

Artigo de Pesquisa

Gênese e qualidade gemológica da ametista de diferentes depósitos brasileiros

Genesis and gemological quality of amethyst from different brazilian deposits

Marcus Vinicius Dutra de MAGALHÃES¹ , Rodson de Abreu MARQUES² , Janaina Bastos DEPIANTI³ , Paulo Dias FERREIRA⁴  & Flávia Compassi da COSTA⁵ 

¹Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Geologia, Alegre, Brasil. marcusdutra123@gmail.com

²Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Geologia, Ouro Preto, Brasil. rodsonabreu@gmail.com

³Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Gemologia, Vitória, Brasil. janaina.depianti@ufes.br

⁴Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Gemologia, Vitória, Brasil. pdfj@hotmail.com

⁵Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Geologia, Ouro Preto, Brasil. flavia.compassi@gmail.com

Resumo: Estudar as características da ametista é importante para investigar possíveis correlações do ambiente de formação com a cor, uma vez que a cor é responsável por cerca de 50 a 60% da avaliação gemológica. Este estudo teve como objetivos a caracterização gemológica de amostras de diferentes depósitos de ametista do Brasil e a descrição geológica dos seus depósitos. As amostras foram coletadas de cinco localidades nos estados do Espírito Santo (ES), Minas Gerais (MG) e Rio Grande do Sul (RS) onde realizou-se análises de campo e da sua paragenese mineral. Após a análise morfológica, a realização da marcha analítica e o estudo das inclusões, verificou-se que as amostras oriundas de pegmatitos (Lavras Baixinho Demuner e Mattedi I em Santa Teresa - ES) possuem as melhores qualidades para uso como gema, com destaque para a amostra conhecida comercialmente como *super seven*. As amostras oriundas de depósito hidrotermal (Lavra Aspreno Novelli em Santa Teresa - ES) têm aplicação mais usual na indústria metalúrgica. As amostras provenientes de geodos em basaltos podem ser destinadas à coleção (Ametista do Sul – RS). Já as amostras de depósito secundário (Guaraciaba – MG) podem ser empregadas na indústria de refratários. As amostras das cinco localidades apresentam diferenças entre a forma dos cristais, o acervo de inclusões e qualidades gemológicas. Essas diferenças são suficientes para individualizar as ocorrências entre si, mas não para atribuir uma origem geográfica, pois as inclusões observadas são comuns e frequentes em depósitos de mesma origem geológica situados em localidades diversas. A qualidade gemológica e sua aplicabilidade está diretamente relacionada a sua origem geológica.

Palavras-chave: ametista; inclusão; qualidade gemológica; tipos genéticos.

Abstract: Studying the characteristics of amethyst is important to investigate possible correlations between the formation environment and color, as color accounts for about 50 to 60% of the gemological evaluation. The objectives of this study were the gemological characterization of different amethyst deposits in Brazil and the geological description of their deposits. The samples were collected in five localities located in the states of Espírito Santo (ES), Minas Gerais (MG) and Rio Grande do Sul (RS) where were carried out field analyses and mineral paragenesis. After the morphological analysis, the carrying out the analytical march, and the study of the inclusions, it was established that the samples originating from pegmatites (Baixinho Demuner and Mattedi I quarries in Santa Teresa - ES) have the best qualities for use as a gem, with emphasis on the sample known commercially as super seven. Samples from hydrothermal deposits (Aspreno Novelli quarry in Santa Teresa - ES) are more commonly used in the metallurgical industry. Samples from geodes in basalts can be destined for collection (Ametista do Sul – RS). The samples of secondary deposit (Guaraciaba – MG) can be used in the refractory industry. The samples from the five locations showed differences between the shape of the crystals, the type of inclusions, and gemological qualities. These differences are enough to individualize the occurrences among themselves, but not to attribute a geographic origin, since the observed inclusions are common and frequent in deposits of the same geological origin located in different locations. The gemological quality and its applicability are directly related to its geological origin.

Keywords: amethyst; inclusion; gemological quality; genetic types

1. Introdução

O quartzo (SiO_2) é um dos compostos mais abundantes da crosta terrestre totalizando 12% dos minerais (Guzzo, 2008). O quartzo tem várias aplicações industriais, dentre elas: a produção de tintas, esmaltes, porcelanas, louças sanitárias, vidros convencionais, sílica vítrea para a produção de prismas, filtros, lentes e fibras ópticas (Guzzo, 2008). Além disso, é utilizado em ferramentas, armas e joias. (Götze, 2012).

O Brasil ocupa papel de destaque na produção de quartzo, suprindo diversos segmentos da indústria mundial. Vale observar que grandes cristais de quartzo ocorrem quase que exclusivamente no Brasil (Guzzo, 2008). As rochas ricas em sílica e portadoras de quartzo são formadas por processos magmáticos primários e secundários, hidrotermais, sedimentares ou durante a diagênese e metamorfismo (Götze, 2012).

Segundo Scholz *et al.* (2012), o Brasil possui um extenso território apresentando uma geologia bem complexa, sendo assim, o quartzo pode se formar em diferentes configurações geológicas: (1) pegmatitos graníticos neoproterozoicos (gemas e quartzo industrial menor), (2) veios hidrotermais neoproterozoicos (quartzo industrial e gemas menores), (3) derrames basálticos mesozoicos (geodos preenchidos por ametista e ágata em condições hidrotermais, geralmente gemas) e (4) depósitos secundários cenozoicos (geralmente areias industriais).

No Brasil, grande parte dos cristais de quartzo originados de veios hidrotermais e depósitos secundários são destinados à aplicação industrial, enquanto os de origem pegmatítica, quando transparentes, são mais utilizados para fins gemológicos, principalmente em tratamentos para desenvolvimento da cor (Scholz *et al.*, 2012). Desta forma, as características dos cristais de quartzo e sua qualidade dependem do tipo de depósito e da geologia regional de seu ambiente de formação.

Existem diversas variedades de minerais que ocorrem em ambientes naturais e que são classificadas com base em suas propriedades físico-químicas, refletindo, entre outros fatores, a cor (Guzzo, 2008). O quartzo macrocristalino apresenta um gama de variedades,

incluindo o cristal de rocha (quartzo incolor ou hialino), ametista (tons de lilás e roxo), quartzo rosa, quartzo esfumado (fumê ou morion), citrino (tons de amarelo), quartzo leitoso (Klein & Dutrow, 2012), prasiolita (verde) (Drummond *et al.*, 2010) e quartzo azul (Pantia *et al.*, 2022), entre outras. Dentre as variedades, a ametista é a mais cobiçada e valorizada (Gemworld International, 2018; Duarte *et al.*, 2021; GIA, 2023).

Alguns cristais podem apresentar inclusões de minerais fibrosos ou primas alongados e aciculares de rutilo, turmalina, hematita (Klein & Dutrow, 2012) e goethita (Juchem, 1999), o que tem a capacidade de alterar a cor do próprio cristal. Variações de cores podem ser desenvolvidas em laboratório através de tratamentos térmico e por irradiação (Nassau, 1980). Utiliza-se radiação gama oriunda de uma fonte de ^{60}Co em doses que podem variar de 65 a 1.000 kGy (Drummond *et al.*, 2010). A temperatura de tratamento depende da cor desejada e não pode ultrapassar 573°C, pois acima desse valor, o quartzo muda de fase, não sendo mais possível restaurar a cor por irradiação (Cheng & Guo, 2020).

Durante o crescimento dos cristais podem ocorrer defeitos que podem mudar propriedades como cor, magnetismo, condutividade, entre outros (Nassau, 1980). Os cristais de quartzo, geralmente, apresentam defeitos pontuais sendo causados pela incorporação de íons em sua estrutura, como impureza substitucional ou intersticial. Um número limitado de íons pode substituir o Si^{+4} na rede cristalina ou ser incorporados nos interstícios, ou seja, entre os sítios cristalográficos. Esses elementos são conhecidos como elementos traço, pois, sua concentração no quartzo é em torno de 1 ppm (Götze, 2012).

No quartzo a cor está associada ao tipo de impureza e defeitos na estrutura. A incorporação desses defeitos na estrutura do quartzo depende do seu ambiente de formação, ou seja, das condições de pressão e temperatura e disponibilidade de íons no meio de crescimento (Dennen & Puckett, 1972; Klein & Dutrow, 2012). Nos cristais de ametista acredita-se que o ferro é responsável pela cor (Holden, 1925; Lehmann & Moore, 1966; Dennen & Puckett, 1972; Cohen & Hassan, 1974; Cox, 1977; Cohen, 1985; Dedushenko *et al.*, 2004; Scholz *et al.*, 2012). Porém, não se sabe ainda o mecanismo causador de cor para esta variedade de quartzo (Czaja *et al.*, 2017). Desse modo, estudar as características da ametista de diferentes depósitos é importante a fim de investigar possíveis correlações do ambiente de formação com a cor e/ou tonalidade, pois a cor em uma gema, incluindo a ametista, desempenha um papel fundamental na avaliação da qualidade gemológica, representando aproximadamente 50 a 60% do critério para determinar o preço de um material (Schumann, 2006; Gilbertson, 2018; Arem, 2020; Oliveira *et al.*, 2021).

Diversos estudos foram realizados no Brasil relacionados com cristais de ametista acerca das diferentes configurações geológicas, aspectos químicos e petrográficos, tais como: Juchem *et al.* (1999, 2001), Gilg *et al.* (2002), Fischer (2004), Proust & Fontaine (2007a, 2007b), Duarte *et al.* (2009, 2011), Fischer *et al.* (2010), Rosenstengel (2011), Hartmann *et al.* (2012a, 2012b), Rosenstengel & Hartmann (2012), Juchem (2014), Baggio *et al.* (2015), Hartmann (2014, 2015), Rossetti *et al.* (2018, 2021). Além disso, outros estudos estão mais relacionados à mineralogia e gemologia da ametista proveniente do Brasil, como: Juchem *et al.* (1994), Juchem (1999), Dotto & Isotani (2006), Guttler & Kohigashi (2006), Correa (2010), Drummond *et al.* (2010), Tononi (2019), Tononi *et al.* (2019, 2020), Oliveira *et al.* (2020, 2021), Dias *et al.* (2019a, 2019b, 2021), Duarte *et al.* (2021), Chaves *et al.* (2023).

Portanto, o objetivo deste trabalho é realizar a caracterização gemológica de amostras de diferentes depósitos de ametista do Brasil, e descrever geologicamente os

depósitos onde foram coletadas. Busca-se correlacionar a qualidade gemológica das amostras com o ambiente de formação dos depósitos de ametista.

2. Materiais e Métodos

A metodologia adotada consistiu em levantamento bibliográfico, e em uma abordagem sistemática de informações pré-existent sobre os diferentes depósitos de ametista. Após a revisão bibliográfica, foram realizadas análises de campo em áreas com ocorrência de ametista para a descrição geológica dos depósitos pegmatíticos, hidrotermais, geodos em basalto e secundários, verificando sua paragênese mineral e realizando a coleta das amostras. Posteriormente, foi realizada a caracterização gemológica dessas amostras.

As amostras examinadas são oriundas de cinco depósitos localizados em três estados: sendo três depósitos no Espírito Santo (ES), um depósito em Minas Gerais (MG) e outro no Rio Grande do Sul (RS) (Tab. 1) (Fig. 1).

Tabela 1. Distribuição das 46 amostras de ametista estudadas, por localidade e lava.

