, além de minerais opacos acessórios. Fenocristais de plagioclásio e piroxênio exibem por vezes textura glomeroporfírica (Fig. 11A-B). Os basaltos apresentam também minerais decorrentes de sua alteração, como quartzo e esmectita (Fig. 11C-D), preenchendo cavidades e/ou interstícios da matriz. A esmectita destas amostras também foi comprovada por difração de raios X (Fig.12).

### 3.3 Tembezinho

Neste local, o relevo local é predominantemente plano, com declive suave em direção às margens da represa de Nova Ponte. Esta ocorrência encontra-se nas encostas de uma pequena drenagem seca, afluente do Rio São João, que por sua vez é um tributário direto do Rio Araguari.

A mineralização está dispersa em um regolito basáltico de cor marrom avermelhado, de espessura desconhecida, aparecendo principalmente na forma de geodos bem arredondados e de porte decimétrico (Fig.

13A). A maioria das amostras encontradas nesta localidade são bastante friáveis, se desmanchando com facilidade. Esse material aparece parcialmente enterrado no regolito, que já foi intensamente trabalhado por máquinas para fins de agricultura. Segundo o relato de um trabalhador da fazenda próxima, que acompanhou a visita, frequentemente amadores pesquisam e recolhem drusas e cristais no local, muitas vezes com a coloração violeta típica da ametista. Entretanto, todo material então descoberto apresentou-se completamente incolor (Fig.13B). Afloramentos dispersos de arenito fino e silicificado da Formação Botucatu ocorrem nos arredores, aparentemente entremeados aos basaltos.

### 3.4 Geoquímica dos basaltos encaixantes

Amostras frescas de basalto foram coletadas na Fazenda Barreiro e na Pedreira Incopol para análises geoquímicas. Foram também analisadas duas outras amostras de basalto maciço da região do Triângulo Mineiro, coletadas nos municípios de Nova Ponte (19°16'59" S e 47°37'26" W) e de Estrela do Sul (18°52'36" S e 47°56'44" W), onde não são

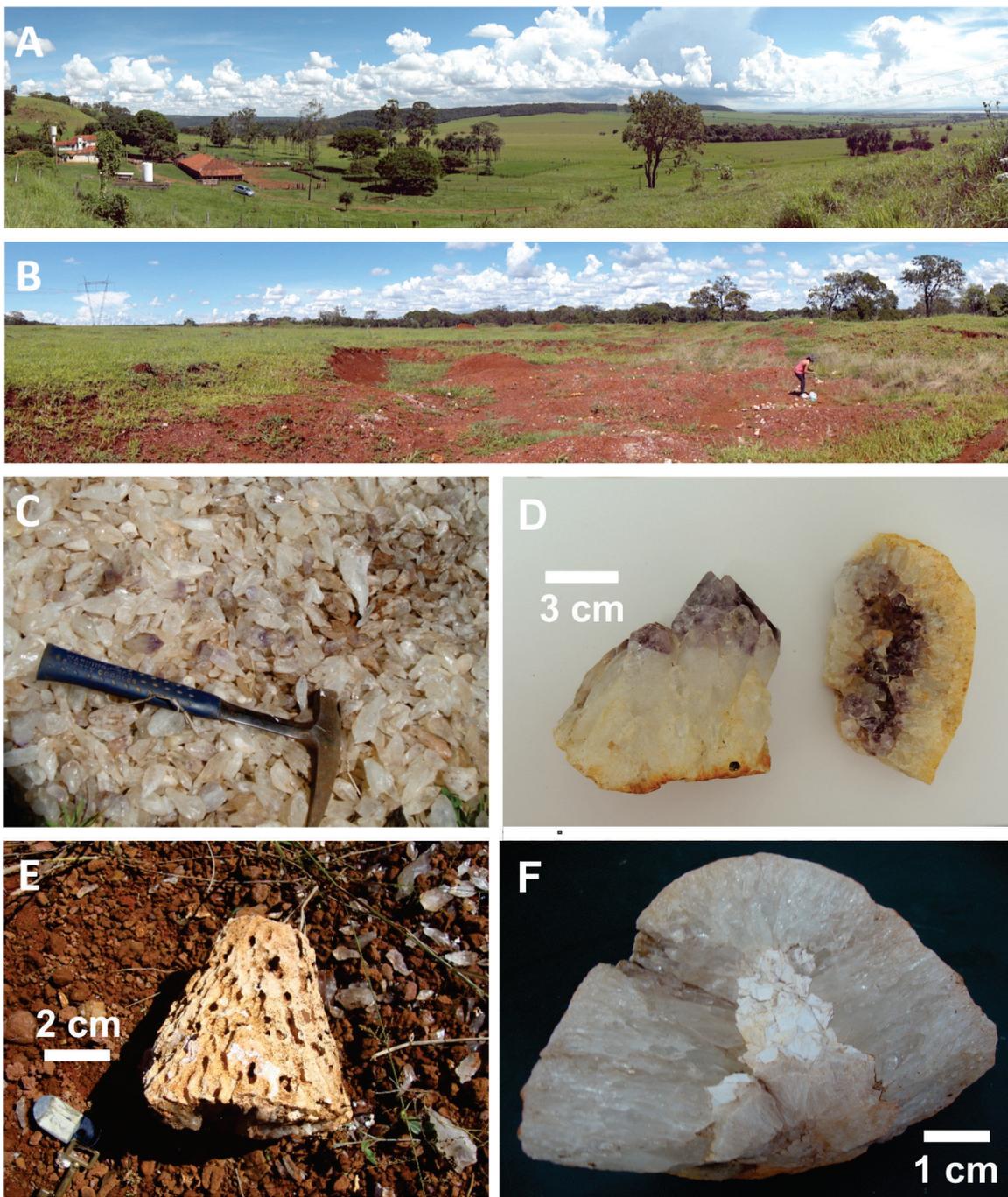


Figura 8. Imagens de campo do depósito da Fazenda Barreiro. A) Vista geral da fazenda; B) Vista geral do depósito; C) Lote de cristais quebrados, aparentemente rejeitados na lavra, onde se ressalta a perda intensa de cor na maioria das amostras; D) Amostras recuperadas com coloração mais intensa; E) Fragmento de geodo típico desta localidade, com formato cônico; F) Parte de geodo preenchido por quartzo incolor e quartzo microcristalino ao centro.

Figure 8. Field pictures of the Barreiro Farm deposit. A) General view of the farm; B) General view of the deposit; C) Batch of broken crystals, apparently discarded at the mining activity, which show intense loss of color for most samples; D) Recovered samples with more intense color; E) Geode fragment typical for this locality, with conical shape; F) Portion of geode filled with colorless quartz and microcrystalline quartz in the center.

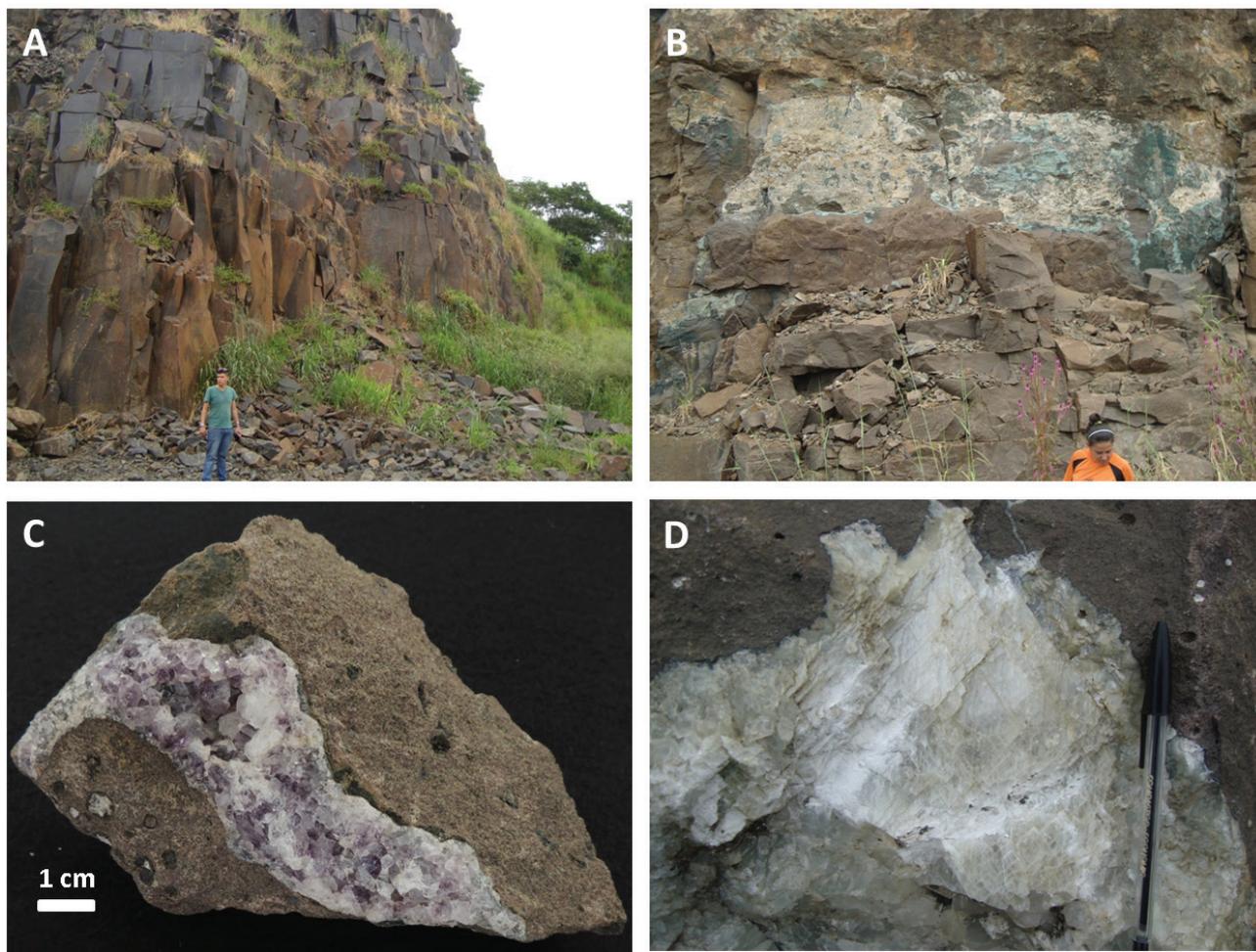


Figura 9. Imagens de campo da Pedreira Incopol. A) Visão do nível inferior da mina, onde o basalto mostra feições de entablamento, sendo explotado para a produção de brita e pó de rocha; B) Porção superior da mina, em que ocorre o basalto mineralizado com quartzo incolor a leitoso e ametista, destacando a forte alteração hidrotermal da rocha; C) Amostra de ametista preenchendo fratura irregular em basalto deste nível superior; D) Cavidade de formato irregular preenchida por quartzo + calcita.

*Figure 9. Field pictures of the Incopol Quarry. A) View of the mine lower level, where the basalt shows entablature features, being exploited for gravel and rock powder production; B) Upper portion of the mine, in which mineralized basalt occurs with colorless to milky and amethyst quartz, emphasizing strong hydrothermal alteration of the rock; C) Amethyst sample filling irregular fracture in this upper level basalt; D) Irregularly shaped cavity filled with quartz + calcite.*

conhecidas ocorrências de ametista, para fins de comparação.

Os resultados analíticos apresentados (Tab. 1) apontam para basaltos com altos teores de Ti (>2,67%) e baixos de voláteis. Comparando apenas os valores de perda ao fogo, que Peate *et al.* (1992) associam à intensidade da alteração sofrida pela rocha, os basaltos do Triângulo Mineiro analisados apresentam valores mais baixos, entre 0,21 e 0,87, com média de 0,55. Os de Ametista do Sul variam entre 1,4 e 5,4 (média de 3,02), segundo análises de Amorim (2007), e entre 0,5 e 5,1 (média de 2,27), conforme Rosenstengel (2011). Nas análises de Duarte (2008) para os basaltos de Artigas, Uruguai, os valores variam entre 0,1 e 7,6 com média de 1,72.

Os resultados foram plotados no diagrama TAS (conforme Le Bas *et al.*, 1986; fig. 14). Nesta figura, os campos A e B representam multidados geoquímicos dos basaltos hospedeiros de geodos com ametista de Ametista do Sul, Rio Grande do Sul (Amorim, 2007; Rosenstengel, 2011) e de Artigas, Uruguai (Duarte, 2008), respectivamente.

Embora a amostragem tenha sido restrita, os basaltos associados às mineralizações no Triângulo Mineiro (amostras 1 a 4), bem como os aparentemente não mineralizados (amostras 5 e 6), em sua maioria se assemelham em termos geoquímicos aos de Ametista do Sul, com exceção da amostra do nível superior da Fazenda Barreiro, que foi classificada como um andesito basáltico de acordo com o diagrama