Table 1. Distribution of the 46 amethyst samples studied, by locality and quarry.

Localidade	Nº de amostras	Tipo de lava
Lavra Baixinho Demuner (Santa Teresa – ES)	23	Pegmatito
Lavra Mattedi I (Santa Teresa – ES)	2	Pegmatito alterado
Lavra Aspreno Novelli (Santa Teresa – ES)	9	Hidrotermal (colúvio)
Ametista do Sul – RS	3	Geodos em basalto
Guaraciaba – MG	9	Secundário (alúvio e colúvio)

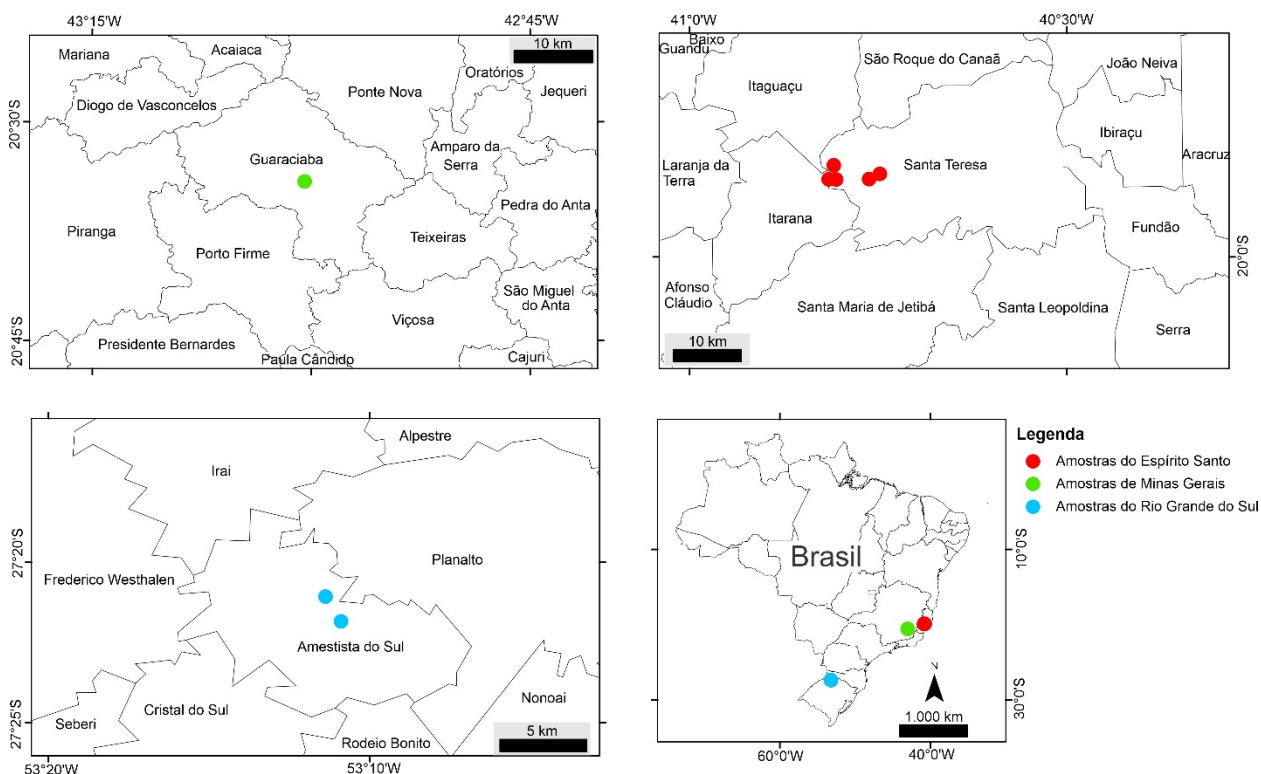


Figura 1: Localização dos pontos de coletas das amostras de ametista.

Figure 1. Location of collection points for amethyst samples.

A caracterização das amostras em seu estado bruto foi realizada no Laboratório de Macroscopia do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Foi utilizada uma lupa aplanática e acromática com ampliação de 10/20x para observação do hábito, tamanho, cor e zonamento de cor.

As amostras foram lapidadas no Laboratório de Lapidação do Departamento de Gemologia da UFES, em cabochão, facetadas ou no formato de placas. A marcha analítica das amostras lapidadas foi realizada no Laboratório de Caracterização e Identificação de Gemas do Departamento de Gemologia da UFES. Foram empregados o refratômetro gemológico (FGR-002, TKS *Instruments*), o dicroscópio de calcita, o polariscópio (FTP-49, *Fable*), a balança hidrostática (M314A – BEL *Engineering*, $\pm 0,001$ g), a câmara fluorescente (Cienlab) e o microscópio gemológico (*Feldman Wild Leitz* com sistema de imersão *Syntest Zeiss* 2000).

3. Área de estudo

3.1 Contexto Geológico

O território brasileiro pode ser dividido inicialmente em dois tipos de terrenos: o substrato continental de idade pré-cambriana, composto pelos escudos cristalinos, e os terrenos que constituem a cobertura formada por rochas fanerozoicas. Os escudos do Brasil englobam dois subtipos de terrenos pré-cambrianos: os crátons e os sistemas orogênicos brasileiros (Alkmim, 2018).

As áreas e as amostras analisadas neste trabalho são de dois contextos geológicos distintos. No estado de Minas Gerais e Espírito Santo, as amostras estão relacionadas aos terrenos antigos associados à Província Mantiqueira, que é um sistema orogênico brasileiro. Já as amostras do Rio Grande do Sul estão relacionadas a terrenos fanerozoicos.

3.1.1 Província Mantiqueira

As amostras de ametista coletadas nos estados do Espírito Santo e de Minas Gerais estão inseridas no contexto geológico da porção setentrional da Província Mantiqueira, no Orógeno Araçuaí. Segundo Heilbron *et al.* (2004), a Província Mantiqueira é uma entidade geotectônica, formada durante a amalgamação do paleocontinente Gondwana Ocidental, entre 640 e 500 Ma, na transição da era neoproterozoica para a era paleozoica. Tem 3.000 km de comprimento e orientação NE-SW, se estendendo do sul da Bahia até o Uruguai. Pode ser subdividida em segmento setentrional que corresponde ao Orógeno Araçuaí; segmento central que engloba o Orógeno Ribeira, a Zona de Interferência entre os orógenos Brasília e Ribeira, e os terrenos Apiaí, São Roque e Embu; e segmento meridional que inclui os orógenos Dom Feliciano e São Gabriel (Heilbron *et al.*, 2004). Sínteses sobre a definição, estratigrafia, magmatismo, tectônica e evolução do Orógeno Araçuaí são encontradas em Pedrosa-Soares & Wiedemann-Leonardos (2000), Pedrosa-Soares *et al.* (2001a, 2001b, 2007, 2008, 2011), De Campos *et al.* (2004, 2016), Heilbron *et al.* (2004), Silva *et al.* (2005) e Alkmim *et al.* (2006).

3.1.1.1 Orógeno Araçuaí

Segundo Pedrosa-Soares *et al.* (2005) o Orógeno Araçuaí se estende da borda oriental do Cráton São Francisco até o Oceano Atlântico, entre os paralelos 15° e 21°S, nessa latitude, a estrutura do orógeno se curva de uma tendência NNE-SSW para NE-SW,

e o cinturão se funde com a cinturão Ribeira, um domínio de deformação que se estende ao sul do paralelo 21°S (Alkmim *et al.*, 2006).

O Orógeno Araçuaí consiste em duas principais feições tectônicas: o cinturão Araçuaí e o núcleo cristalino. Segundo a definição original de Almeida (1977), o cinturão Araçuaí corresponde ao cinturão de dobras desenvolvido ao longo da margem oriental do cráton do São Francisco, no qual as rochas metassedimentares mesoproterozoicas e neoproterozoicas dos supergrupos Espinhaço e São Francisco, respectivamente, estão envolvidas. O núcleo cristalino do Orógeno Araçuaí corresponde à sua porção interna, caracterizado pelo predomínio de rochas metamórficas de alto grau e grande volume de granitos neoproterozoicos (Peres *et al.*, 2004).

Este orógeno é marcado na sua zona central por um intenso magmatismo entre 630 e 480 Ma e foi dividido em cinco supersuítas com base em relações estruturais, geocronológicas e geoquímicas. A supersuíte G1, composta primordialmente por tonalitos a granodioritos representa um arco magmático continental; G2 é constituída de granitos do tipo-S do estágio sincolisional; G3 e G4 estão associadas ao magmatismo dos estágios de transição e pós-colisional respectivamente; G5 foi gerada no estágio pós-colisional, no auge do colapso do Orógeno Araçuaí (Pedrosa-Soares & Wiedemann-Leonardos, 2000).

A característica mais notável deste segmento crustal é a enorme quantidade de diferentes rochas ígneas plutônicas de idades do Neoproterozoico ao Cambro-Ordoviciano, representando uma sucessão de longa duração (c. 630-480 Ma) de eventos de produção de granito resultando na geração de pegmatitos de idades variadas, que abrigam diversas ocorrências gemológicas. Entre estas, destacam-se: topázio, crisoberilo, andaluzita, quartzo (ametista, citrino, fumê, hialino e morion), kunzita, variedades de turmalina elbaíta (todas as cores, exceto a turmalina Paraíba) e berilo (água-marinha, morganita, heliodoro e berilo verde) (Pedrosa-Soares *et al.*, 2011). Rochas graníticas cobrem um terço da região orogênica e deram origem à notável Província Pegmatítica Oriental do Brasil (PPOB), que é a província de rochas ornamentais mais importante do Brasil. As principais ocorrências de minerais gemológicos da PPOB estão associadas às supersuítas G2, G4 e G5 (Pedrosa-Soares & Wiedemann-Leonardos, 2000). Isso se deve à exposição de níveis crustais rasos a profundos, consequentemente, esses granitos registram toda a história evolutiva do Orógeno Araçuaí, desde o estágio pré-colisional controlado por subducção até o colapso gravitacional pós-colisional (Pedrosa-Soares *et al.*, 2011).

3.1.1.1.1 Complexo Intrusivo Várzea Alegre (Cambriano)

Os afloramentos pesquisados no Espírito Santo concentram-se no município de Santa Teresa, na região de Várzea Alegre (Distrito Alto Santa Maria), e compõem parte do Complexo Intrusivo Várzea Alegre (CIVA), vizinha da Pedra da Onça, denominados: Lavras Baixinho Demuner (Brás II) e Mattedi I, ambos de origem pegmatítica; além da Lavra Aspreno Novelli, que ocorre em veios de quartzo hidrotermal. No total, a pesquisa abrange três depósitos nesse estado (Fig. 2).