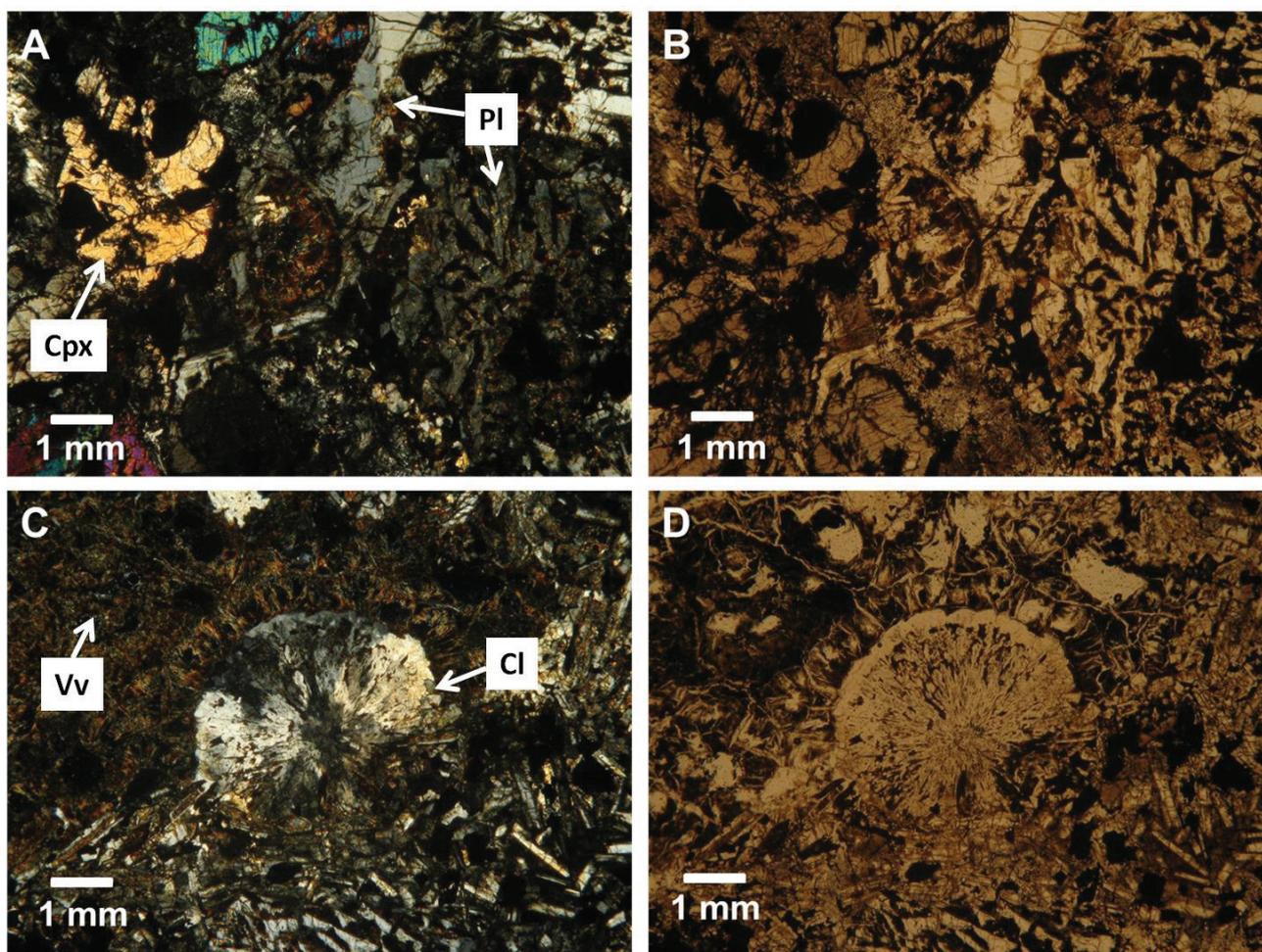


Figura 10. Fotomicrografias do basalto inferior, maciço, da Pedreira Incopol. A) Fenocristais alterados de plagioclásio (Pl), e clinopiroxênio (Cpx), da matriz da rocha (polarizadores cruzados); B) Mesma imagem anterior (polarizadores descruzados); C) Agregado de calcedônia (Cl) preenchendo cavidade (polarizadores cruzados), e vidro vulcânico (Vv) exibindo desvitrificação; D) Mesma imagem anterior (polarizadores descruzados).

Figure 10. Photomicrographs of the lower, massive basalt from Incopol Quarry. A) Altered plagioclase (Pl) and clinopyroxene (Cpx) phenocrysts from the rock's matrix (crossed polarizers); B) Same picture as the previous (uncrossed polarizers); C) Chalcedony (Cl) aggregate filling cavity (crossed polarizers), and volcanic glass (Vv) showing devitrification; D) Same picture as the previous (uncrossed polarizers).

TAS, correspondendo ao extremo silicoso dos basaltos do Uruguai (Fig. 14).

Na região sul do país, Peate *et al.* (1992) distinguiram seis tipos magmáticos nos derrames basálticos da Formação Serra Geral, com base principalmente na geoquímica do titânio: os de baixo Ti ( $\text{TiO}_2 < 2\%$ ) – Gramado, Esmeralda e Ribeira – e os de alto Ti ( $\text{TiO}_2 > 2\%$ ) – Urubici, Pitanga e Paranapanema. Tais variações composicionais possuem ligação direta com os processos de ruptura continental e abertura do Oceano Atlântico Sul (e.g., Wildner *et al.*, 2007). Segundo estes últimos autores, o vulcanismo teve início com a geração de magma de alto Ti na parte setentrional da bacia, tendo evoluído para magmas contaminados e altamente fracionados de baixo Ti na porção sul.

Os basaltos portadores de geodos da região de Ametista do Sul foram relacionados às variedades químicas Pitanga e Paranapanema (e.g., Gilg *et al.*, 2003; Amorim, 2007; Rosenstengel, 2011), enquanto os da região de Artigas, no Uruguai, corresponderiam ao tipo Gramado, de baixo Ti (Duarte, 2008). Os derrames da região do Triângulo Mineiro, em que se ressalte a ainda baixa quantidade de análises, se aproximam do tipo Urubici. Os derrames do nordeste do Estado de São Paulo, os mais próximos geograficamente aos da área estudada com análises disponíveis, também correspondem a esta mesma tipologia (Fernandes *et al.*, 2010).

Entre os elementos traços, observam-se os baixos valores de Cs nos basaltos de Minas Gerais (Tabela 1); nos de Artigas (Uruguai) até

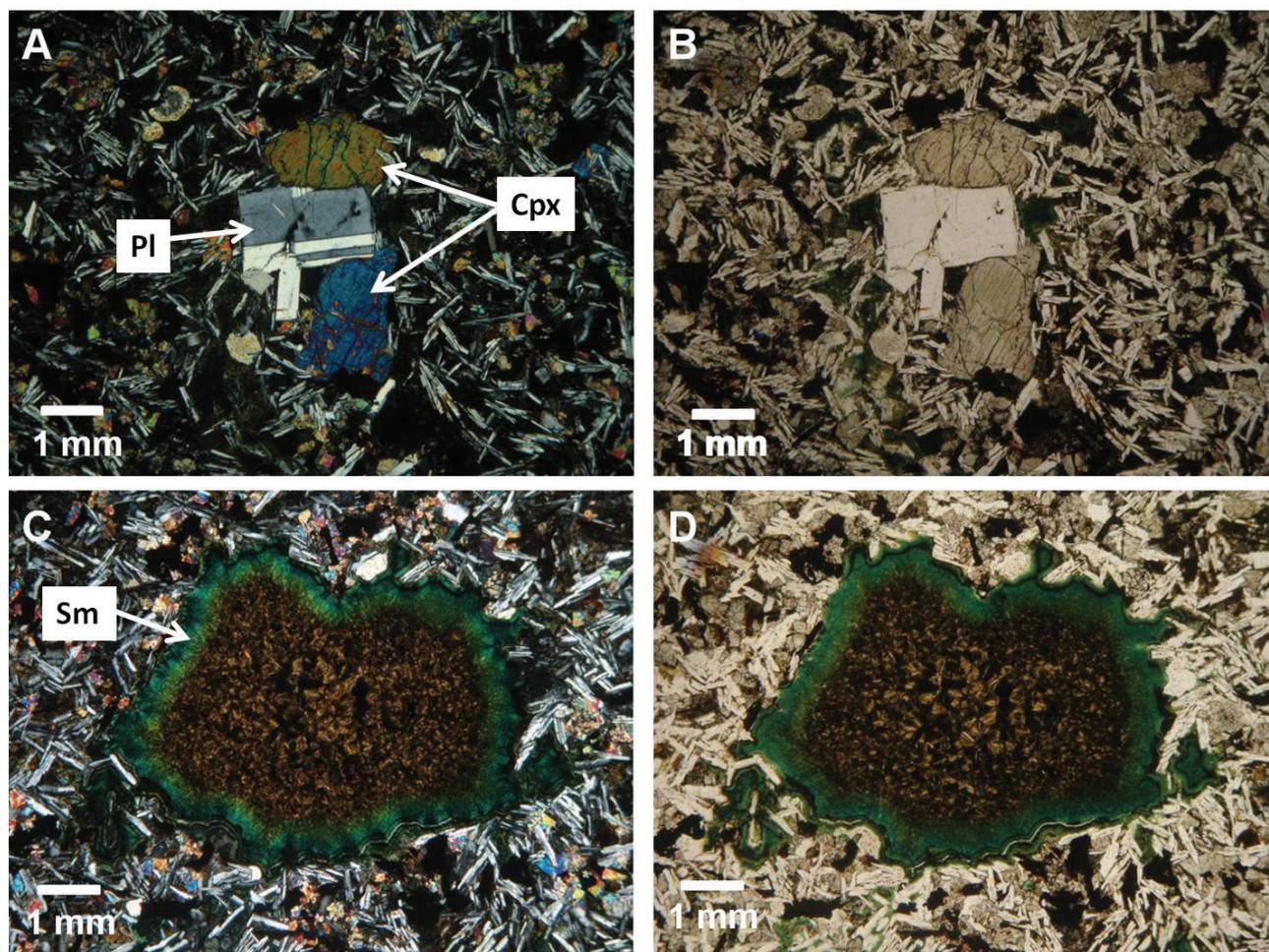


Figura 11. Fotomicrografias do basalto superior, vesicular da Pedreira Incopol. A) Fenocristais de plagioclásio (Pl) e clinopiroxênio (Cpx) exibindo textura glomeroporfírica (polarizadores cruzados); B) Mesma imagem anterior (polarizadores descruzados); C) Agregado de esmectita (Sm) preenchendo cavidade da rocha (polarizadores cruzados); D) Mesma imagem anterior (polarizadores descruzados).

Figure 11. Photomicrographs of the upper, vesicular basalt from the Incopol Quarry. A) Plagioclase (Pl) and clinopyroxene (Cpx) phenocrysts showing glomeroporphyritic texture (crossed polarizers); B) Same picture as the previous (uncrossed polarizers); C) Smectite (Sm) aggregate filling cavity (crossed polarizers); D) Same picture as the previous (uncrossed polarizers).

9,5 ppm deste elemento são verificados (Duarte, 2000). Já em relação ao Zn, na região sul os valores de tal elemento em geral são duas a três vezes menores (Amorim, 2007; Duarte, 2008). Quanto aos basaltos próximos do norte de São Paulo, os valores de elementos menores e traços são extremamente semelhantes (Fernandes et al., 2010).

#### 4 Discussão dos resultados

As ocorrências estudadas pertencem a um tipo de mineralização relativamente comum em termos mundiais, em que cavidades na porção superior do nível central de derrames basálticos são preenchidas por ametista, bem como outros minerais tardios formados tipicamente em

baixas temperaturas (Gomes, 1996; Juchem, 1999). No Brasil, os depósitos de Ametista do Sul (RS) podem ser considerados como de "classe mundial". No Planalto do Deccan, na Índia, também possuem renome internacional os depósitos que produzem minerais do grupo das zeólitas, principalmente para colecionadores.

Na região do Triângulo Mineiro, as mineralizações descritas apresentam semelhanças e diferenças entre si e em relação aos depósitos do sul do país, sendo, ao que parece, bem menos potentes e expressivas do que nestes. Os cristais de ametista coletados se assemelham cristalograficamente e na cor pouco intensa. Calcita e celadonita, minerais comuns e abundantes associados à ametista do RS, foram observados apenas na ocorrência da Pedreira