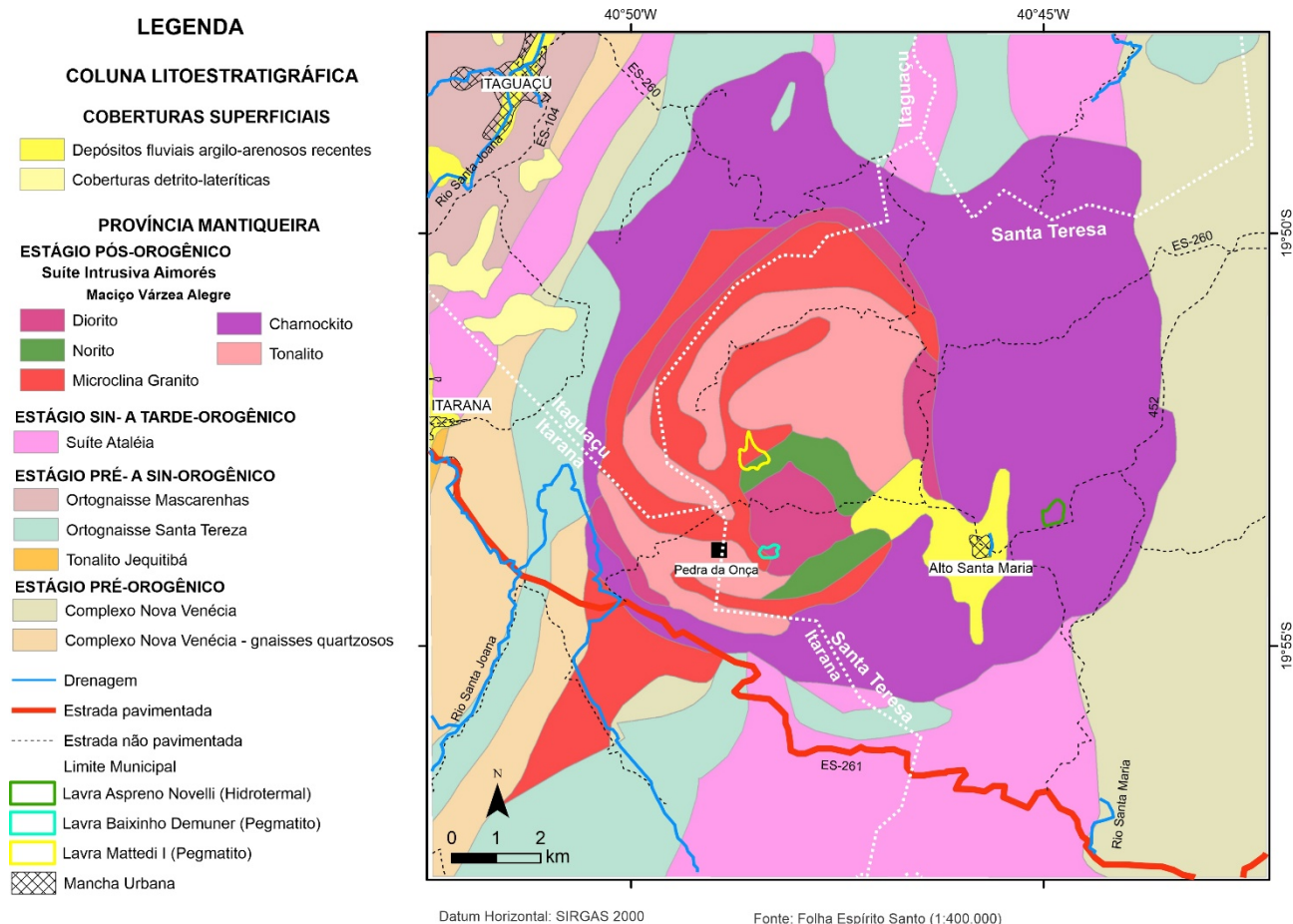


Figura 2. Mapa geológico simplificado da região do Complexo Intrusivo Várzea Alegre (adaptado de Vieira *et al.*, 2018).

*Figure 2. Simplified geological map of the Várzea Alegre Intrusive Complex region (adapted from Vieira *et al.*, 2018).*

O CIVA é parte da supersuíte G5 de Pedrosa-Soares *et al.* (2011), formada durante o colapso gravitacional pós-colisional do Orógeno Araçuaí (Pedrosa-Soares & Wiedemann-Leonardos, 2000). O CIVA se estende por uma área de cerca de 150 km², consistindo em uma estrutura multipulso. Os diferentes litotipos estão dispostos em uma estrutura quase circular com um núcleo básico e uma margem mais ácida a intermediária. Vários anéis descontínuos de composição predominantemente granítica se intercalam com porções dioríticas, onde o primeiro plúton que é charnoenderbítico (exterior) invadiu discordantemente os gnaisses e granulitos. O segundo plúton que é mais jovem, é formado por hiperstênio-gabro, quartzo-diorito, quartzo-monzodiorito, granito porfirítico e eseno-quartzo-sienito que intrude a primeira borda externa de charnoenderbito. Vários corpos pegmatíticos também cortam esses litotipos, os quais consistem em monzogabro-norito a diorito, associados a granito e quartzo-sienito (De Campos *et al.*, 2016). Esses pegmatitos são pouco diferenciados, porém mineralizados em água-marinha, turmalina e ametista (Medeiros *et al.*, 2001).

Cassedane (1991) *in* Juchem (1999) também cita as ocorrências de ametista em granitos no Espírito Santo, sendo lavrados em aluviões derivados dessas rochas em Santa Teresa e Santa Leopoldina. Existe ametista em pegmatitos em outras regiões do estado, porém com pouco interesse econômico, localizados em Mimoso do Sul, Fundão e Itaguacu. A região de Santa Teresa (no limite com Itarana), é bastante conhecida por figurar a Pedra da Onça, adjacente às localidades de Várzea Alegre (Distrito Alto Várzea Alegre, também

conhecido como Distrito Alto Santa Maria), a leste, e Praça Oito, a oeste (Taufner, 2013) e constitui um complexo pegmatítico em exploração ativa de diversos materiais gemológicos, principalmente de água-marinha e ametista (Leite & Ferreira, 2016).

3.1.1.1.2 Grupo Dom Silvério (Neoproterozoico) e Complexo Mantiqueira (Arqueano e Paleoproterozoico)

O afloramento pesquisado em Minas Gerais está situado no município de Guaraciaba e, segundo o Instituto de Geociências Aplicadas (IGA), a geologia da região é composta por rochas metassedimentares (filitos, dolomitos, grauvacas, quartzitos, conglomerados, micaxistos), rochas metavulcânicas e formações ferríferas, pertencentes ao Grupo Rio das Velhas, do Pré-Cambriano Inferior; e rochas do Embasamento Cristalino Granito-Gnáissico Indiviso ou granito-gnaiss. Sobre essas rochas encontram-se uma cobertura terciária pouco espessa e aluviões quaternários (Castro, 2010).

De acordo com mapas geológicos disponíveis (Fonseca *et al.*, 1979), a região de Guaraciaba-MG possui rochas do Grupo Dom Silvério, pertencente à Província Mantiqueira, e do Complexo Mantiqueira, pertencente à Província São Francisco (Fig. 3).

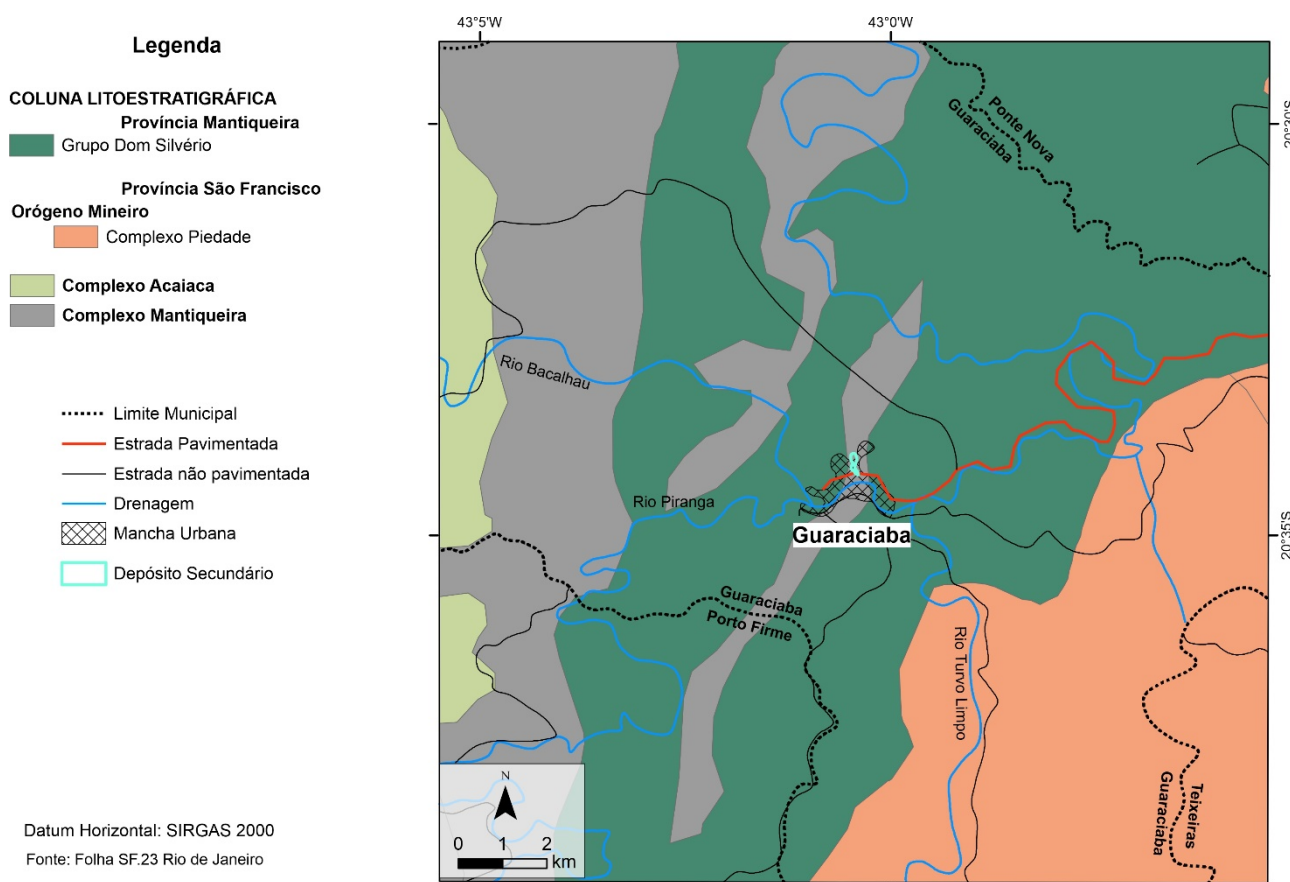


Figura 3. Mapa geológico simplificado da região de Guaraciaba (adaptado de Fonseca *et al.*, 1979).

Figure 3. Simplified geological map of the Guaraciaba region (adapted from Fonseca *et al.*, 1979).

O Grupo Dom Silvério, formado por um pacote de sedimentos marinhos profundos, representa um potencial correlativo das assembleias ofiolíticas caracterizadas nos demais cinturões brasileiros neoproterozoicos ao redor da porção sul do cráton do São Francisco.

Compreende uma assembleia metavulcanossedimentar incluindo xistos pelíticos, anfíbolitos, quartzitos e ocorrências subordinadas de gneissos, mármore, rochas metaultramáficas e formações ferríferas. As rochas mais comuns são os biotita xistos, geralmente contendo granadas (Peres *et al.*, 2004).

O Complexo Mantiqueira corresponde a ortogneisses bandados de composição granítica a tonalítica, apresentando em geral foliação protomilonítica a milonítica. A espessura do bandamento gnáissico apresenta uma variação que vai desde dimensões centimétricas até métricas. É frequente encontrar faixas porfiroclásticas de granulação mais grosseira, juntamente com *boudins* anfíbolíticos foliados, lentes e camadas que se desenvolvem de maneira paralela às próprias faixas gnáissicas. (Peres *et al.*, 2004).