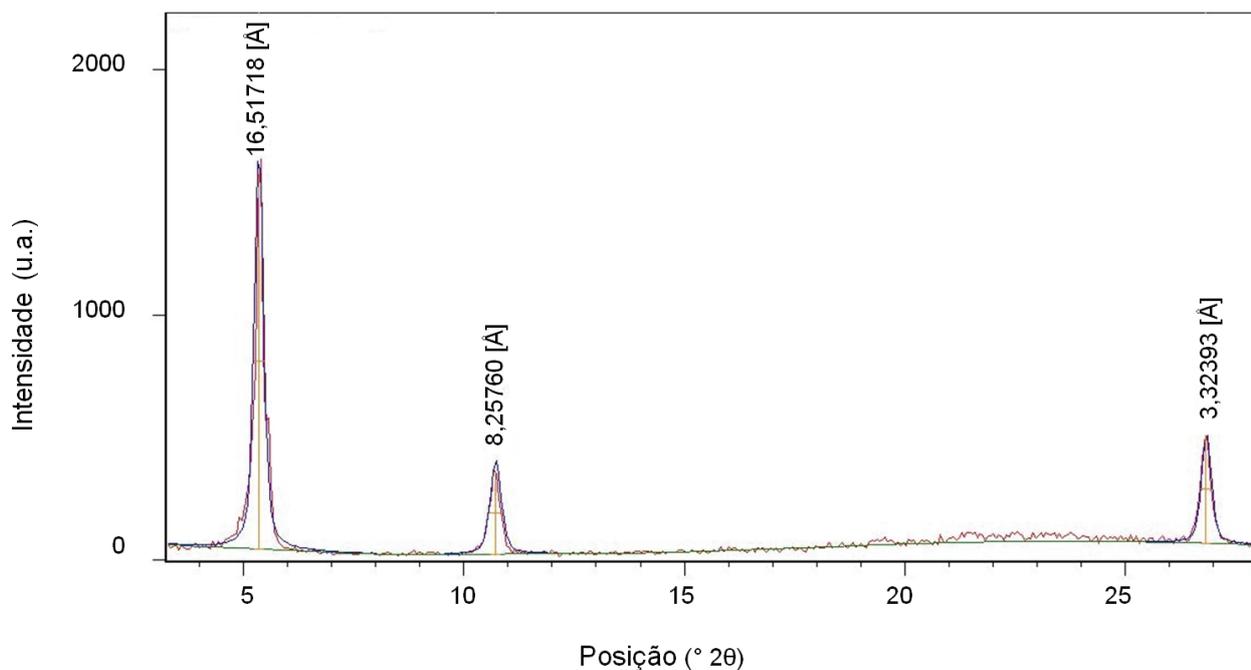


Figura 12. Difratoograma de amostra de argilomineral esverdeado da Pedreira Incopol, após glicolação, com o pico principal (16,51718 Å) comprovando a presença de esmectita.  
Figure 12. Diffractogram of greenish clay mineral sample from Incopol Quarry, after glicolation, showing main peak (16,51718 Å) which certify smectite presence.

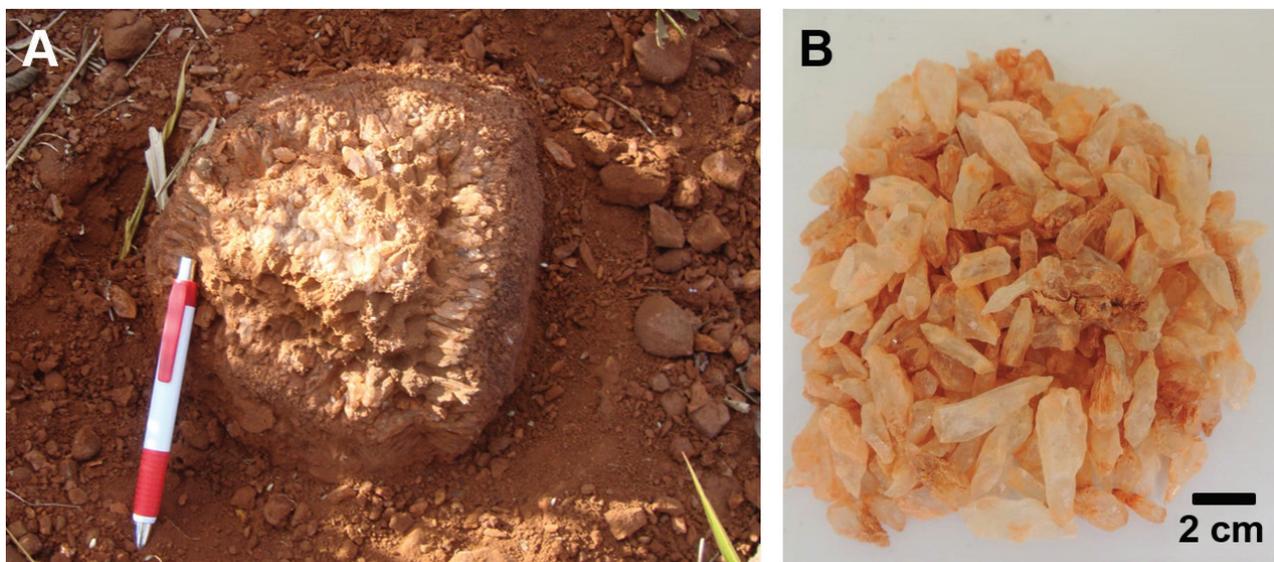


Figura 13. Amostras coletadas na ocorrência de Tembezinho. A) Geodo semi-esférico de quartzo hialino encontrado no solo basáltico da ocorrência de Tembezinho; B) Cristais desagregados de quartzo a partir de geodos alterados dessa mesma área.  
Figure 13. Samples collected at the Tembezinho occurrence. A) Semispheric geode filled with hyaline quartz, found in the basaltic soil of the Tembezinho occurrence; B) Disaggregated quartz crystals from altered geodes from this same area.

Tabela 1. Análises químicas por ICP-OES das rochas básicas analisadas. Amostras: 1 – Fazenda Barreiro, nível inferior. 2 – Fazenda Barreiro, nível superior. 3 – Pedreira Incopol, nível inferior. 4 – Pedreira Incopol, nível superior. 5 – Estrela do Sul. 6 – Nova Ponte (Análises Lab. SGS-GEOSOL; dados de óxidos em % em peso, elementos traço em ppm; todo ferro como Fe3+; (<) abaixo do limite de detecção).

Table 1. ICP-OES chemical analyses of sampled basic rocks. Samples: 1 – Barreiro Farm, lower level. 2 – Barreiro Farm, upper level. 3 – Incopol Quarry, lower level. 4 – Incopol Quarry, upper level. 5 – Estrela do Sul. 6 – Nova Ponte. (Analyses performed at the SGS-GEOSOL laboratory; oxides data in weight %, chemical elements in ppm; all iron as Fe3+; (<) below detection limit).

	1	2	3	4	5	6
SiO <sub>2</sub>	51,90	57,17	50,63	49,45	50,56	50,05
TiO <sub>2</sub>	3,37	2,67	3,37	3,98	3,41	3,03
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,22	11,04	11,44	12,20	12,55	12,71
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,14	13,59]	16,04	15,53	14,32	13,58
MnO	0,19	0,17	0,16	0,27	0,22	0,21
MgO	3,78	2,32	3,75	3,39	4,68	5,32
CaO	7,35	5,20	5,74	7,55	8,85	9,04
Na <sub>2</sub> O	2,71	2,35	2,80	2,85	2,62	2,37
K <sub>2</sub> O	1,57	2,48	1,88	2,37	0,93	0,86
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,44	0,54	0,67	0,46	0,39	0,32
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,02
LOI	0,21	0,87	0,83	0,63	0,49	0,28
Total	97,88	98,40	97,31	98,68	99,02	97,81
Zn	145	142	170	139	158	131
Ni	26	17	9	13	55	69
Ba	474	596	574	604	443	343
Co	31,9	26,7	29,4	32,6	37,9	40
Cs	0,22	0,05	0,25	0,28	0,20	0,16
Cu	51	70	47	54	177	189
Ga	23,2	22,1	22,7	21,8	22,5	21,2
Hf	7,36	8,26	7,74	6,75	5,57	4,96
Nb	24,16	26,34	29,98	28,80	20,77	21,76
Rb	30,0	40,3	35,7	49,8	20,1	17,6
Sn	2,2	2,6	2,6	2,0	3,4	1,5
Sr	418	353	718	449	449	424
Ta	1,18	1,22	1,62	1,66	1,13	0,93
Th	4,5	6,9	6,3	5,3	4,3	2,6
U	0,97	1,17	1,29	1,85	0,85	0,66
V	373	267	279	398	410	386
W	0,5	1,3	1,2	0,9	0,4	<0,1
Zr	284	326	308	284	213	176
Y	36,12	43,67	39,00	30,84	31,56	27,72
La	36,7	45,7	47,3	36,2	31,7	27,7
Ce	77,5	92,8	95,9	74,4	65,3	56,3
Pr	10,03	12,25	12,44	9,62	8,49	7,31
Nd	42,5	51,6	50,6	39,2	35,3	30,9
Sm	9,5	11,4	10,8	8,5	7,9	6,8
Eu	2,83	3,18	3,03	2,52	2,33	2,09
Gd	8,65	10,24	9,60	7,66	7,24	6,40
Tb	1,33	1,59	1,42	1,14	1,13	0,99
Dy	7,18	8,43	7,62	5,97	6,07	5,28
Ho	1,38	1,63	1,48	1,17	1,18	1,03
Er	3,57	4,14	3,92	3,00	3,07	2,75
Tm	0,48	0,57	0,54	0,41	0,42	0,37
Yb	2,9	3,4	3,1	2,6	2,6	2,2
Lu	0,42	0,49	0,46	0,40	0,38	0,32