3.1.2 Bacia do Paraná

A ametista analisada do Rio Grande do Sul está inserida em toda a sua extensão no contexto do platô das rochas vulcânicas básicas do Grupo Serra Geral da Bacia do Paraná (Rossetti *et al.*, 2018, 2021). A Bacia do Paraná está localizada na região centro-leste da América do Sul, estendendo-se pelo Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai. No Brasil, cobre parte dos estados do Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Goiás, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. É constituída por seis grandes supersequências, cada uma representando um intervalo temporal de algumas dezenas de milhões de anos e limitadas por discordâncias regionais de origem tectônica (Zalán *et al.*, 1990; Milani, 1997; Milani *et al.*, 1998; Marsh *et al.*, 2001).

O Grupo Serra Geral é constituído por uma espessa sequência vulcanossedimentar relacionada aos processos de separação do supercontinente Gondwana, mais especificamente entre 150-128 Ma (Milani *et al.*, 2007). A porção sedimentar é dada pela Formação Botucatu, que marca a base do grupo e intercala-se com os primeiros derrames de lava basáltica. A Formação Botucatu é constituída, principalmente, por arenitos eólicos e mostra uma relação de contemporaneidade com o início do vulcanismo. A sequência vulcânica é marcada pela acumulação de um imenso volume de rochas magmáticas de caráter bimodal, constituída nas porções basais por depósitos máficos de basalto e basaltos andesíticos, e nas porções superiores por litotipos félsicos como riolito e riodacito (Bergmann *et al.*, 2020; Rossetti *et al.*, 2018, 2021). Por se tratar da unidade litológica onde são encontrados os depósitos de ametista, o Grupo Serra Geral será descrito com mais detalhes.

3.1.2.1 Grupo Serra Geral (Cretáceo)

Com base na integração litofaciológica, relações estratigráficas e estruturais, suportadas por dados geoquímicos e geocronológicos, Rossetti *et al.* (2018, 2021) dividiram a sequência vulcânica do Grupo Serra Geral em quatro unidades. Estas unidades são heterogêneas e marcam as diferenças nos estágios da separação continental. Na base, tem-se a Formação Torres, constituída por basaltos e andesitos basálticos que recobrem e intercalam-se aos arenitos eólicos na Formação Botucatu. A Formação Vale do Sol, que a sobrepõe, composta pelo empilhamento vertical de derrames tabulares espessos tem composição intermediária, dada por andesitos basálticos formados durante o principal período do magmatismo. A Formação Palmas marca o início do vulcanismo ácido e uma mudança significativa nos estilos de erupção, com a geração de dacitos e riolitos. A Formação Esmeralda, que marca o declínio da atividade magmática, é dada por basaltos e andesitos basálticos que frequentemente apresentam derrames do tipo *pahoehoe*, diques e soleiras (Rossetti *et al.*, 2018, 2021) (Fig. 4A).

O município de Ametista do Sul - RS, está inserido nas unidades de alto TiO_2 da Província Magmática Paraná-Etendeka (Fig. 4A), internamente esta região é subdividida com base em características químicas em relação ao magma-tipo. Essa província vulcânica de alto-Ti/Y é formada por uma pequena quantidade de rochas ácidas do tipo Chapecó e por basaltos dos tipos Ribeira, Pitinga e Paranapanema (Rossetti *et al.*, 2018, 2021).

Localmente em Ametista do Sul, foram separados cinco conjuntos de derrames (constituídos por um grupo de derrames, do pr I ao pr V) usando critérios de campo, separados por horizontes-guia (compostos por um par de arenito interderrame e brecha vulcânica), individualizados com base em relações cronológicas, sem qualquer implicação genética (Dias & Parisi, 2007) (Fig. 4B). As análises geoquímicas desses conjuntos de derrames classificam-nos como do tipo químico Pitinga na base e tipo Paranapanema no topo da estratigrafia da área (Peate *et al.*, 1992).

No distrito mineiro de Ametista do Sul-RS, Rosenstengel (2011), Rosenstengel & Hartmann (2012) observaram um controle estrutural por falhas para os depósitos de geodo de ametista. Além disso, foram individualizados nove derrames vulcânicos [Rio da Várzea, Barreiro Grande, A5, Veia Baixa, Veia do Meio, Veia Alta, Cooperativa de Garimpeiros do Médio Alto Uruguai (COOGAMAI), São Valentim e Linha Alta] (Fig. 5). Destes nove derrames identificados, seis pertencem ao tipo Pitanga (Rio da Várzea, Barreiro Grande, A5, Veia Baixa, Veia do Meio e Veia Alta), e ocorrem na base da estratigrafia local, enquanto os outros três derrames pertencem ao tipo Paranapanema (COOGAMAI, São Valentim e Linha Alta) no topo da estratigrafia. Os geodos contendo ametista ocorrem nos três derrames superiores do tipo Pitanga, conhecidos como Veia Alta (principal produtor), Veia do Meio e Veia Baixa (Rosenstengel, 2011; Rosenstengel & Hartmann, 2012).

Dois derrames superiores de Ametista do Sul, do tipo Paranapanema (COOGAMAI e Linha Alta), foram identificados na base da estratigrafia da região de Frederico Westphalen. Além disso, foram individualizados mais quatro derrames na região de Frederico Westphalen, denominados FEWE 3, FWE 4, Frederico e URI, todos pertencentes ao tipo Paranapanema (Rosenstengel, 2011; Rosenstengel & Hartmann, 2012) (Fig. 5).

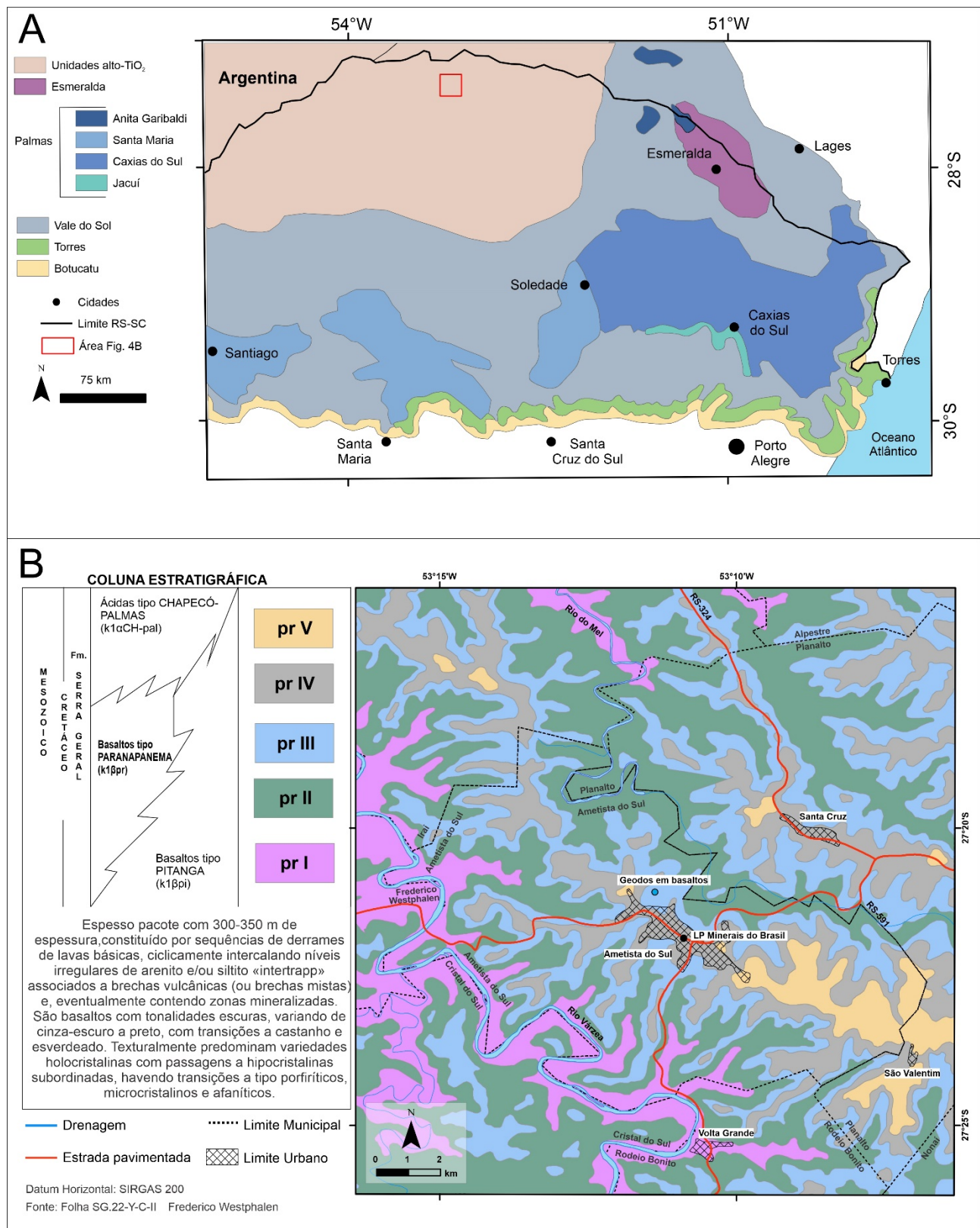


Figura 4. Mapas geológicos do Rio Grande do Sul. A) Mapa geológico do Grupo Serra Geral na região sul do Brasil (modificado de Rossetti *et al.*, 2018. B) Mapa geológico simplificado da região de Ametista do Sul. As siglas pr I a pr V são os cinco conjuntos de derrames basálticos, apenas com relações cronológicas em que os derrames pr I são os mais antigos e os pr V são os mais novos (adaptado de Dias & Parisi, 2007).

Figure 4. Geological maps of Rio Grande do Sul. A) Geological map of the Serra Geral Group in southern Brazil (modified from Rossetti *et al.*, 2018. B) Simplified geological map of the Ametista do Sul region. The acronyms pr I to pr V are the five sets of basaltic flows, only with chronological relationships in which the pr I flows are the oldest and the pr V flows are the youngest (adapted from Dias & Parisi, 2007).

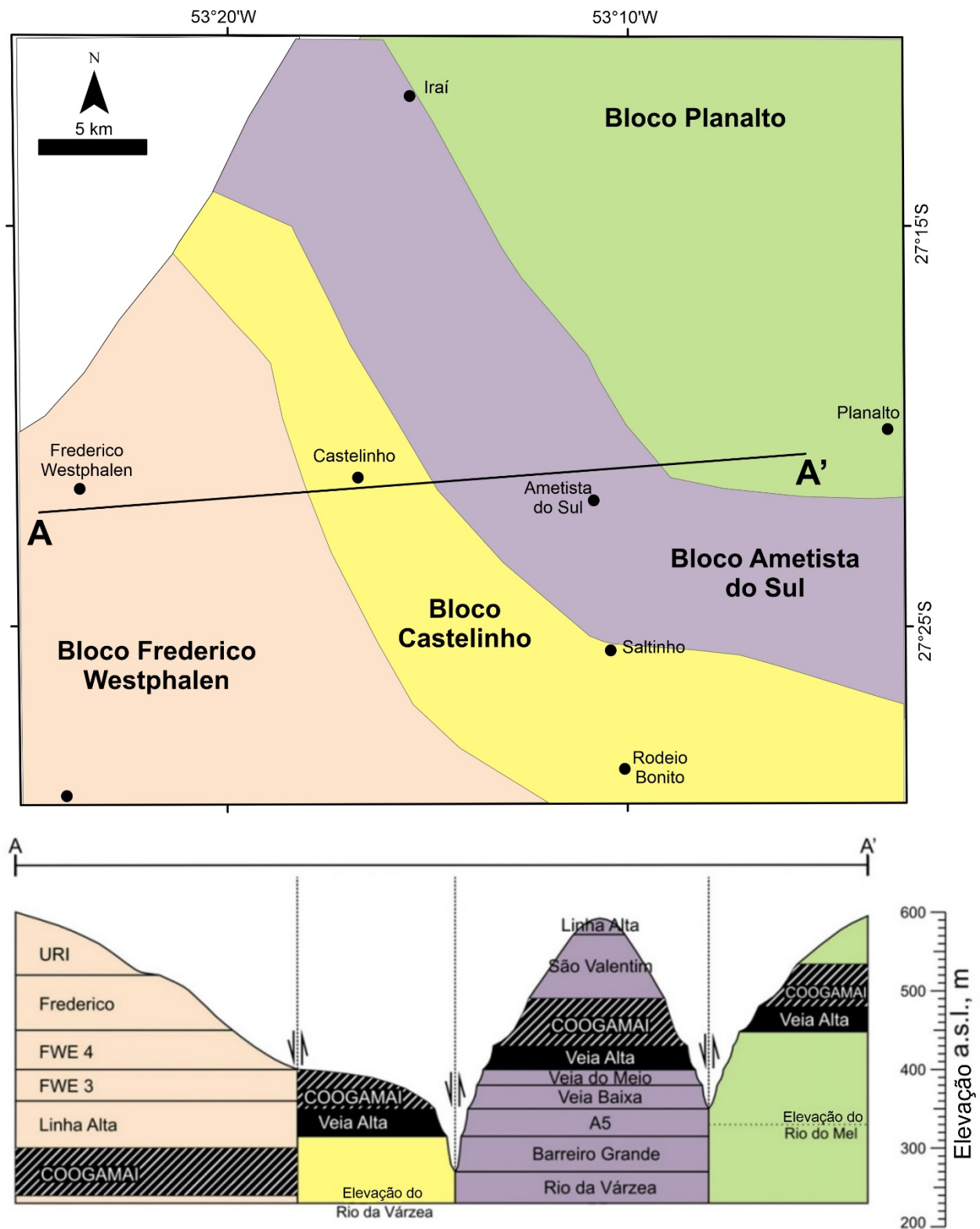


Figura 5. Mapa de base com a separação dos blocos estruturais identificados na região, e a secção geológica A-A' com os derrames individualizados e correlacionados, mostrando os blocos rebaixados na estrutura blocos de falha (modificado de Rosenstengel & Hartmann, 2012).

Figure 5. Base map with the separation of the structural blocks identified in the region, and the geological section A-A' with the individualized and correlated flows, showing the downthrown blocks in the fault-block structure (modified from Rosenstengel & Hartmann, 2012).

Segundo Hartmann (2014), ocorrem geodos de ametista em todos os tipos de lavas, como basalto, andesito basáltico, andesito e riodacito. Há jazidas em vários tipos químicos de basaltos definidos por Peate *et al.* (1992) e em riodacitos. O controle geológico essencial para a mineralização foi a intensa alteração hidrotermal das porções mineralizadas.

A origem dos geodos de ametista ainda é controversa, mas atualmente, a proposta mais aceita é que eles foram formados a partir de uma intensa alteração hidrotermal, com a percolação de fluidos aquecidos ricos em sílica, oriundos dos arenitos da Formação Botucatu, e pela alteração das rochas da sequência vulcânica. Corroboram este mecanismo as baixas temperaturas de formação da ametista ($< 150^{\circ}\text{C}$), a paragênese resultante da alteração hidrotermal dada por zeólitas e argilominerais, especialmente a celadonita. Os basaltos alterados hidrotermalmente geraram uma nova rocha rica em argilominerais, que se deformou plasticamente a partir da ação de fluidos sob alta pressão, criando as cavidades que posteriormente foram preenchidas pela calcedônia, quartzo e, finalmente, ametista (Duarte *et al.*, 2009, 2011; Hartmann *et al.*, 2012a, 2012b).

O basalto é constituído essencialmente de plagioclásio e piroxênio, sem capacidade de deformação dúctil em baixa temperatura; a abertura de cavidades geódicas requer ductibilidade da rocha. Com isso a existência de fraturas é fundamental para criar canais de acesso do fluido aquoso ao basalto para a formação das cavidades geódicas por expansão de vapor. Esse processo hidrotermal gerou intensa alteração tornando a rocha dúctil em baixa temperatura. Assim cavidades foram abertas e preenchidas pelos minerais de sílica (Duarte *et al.*, 2009; Hartmann, 2014).

Duarte *et al.* (2005) sugerem um modelo epigenético, em que a abertura e o preenchimento das cavidades ocorreram após a solidificação da rocha, a partir de um fluido aquoso proveniente dos arenitos da Formação Botucatu. Esse fluido teria penetrado na rocha e provocado sua deformação e alteração para argilas e a consequente abertura das cavidades, sendo também o responsável pela deposição dos minerais no interior dos geodos.

4. Resultados e Discussão

4.1 Lavra Baixinho Demuner

A lavra Baixinho Demuner (Brás II), está localizada na região da Pedra da Onça, no distrito de Alto Santa Maria em Santa Teresa (ES). O depósito é de origem pegmatítica caracterizado por um corpo tabular, de espessura média de três metros, aflorante principalmente em corte de estrada (Fig. 6A). O corpo pegmatítico intrude os charnockitos e monzonitos, com composição heterogênea, indicativa de alto grau de evolução e com potencial gemológico (Fig. 6A). É possível observar cristais de quartzo e microclínio variando de 0,5 a 1 m. (Fig. 6B). No núcleo de quartzo observaram-se cristais grandes com tamanhos entre um a dois metros, hialinos e leitosos, com ocorrência de ametista gemológica em quantidade significativa. Nesta lavra há registros de que nas décadas de 1960 e 1970 foram encontrados grandes volumes de água-marinha de alta qualidade gemológica, além de expressivo volume de apatita. Hoje vem sendo explorado para extração de ametista de boa a alta qualidade gemológica. Foi possível identificar granito gráfico equigranular, caracterizado por quartzo intercrescido em microclínio, variando de 20 a 50 cm (Fig. 6B). É possível observar a presença de agregados de mica muscovita e feldspato microclínio (Fig. 6C) como matriz dos cristais euédricos a subédricos de ametista em hábito prismático bipiramidal. Nos cristais de ametista a coloração varia de incolor a roxo, e sua cor mais intensa se concentra sob as faces romboédricas dos cristais, evidenciando seu zonamento (Fig. 6D).

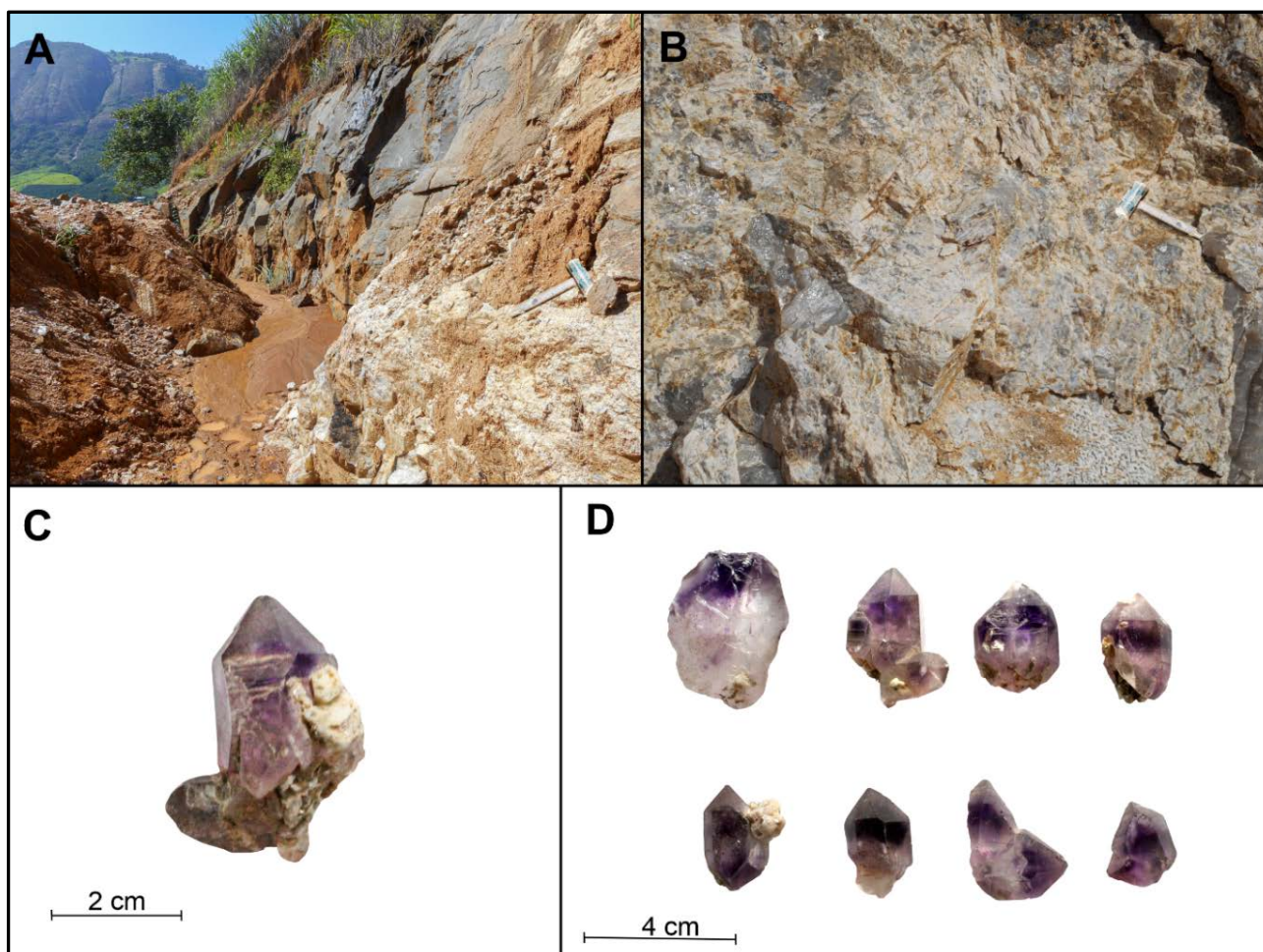


Figura 6. Lavra Baixinho Demuner, no distrito de Alto Santa Maria em Santa Teresa (ES). A) Afloramento de corte de estrada do pegmatito; B) Granito gráfico equigranular caracterizado por quartzo intercrescido em feldspato microclínio; C) e D) Cristais euédricos a subédricos de ametista em hábito piramidal/prismático com mica muscovita e feldspato microclínio que variam de 2 a 4 cm.