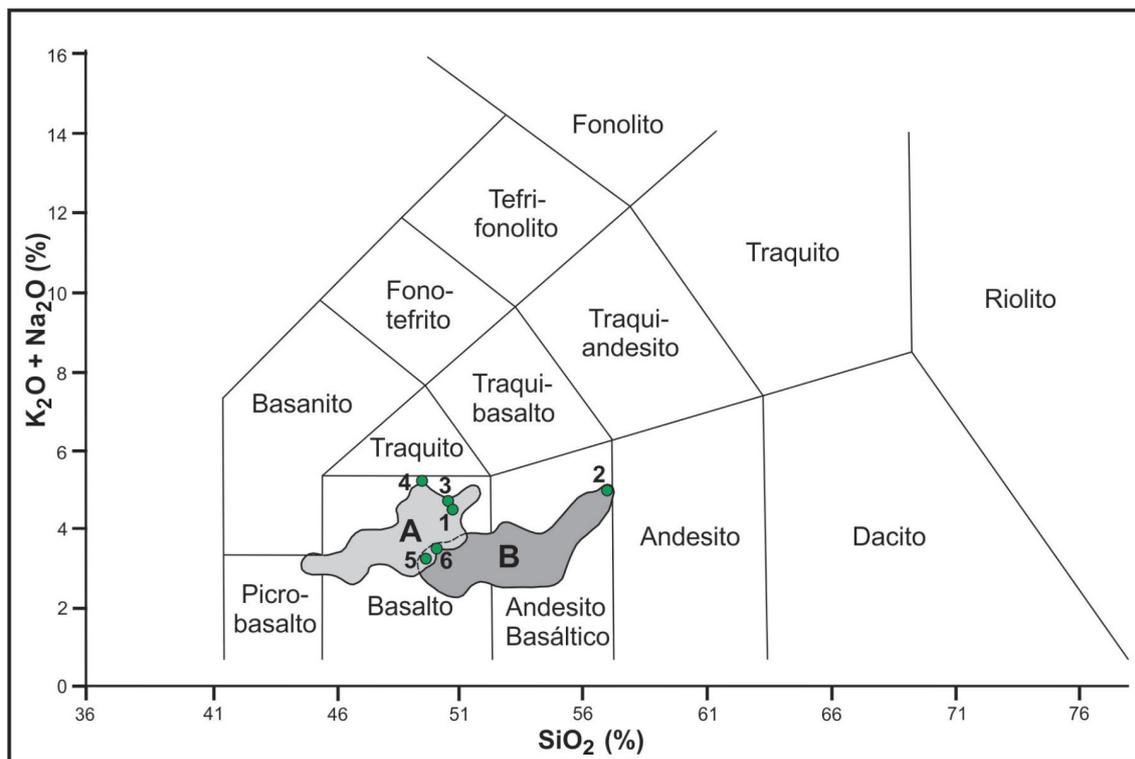


Figura 14. Diagrama TAS (total de álcalis x sílica) das rochas básicas analisadas (círculos verdes) em comparação com as multianálises de rochas congêneres do Rio Grande do Sul (A) e Uruguai (B). 1, Fazenda Barreiro, nível basal. 2, Fazenda Barreiro, nível superior. 3, Pedreira Incopol, nível basal. 4, Pedreira Incopol, nível superior. 5, Estrela do Sul. 6, Nova Ponte. *Figure 14. TAS (total alcalis x silica) diagram of the analyzed basic rocks (green circles) compared to multianalyses of akin rocks from Rio Grande do Sul (A) and Uruguay (B). 1, Barreiro Farm, lower level. 2, Barreiro Farm, upper level. 3, Incopol Quarry, lower level. 4, Incopol Quarry, upper level. 5, Estrela do Sul. 6, Nova Ponte.*

Incopol. Quimicamente, os basaltos analisados são de alto Ti, assim como as encaixantes dos depósitos de Ametista do Sul, embora se enquadrem em um tipo magmático diferente. Portanto, aparentemente a existência da mineralização em ametista não é condicionada pelo quimismo da rocha hospedeira.

Os valores inferiores de perda ao fogo para os basaltos analisados de Minas Gerais poderiam expressar uma menor percolação de fluidos e consequentemente menor alteração hidrotermal destas rochas em relação às do sul do país, no entanto deve-se ressaltar que o enriquecimento em voláteis pode também ter ocorrido posteriormente aos eventos mineralizantes. Outra constatação de relevância geológica para o conhecimento local da Formação Serra Geral e que envolve as três localidades estudadas diz respeito às suas altitudes. Sumarizando-se os dados sobre as cotas das ocorrências em basaltos (ou seus regolitos), tem-se que, na Fazenda Barreiro, o basalto aflora entre 650 m

e 700-710 m; na Pedreira Incopol entre 525 m e 550 m; e a ocorrência de Tembezinho situa-se entre 880-890 m.

Tais dados indicam que existe uma diferença de mais que 350 m entre o ponto mais baixo (525 m) e o ponto mais alto (890 m) de ocorrências. Ressalta-se que não foram individualizados derrames distintos em campo por não terem sido observadas exposições espessas e contínuas da Formação Serra Geral. Entretanto, considerando que as mineralizações são típicas do nível central de derrames basálticos e que o comportamento destes é horizontal ou subhorizontal, provavelmente exista pelo menos três derrames distintos, que poderão ser individualizados em trabalhos regionais futuros de maior detalhe.

Ainda neste sentido, no âmbito do Projeto Triângulo Mineiro, executado pela CODEMIG em parceria com a UFMG, não são reportados falhamentos regionais envolvendo a Formação Serra Geral que pudessem deslocar verticalmente

partes dos derrames nas folhas que abrangem as áreas estudadas e seus entornos (Quintão *et al.*, 2017; Felmer *et al.*, 2017; Chaves & Dias, 2017a, 2017b; Chaves *et al.*, 2017; Pacheco *et al.*, 2017; Seer & Moraes, 2017).

No distrito mineiro de Ametista do Sul (RS), Gomes (1996) individualizou 12 derrames distintos. Os geodos ocorrem em quatro horizontes mineralizados distintos, com altitudes entre 240 e 440 m segundo Amorim (2007) e entre 310 e 480 m segundo Rosenstengel (2011). Já na região de Artigas, no Uruguai, Duarte (2008) reporta dois níveis mineralizados entre as cotas de 185 e 250 m, aproximadamente, portanto ainda inferiores aos do RS.

Segundo Hartmann (2014), as aberturas geradas em função do fraturamento das rochas vulcânicas durante seu resfriamento seriam os canais alimentadores para o preenchimento das cavidades em derrames espessos. Assim, esperam-se ocorrências de ametista logo acima de níveis de basalto apresentando fraturas. De fato, basaltos fraturados ocorrem nos dois locais onde foi possível se observar o pacote inferior, ou seja, na Fazenda Barreiro e na Pedreira Incopol. No caso específico da Pedreira Incopol, como o topo do derrame ainda pouco alterado é aflorante, possivelmente a zona mineralizada mais rica já tenha sido erodida.

## 6 Conclusões

O estudo realizado permitiu caracterizar mineralógica e quimicamente os basaltos hospedeiros das ocorrências de ametistas no Triângulo Mineiro, além de compará-los aos depósitos semelhantes e mundialmente famosos do sul brasileiro e do Uruguai. Em termos de composição química, conforme evidenciado pelo diagrama TAS, os basaltos estudados se assemelham àqueles hospedeiros das mineralizações de Ametista do Sul (RS), sendo também de alto Ti conforme as análises químicas realizadas. No entanto, estes últimos são relacionados aos tipos geoquímicos Pitanga e Paranapanema, enquanto os do Triângulo Mineiro se aproximam mais do tipo Urubici, evidenciando que provavelmente ocorrem variações químicas regionais importantes.

Sugere-se que a menor expressão de tais depósitos em Minas Gerais possa estar relacionada aos conteúdos mais baixos de elementos voláteis, indicando uma extensão limitada da percolação de fluidos e alterações nos basaltos por estes, ao menos nos níveis expostos da região estudada. Por fim, avaliando as espessuras e altitudes observadas nos basaltos, sugere-se que existam pelo menos três derrames distintos presentes nos vulcanitos Serra Geral na região do Triângulo Mineiro.

Destaca-se ainda a pouca expressividade de tais ocorrências em comparação aos depósitos do sul do país e do Uruguai. Entretanto, de início há que ressaltar que não existia qualquer estudo sobre a prospectividade ou potencialidade dos mesmos; além disso, conforme informações locais obtidas durante a execução do Projeto Triângulo Mineiro (CODEMIG/IGC-CPMTC), a existência pontual de mineralizações de ametista e/ou ágata associadas aos basaltos parece ser muito mais corriqueira do que antes se supunha.

**Agradecimentos.** Este trabalho integra parte da Tese de Doutorado do primeiro autor (C.H.D.), que agradece ao Programa de Pós-Graduação em Geologia pela Bolsa de Pesquisa CAPES concedida. O segundo autor (M.L.S.C.C.) agradece ao CNPq pela concessão de Bolsa de Produtividade em Pesquisa. Os trabalhos de campo foram parcialmente financiados pelo Projeto Triângulo Mineiro (CODEMIG/UFMG-IGC-CPMTC), a quem os autores também agradecem. Ao Prof. Paulo Brandão (DEMIN-EE/UFMG) pela realização das análises de difração de raios X.

## Referências

- Amorim, V.A. 2007. *Modelagem geológica e controle dos depósitos em geodos no distrito mineiro de Ametista do Sul (RS, Brasil)*. Porto Alegre, 161p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Barbosa, O., Braun, O.P.G., Dyer, R.C. & Cunha, C.A.B.R. 1970. Geologia da região do Triângulo Mineiro. *Boletim DNPM/SFPM*, 136:1-140.

- Batezelli, A., Saad, A.R., Perinotto, J.A.J. & Fúlfaro, V.J. 2006. Análise estratigráfica aplicada a porção Norte e Nordeste da Bacia Bauru (Cretáceo Superior). *Revista Brasileira de Geociências*, 36(2):253-268.
- Chaves, M.L.S.C. & Dias, C.H. 2017a. *Geologia da Folha Nova Ponte*. Belo Horizonte: Convênio CODEMIG/CPMTC-IGC-UFMG, escala 1:100.000. Disponível em: <<http://www.portalgeologia.com.br/>>. Acesso em: 17 jan. 2018.
- Chaves, M.L.S.C. & Dias, C.H. 2017b. *Geologia da Folha Estrela do Sul*. Belo Horizonte: Convênio CODEMIG/CPMTC-IGC-UFMG, escala 1:100.000.
- Chaves, M.L.S.C., Dias, C.H. & Andrade, K.W. 2017. *Geologia da Folha Miraporanga*. Belo Horizonte: Convênio CODEMIG/CPMTC-IGC-UFMG, escala 1:100.000. Disponível em: <<http://www.portalgeologia.com.br/>>. Acesso em: 18 jun. 2019.
- Commin-Fischer, A., Berger, G., Polvé, M., Dubois, M., Sardini, P., Beaufort, D. & Formoso, M. 2010. Petrography and chemistry of SiO<sub>2</sub> filling phases in the amethyst geodes from the Serra Geral Formation deposit, Rio Grande do Sul, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 29(3):751-760.
- Dodd, S.C., MacNiocail, C. & Muxworthy, A.R. 2015. Long duration (>4Ma) and steady-state volcanic activity in the early Cretaceous Paraná-Etendeka Large Igneous Province: New paleomagnetic data from Namibia. *Earth and Planetary Science Letters*, 414(15):16-29.
- Duarte, L.C. 2008. *Evolução geológica, geoquímica e isotópica das mineralizações de geodos com ametista, Artigas, República Oriental do Uruguai*. Porto Alegre, 167p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- 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.
- Erlank, A.J., Marsh, J.S., Duncan, A.R., Miller, R.M., Hawkesworth, C.J., Betton, P.J. & Rex, D.C. 1984. Geochemistry and petrogenesis of the Etendeka volcanic rocks from South West Africa/Namibia. *Geological Society of South Africa, Special Publication*, 13:195-246.
- Favacho-Silva, M.D. 2000. *Variedades gemológicas de quartzo em Minas Gerais: geologia, gemologia, mineralogia, causas de cor, técnicas de tratamento e aspectos mercadológicos*. Belo Horizonte, 132f. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Felmer, M., Ferreira, V.G. & Quintão, D.A. 2017. *Geologia das Folhas Ituiutaba e Itumbiara*. Belo Horizonte: Convênio CODEMIG/CPMTC-IGC-UFMG, escala 1:100.000. Disponível em: <<http://www.portalgeologia.com.br/>>. Acesso em: 18 jun. 2019.
- Fernandes, A.J., Maldaner, C.H., Sobrinho, J.M.A., Pressinotti, M.M.N. & Wahnfried, I. 2010. Estratigrafia dos derrames de basaltos da Formação Serra Geral (Ribeirão Preto – SP) baseada na geologia física, petrografia e geoquímica. *Geologia USP, Série Científica*, 10(2):73-99.
- Frank, H.T., Gomes, M.E.B. & Formoso, M.L.L. 2009. Review of the areal extent and the volume of the Serra Geral Formation, Paraná Basin, South America. *Pesquisas em Geociências*, 36(1):49-57.
- 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 of basalt, quartz and calcite. *Mineralium Deposita*, 38(8):1009-1025.
- Gomes, M.E.B. 1996. *Mecanismos de resfriamento, estruturação e processos pós-magmáticos em basaltos da Bacia do Paraná – região de Frederico Westphalen (RS) – Brasil*. Porto Alegre, 271p. Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Gordon Jr., M. 1947. Classificação das formações gondwânicas do Paraná, Santa Catarina e Rio