Figure 6. Baixinho Demuner quarry, in the Alto Santa Maria district in Santa Teresa (ES). A) Outcrop of road cut of the pegmatite; B) Graphic equigranular granite characterized by quartz intergrown in microcline feldspar; C) and D) Euhedral to subhedral amethyst crystals in pyramidal/prismatic habit with muscovite mica and microcline feldspar ranging from 2 to 4 cm.

Em análise microscópica, as amostras apresentam um grande volume de fraturas transgranulares e intragranulares que podem ser divididas em fraturas primárias e fraturas secundárias (*sensu* de Gubelin *et al.*, 2005). A distinção entre estes dois grupos é fácil de ser realizada sendo que as fraturas primárias são parcialmente cicatrizadas e apresentam, ao longo do seu plano de ruptura, cristais negativos preenchidos predominantemente por uma fase fluida monofásica (L) ou bifásica (L-G). As fraturas secundárias podem estar parcialmente preenchidas por óxidos epigenéticos, o que dá um tom amarelo avermelhado e indesejado às gemas. Estas fraturas secundárias são em grande parte responsáveis pela menor transparência da ametista, pois interferem na transmissão e absorção da luz. Quando presentes em grande quantidade deixam as amostras translúcidas.

Nas amostras de mão e naquelas submetidas à análise em microscópio de imersão é verificado o zonamento e o bandamento de cor (Fig. 7A, B e C) com maior saturação da cor roxa na direção apical dos cristais, o que é característico de um desenvolvimento singenético a partir de variações nas condições de cristalização. O destaque em termos de inclusões na ametista desta localidade fica a cargo de agregados colunares de cristais finos

e alongados de hematita singenética que se desenvolvem perpendicularmente aos planos do romboedro e paralelamente ao eixo c (Fig. 7A, B, C e D). Se muito adensados criam problemas de diafaneidade, mas quando distribuídos pelo cristal podem criar um atrativo para estas gemas. Estruturas de escape de fluidos (*leakage*), feições de estrangulamento (*necking-down*) e crepitação são verificadas nas amostras indicando perturbações tectônicas após a formação da ametista.

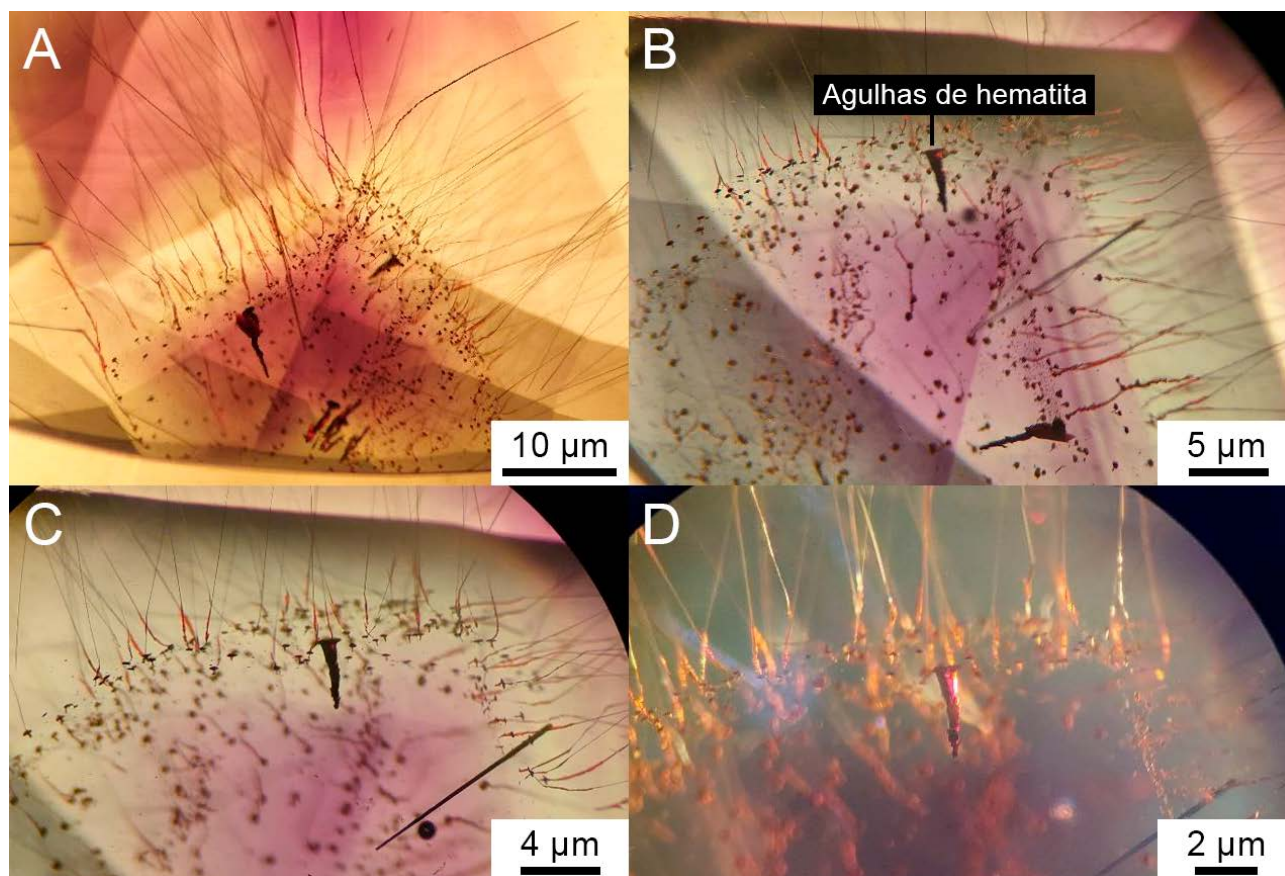


Figura 7. Fotomicrografias da ametista da Lavra do Baixinho Demuner, no distrito de Alto Santa Maria em Santa Teresa (ES). A) Zonamento e bandamento de cor e inclusões sólidas singenéticas de hematita orientadas perpendicularmente às faces do romboedro (luz transmitida); B) As faixas do bandamento de cor podem ser vistas com mais detalhes (luz transmitida); C) Detalhe das imagens A e B mostrando diferentes hábitos da hematita singenética: *nailhead*, colunar e acicular em luz transmitida; D) Diferentes hábitos das inclusões de hematita em luz refletida.

*Figure 7. Photomicrographs of amethyst from the Baixinho Demuner quarry, in the Alto Santa Maria district in Santa Teresa (ES). A) Color zoning and banding and syngenetic solid inclusions of hematite oriented perpendicularly to the rhombohedron faces (transmitted light); B) Color banding bands can be seen in more detail (transmitted light); C) Detail of images A and B showing different habits of syngenetic hematite: *nailhead*, columnar and acicular in transmitted light; D) Different habits of hematite inclusions in reflected light.*

4.2 Lavra Mattedi I

A lavra Mattedi I (Fig. 8A e B), está localizada no distrito de Alto Santa Maria em Santa Teresa (ES). O depósito, apesar de origem pegmatítica, está exposto em um barranco e apresenta elevado grau de alteração do feldspato (albita) para caulinita, o que facilita a extração da ametista. A ametista ocorre em meio a um material alterado de coloração verde-amarelado, muito friável (Fig. 8B e C). A atividade garimpeira neste depósito foi praticada entre os anos de 1970 até 2000, explorando, principalmente, berilo verde e água-marinha (Fig. 8C). A ametista (Fig. 8D) ocorre como material mais raro e não existe um padrão de cor e zonamento, que varia do incolor ao roxo e apresenta-se como cristais subédricos. É possível fazer o aproveitamento parcial das amostras para o uso em gema de baixa a média qualidade, já que possui coloração roxa bem intensa em algumas partes das amostras.

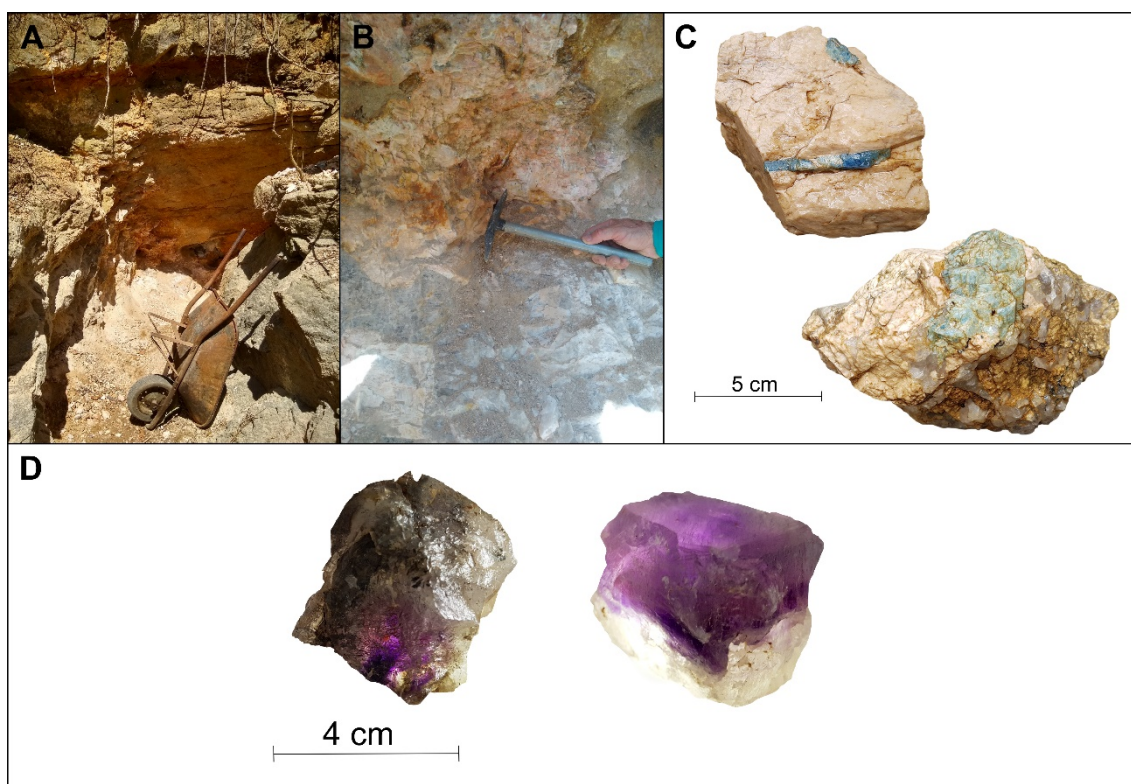


Figura 8. Lavra Mattedi I, no distrito de Alto Santa Maria em Santa Teresa (ES). A) e B) localizada num afloramento pegmatítico com alto grau de alteração, exposto em um barranco; C) Cristais de berilo, variedade água-marinha em matriz de feldspato (8 cm) à esquerda; em matriz de feldspato, quartzo hialino e granito gráfico (13 cm), à direita; D) Cristais subédricos de quartzo variedade ametista. A amostra da esquerda apresenta 3 variedades de cor em uma única amostra de: roxo (ametista), fumê e incolor (hialino) (4 cm), a amostra da direita, clássico exemplar bicolor (incolor/roxo), de aproximadamente 4 cm.