- Grande do Sul. *Notas Preliminares e Estudos, DNPM/DGM*, 38:1-20.
- Hartmann, L.A. 2014. A história natural do Grupo Serra Geral desde o Cretáceo até o Recente. *Ciência e Natura*, 36(ed. especial):173-182.
- Heineck, C.A., Leite, C.A.S., Silva, M.A. & Vieira, V.S. 2003. *Mapa Geológico de Minas Gerais*. Belo Horizonte, Convênio CPRM/COMIG, escala 1:1.000.000.
- Juchem, P.L. 1999. Mineralogia, geologia e gênese dos depósitos de ametista da região do Alto Uruguai, Rio Grande do Sul. São Paulo, 239p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Mineralogia e Petrologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Juchem, P.L. 2013. O Distrito Mineiro de Ametista do Sul – roteiro de excursão. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DE GEMOLOGIA E DESIGN DE JOIAS, 3., 2013, Santa Maria. Anais... Santa Maria, UFSM, p. 7-15.
- Juchem, P.L. 2014. Mineralizações de ametista em riódacitos do Grupo Serra Geral, Província Vulcânica Paraná. In: Hartmann, L. & Baggio, S.B. (Eds.). *Metagenia e exploração mineral no Grupo Serra Geral*. Porto Alegre, Editora da UFRGS, p. 41-54.
- Juchem, P.L., Hofmeister, T. & Brum, T.M.M. 1990. Substâncias gemológicas no Rio Grande do Sul – modos de ocorrência e caracterização gemológica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36., 1990, Natal. Anais... Natal, SBG, v. 3, p. 1436-1449.
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A. & Zanettin, B. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 27(3):745-750.
- Leonardos, O.H. 1956. Recursos minerais do Triângulo Mineiro. *Engenharia, Mineração e Metalurgia*, 24:133-142.
- Mattos, L.E. 1974. *Ágata no Brasil*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., 1974, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre, SBG, v. 7, p. 249-259.
- 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(4):927-947.
- Pacheco, F.E.R.C., Serrano, P.M., Caxito, F.A., Moura, C.D. & Quintão, D.A. 2017. *Geologia da Folha Uberlândia*. Belo Horizonte: Convênio CODEMIG/CPMTC-IGC-UFMG, escala 1:100.000.
- Peate, D.W. 1997. The Paraná-Etendeka Province. In: Mahoney, J.J. & Coffin, M.F. (Eds.). *Large igneous provinces: Continental, oceanic, and planetary flood volcanism*. American Geophysical Union, Geophysical Monograph 100, p. 217-245.
- Peate, D.W., Hawkesworth, C.J. & Mantovani, S.M. 1992. Chemical stratigraphy of the Parana lavas (South America): classification of magma types and their spatial distribution. *Bulletin of Volcanology*, 55(1-2):119-139.
- Piccirillo, E.M. & Melfi, A.J. 1988. *The Mesozoic Flood Volcanism of the Paraná Basin: Petrogenetic and Geophysical Aspects*. São Paulo, IAG-USP, 600p.
- Pinto, C.P. & Silva, M.A. 2014. *Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais*. Belo Horizonte, Convênio CODEMIG/CPRM-SGB, escala 1:1.000.000.
- Proust, D. & Fontaine, C. 2007. Amethyst-bearing lava flows in the Paraná Basin (Rio Grande do Sul): cooling, vesiculation and formation of the geodic cavities. *Geological Magazine*, 144(1):53-65.
- Quintão, D.A., Ferreira, V.G. & Caxito, F.A. 2017. *Geologia da Folha Tupaciguara*. Belo Horizonte: Convênio CODEMIG/CPMTC-IGC-UFMG, escala 1:100.000.
- Rosenstengel, L.M. 2011. *Estratigrafia dos basaltos do distrito mineiro de Ametista do Sul, Brasil*. Porto Alegre, 102p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Scholz, R., Chaves, M.L.S.C., Krambrock, K., Pinheiro, M.V.B., Barreto, S.B. & Menezes, M.G. 2012. Brazilian Quartz Deposits with Special Emphasis on Gemstone Quartz and its Color Treatment. In: Götze, J. & Möckel, R. (Orgs.). *Quartz: Deposits, Mineralogy and Analytics*. New York, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, v. 1, p. 139-159.

- Seer, H.J. & Moraes, L.C. 2017. *Geologia da Folha Uberaba*. Belo Horizonte: Convênio CODEMIG/CPMTC-IGC-UFMG, escala 1:100.000.
- Sgarbi, G.N.C. 1997. *Aspectos paleogeográficos e sedimentológicos do Mesozóico no Oeste do estado de Minas Gerais*. Brasília, 223p. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília.
- Thiede, D.S. & Vasconcelos, P.M. 2010. Paraná flood basalts: Rapid extrusion hypothesis confirmed by new  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  results. *Geology*, 38(8):747-750.
- Wildner, W., Hartmann, L.A. & Lopes, R.C. 2007. Serra Geral magmatism in the Paraná Basin – a new stratigraphic proposal, chemical stratigraphy and geological structures. WORKSHOP PROBLEMS IN WESTERN GONDWANA GEOLOGY, 1., 2007, Gramado. *Extended Abstracts...* Gramado, CIGO-UFRGS/RGEOTEC, p. 189-197.