Figure 8. Mattedi I quarry, in the Alto Santa Maria district in Santa Teresa (ES). A) and B) located in a pegmatite outcrop with high degree of alteration, exposed in a ravine; C) Beryl crystals, aquamarine variety in feldspar matrix (8 cm) on the left; in feldspar matrix, hyaline quartz and graphic granite (13 cm), on the right; D) Subformed quartz crystals amethyst variety. The sample on the left shows 3 color varieties in a single specimen of: purple (amethyst), smoky and colorless (hyaline) (4 cm), the sample on the right, classic bicolor specimen (colorless/purple), of approximately 4 cm.

Em análise microscópica, as amostras apresentam fraturas intragranulares e transgranulares primárias e secundárias. Óxidos epigenéticos podem preencher parcialmente as fraturas secundárias comprometendo o aproveitamento gemológico. Zonamento e bandamento de cor (Fig. 9A e B) também comprometem a qualidade das

gemas. As fraturas primárias, parcialmente cicatrizadas exibem cristais negativos com preenchimento bifásico (L-G) ao longo de seus planos (Fig. 9B, C e D). Estes cristais negativos apresentam feições de escape de fluidos e estrangulamento (Fig. 10B). Algumas amostras apresentam um grande desenvolvimento de agregados de cristais finos e alongados de hematita singenética visíveis nas gemas lapidadas. Estes agregados de hematita se desenvolvem perpendicularmente aos planos de crescimento e podem gerar um padrão comercialmente atrativo que leva os garimpeiros a denominar esse material como *super seven* ou *cacoxenita*, termos inapropriados, mas, muito difundido comercialmente (Fig. 10A e C). Individualmente os agregados de hematita iniciam com prismas longos e finos sobrepostos passando ao final para longos cristais aciculares (Fig. 10D).

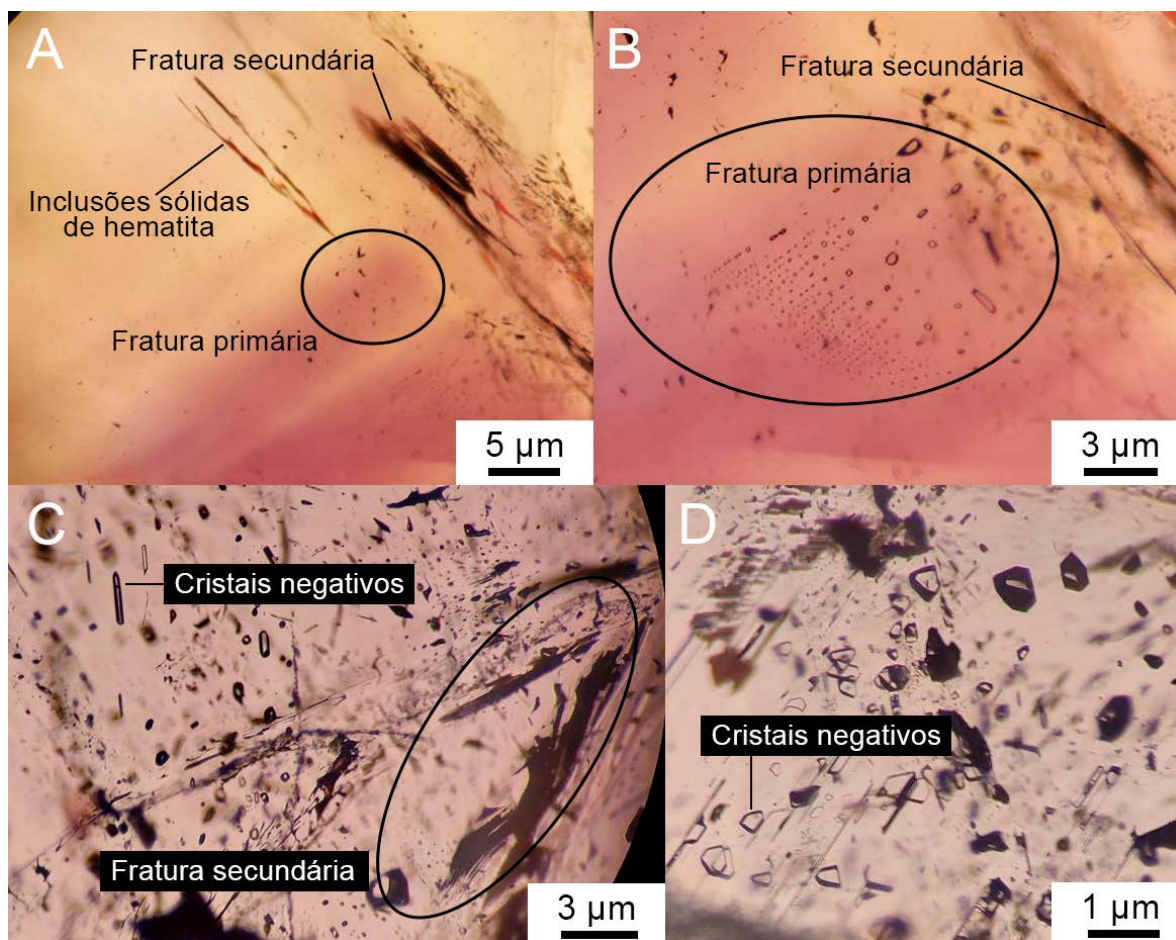


Figura 9. Fotomicrografias da ametista da Lavra Mattedi I, no distrito de Alto Santa Maria em Santa Teresa (ES), em luz transmitida. A) Zonamento e bandamento de cor e inclusões sólidas singenéticas de hematita orientadas perpendicularmente às faces do romboedro, fraturas primárias e fraturas secundárias paralelamente às inclusões sólidas de hematita; B) Detalhe da imagem A mostrando cristais negativos dispostos ao longo de uma fratura primária intragranular preenchidos por uma fase fluida (L); C) Cenário geral das inclusões e diversas gerações de fraturas primárias e fraturas secundárias; D) Detalhe da imagem C mostrando cristais negativos dispostos ao longo de uma fratura primária intragranular preenchidos por uma fase fluida (L) e cristais negativos alongados cristalograficamente orientados.

Figure 9. Photomicrographs of amethyst from the Mattedi I quarry, in the Alto Santa Maria district in Santa Teresa (ES), in transmitted light. A) Color zoning and banding and syngenetic solid inclusions of hematite oriented perpendicularly to the faces of the rhombohedron, primary fractures and secondary fractures parallel to the solid inclusions of hematite; B) Detail of image A showing negative crystals disposed along a primary intragranular fracture filled by a fluid phase (L); C) General scenario of inclusions and several generations of primary fractures and secondary fractures; D) Detail of image C showing negative crystals disposed along an intragranular primary fracture filled by a fluid phase (L) and elongated negative crystals crystallographically oriented.

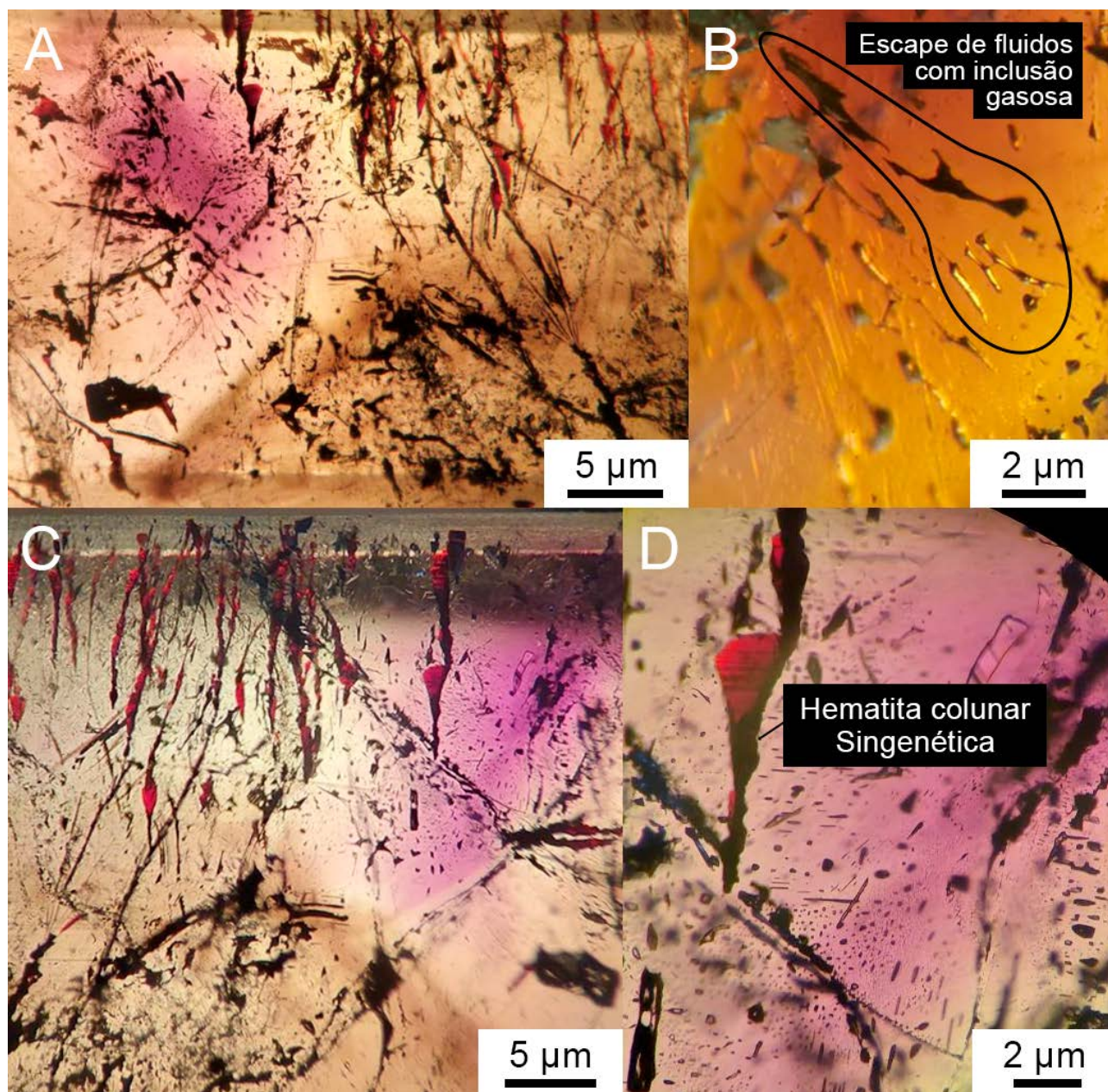


Figura 10. Fotomicrografias da ametista da Lavra Mattedi I, no distrito de Alto Santa Maria em Santa Teresa (ES). A) e B) Rico cenário de inclusões sólidas e fluidas (L), (G) e (L-G). Esta amostra é considerada como um *super seven* no comércio de gemas. Um centro de cor roxa compartilha o cristal com uma porção incolor e outra marrom (morion). As inclusões singenéticas de hematita se apresentam como agregados colunares ou aciculares orientados paralelamente ao eixo c ou perpendicularmente às faces do romboedro. Fraturas primárias e secundárias são abundantes (luz transmitida); C) Detalhe da imagem A mostrando estruturas de escape de fluidos e estrangulamento e diversas gerações de fraturas (luz transmitida); D) Detalhe da imagem C mostrando hematita colunar singenética e diversas gerações de fraturas primárias e secundárias com cristais negativos apresentando diversas morfologias (luz transmitida).

Figure 10. Photomicrographs of amethyst from the Mattedi I quarry, in the Alto Santa Maria district in Santa Teresa (ES). A) and B) Rich scenario of solid and fluid inclusions (L), (G) e (L-G). This sample is considered as a *super seven* in the gem trade. A purple colored center shares the crystal with a colorless and a brown portion (morion). The syngenetic inclusions of hematite appear as columnar or acicular aggregates oriented parallel to the c axis or perpendicular to the faces of the rhombohedron. Primary and secondary fractures are abundant (transmitted light); C) Detail of image A showing fluid leak and necking-down structures and several generations of fractures (transmitted light); D) Detail of image C showing syngenetic columnar hematite and several generations of primary and secondary fractures with negative crystals presenting different morphologies (transmitted light).

4.3 Lavra Aspreno Novelli

A lavra Aspreno Novelli, localizada no distrito de Alto Santa Maria em Santa Teresa (ES), está relacionada aos veios hidrotermais (Fig. 11A). Os cristais de ametista apresentam cor roxa de tonalidade fraca, sendo a maioria anédricos, por vezes subédricos, ou possuem hábito maciço, com dimensões que variam de 4 a 6 cm (Fig. 11B). O uso é comum na indústria quando ocorre a presença de cristais hialinos (14 cm) (Fig. 11B) ou como gemas menores e de baixa qualidade. Nota-se a presença de depósitos constituídos de veios hidrotermais encaixados em rochas granitoides, ocorrendo ametista em agregados irregulares, intenso fraturamento e evidente zonamento de cor (Fig. 11C).

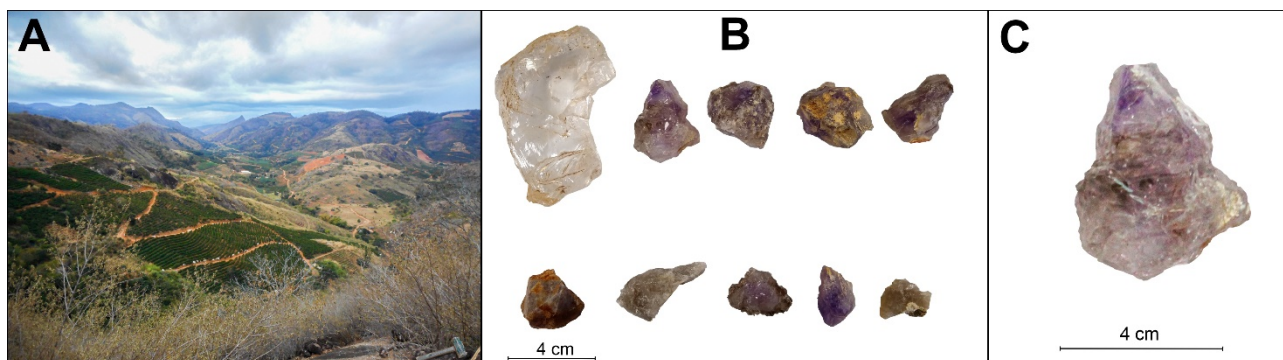


Figura 11. Lavra Aspreno Novelli, no distrito de Alto Santa Maria em Santa Teresa (ES). A) Depósito de quartzo ametista (do tipo colúvio) originado de veios hidrotermais no distrito de Alto Santa Maria/Santa Teresa (ES); B) Cristais anédricos a subédricos de ametista de 4 a 6 cm, e cristal de quartzo hialino de 14 cm; C) Zonamento de cor e intenso fraturamento da amostra de ametista.

Figure 11. Aspreno Novelli quarry, in the Alto Santa Maria district in Santa Teresa (ES). A) Hydrothermal vein amethyst quartz deposit (of the colluvial type) in Alto Santa Maria/Santa Teresa district (ES); B) Anhedral to subhedral amethyst crystals of 4 to 6 cm, and hyaline quartz crystal of 14 cm; C) Color zoning and intense fracturing of the amethyst sample.

O depósito ocorre em veios de quartzo de origem hidrotermal concordantes com a rocha hospedeira, formados possivelmente a baixa pressão e baixas temperaturas (Juchem, 1999). Os depósitos de ametista (do tipo colúvio) estão relacionados com o intemperismo dos veios de quartzo hidrotermal e é pouco frequente encontrar ametista (Scholz *et al.*, 2012). Este depósito hidrotermal, não foi formado *in situ*, ou seja, foi trazido por enxurradas e/ou por deslizamentos de terra associados a blocos de falha com deslocamento significativo misturado com solos e fragmentos de rochas trazidos das zonas mais altas, geralmente mal classificado e mal selecionado. A gravidade, enxurradas e avalanches com deslizamentos de solos e rochas, trazem material que se mistura com o solo local da encosta para formar o colúvio (Winge, 2020a, 2020b).

Assim como na lavra do Baixinho Demuner as amostras oriundas do colúvio Aspreno Novelli, analisadas em microscópio, apresentam um grande volume de fraturas primárias e secundárias. As fraturas secundárias podem apresentar preenchimento de óxidos epigenéticos gerando a coloração amarelo avermelhada indesejada. As fraturas primárias são parcialmente cicatrizadas e mostram cristais negativos com preenchimento monofásico (L) e bifásico (L-G) ao longo do seu plano.

As amostras de menor qualidade podem apresentar um zonamento de diafaneidade por adensamento de fraturas secundárias. Em algumas fraturas primárias, durante a sua cicatrização foram formados finos e alongados cristais negativos. O acervo de fraturas é diversificado sendo possível individualizar diversas gerações que contam com fraturas

intergranulares e transgranulares indicando eventos tectônicos contemporâneos e posteriores à cristalização da ametista. Quando verificadas em detalhes, estas fraturas mostram ao longo dos seus planos estruturas indicativas de escape de fluido, estrangulamento e crepitação reforçando a complexa história de cristalização. Em alguns destes cristais negativos que marcam os planos de fraturas primárias é possível identificar inclusões bifásicas com duas bolhas de uma mesma fase gasosa e uma fase líquida sugestivas de condições de metaestabilidade.

4.4 Ametista do Sul

A mineralização de variedades de quartzo gemológicas pode ocorrer parcial ou totalmente nos geodos em basaltos da Grupo Serra Geral (Tononi *et al.*, 2020). No estado do Rio Grande do Sul, o estudo foi realizado com geodos e drusas em basalto, provenientes da cidade de Ametista do Sul. Nessa região são comuns os geodos cilíndricos com dimensões métricas, que podem por vezes ultrapassar três metros de comprimento.

A maioria dos geodos apresenta a seguinte sequência de minerais: uma primeira camada milimétrica a centimétrica de calcedônia maciça, por vezes ágata, seguida de quartzo mal cristalizado e muito fraturado, incolor a esbranquiçado, em camadas de espessura centimétrica, com uma gradação progressiva do quartzo incolor para ametista, com cristais raramente euédricos a subédricos em hábito prismático, de tonalidades mais intensas de roxo em direção à parte apical dos cristais (Fig. 12A). Ocorrem ainda mineralizações tardias superpostas às fases minerais silicosas, crescidos sobre a ametista, representados parcialmente por cristais milimétricos a centimétricos incolores de calcita equidimensionais em forma romboédrica (Fig. 12B), este dado é corroborado pela literatura e descrito por Juchem (1999). As amostras, com dimensões variando de 5 a 14 cm, foram obtidas por doação feita por um gemólogo. Amostras em geodos e drusas de basalto, são comercializadas como peças ornamentais e amostras de coleção.

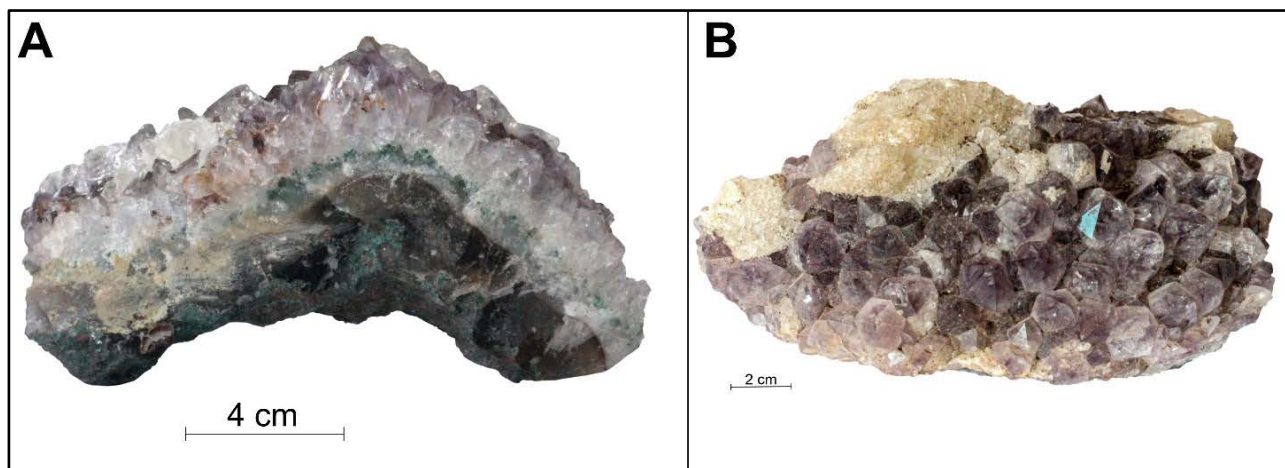


Figura 12. Amostra de coleção. A) Geodo em basalto de Ametista do Sul (RS); B) Presença de calcita.

Figure 12. Collection sample. A) Basalt geode, from Ametista do Sul (RS); B) Presence of calcite.

Os cristais de ametista retirados dos geodos foram analisados em microscópio, e apresentam zonamento de diafaneidade devido ao adensamento de fraturas intragranulares e transgranulares. Fraturas secundárias podem ser preenchidas com óxidos de ferro epigenéticos. Assim como nas outras localidades estudadas o grande volume de fraturas é um dos principais problemas ao aproveitamento gemológico. As fraturas

primárias com frequência apresentam cristais negativos ao longo de seu plano preenchidos por inclusões fluidas monofásicas (L) e bifásicas (L-G). Nas amostras analisadas neste estudo, não foram encontradas inclusões sólidas protogenéticas. Em vez disso, foram observadas inclusões epigenéticas de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, as quais preenchem fraturas secundárias. Embora agregados cristalinos de goethita na ametista em geodos nos basaltos do Grupo Serra Geral sejam frequentemente descritos (Juchem, 1999; Gubelin & Koivula, 2005), não foram identificados nas amostras analisadas.

4.5 Guaraciaba

Além disso, foram caracterizadas amostras de seixos de ametista em depósitos de aluvião e coluvião, no afluente do Rio Piranga, Guaraciaba (MG), caracterizados como depósitos secundários, possivelmente associados a terrenos metamórficos de médio e alto grau com a presença de ortognaisses (Fig. 13A e B). Na parte aluvionar, geralmente encontram-se depósitos clásticos mal classificados e mal selecionados, compostos por cascalho, areias e lamas, podendo ocorrer depósitos de blocos maiores, às vezes bem arredondados nas regiões elevadas das cabeceiras com maior energia fluvial (Winge, 2020c). O depósito (área fonte) deste material, possivelmente ocorre na parte distal do rio. Na parte coluvionar, apresenta solo de vertentes, parcialmente alóctone, de muito pequeno transporte, misturado com solos e fragmentos de rochas provenientes das zonas mais altas, geralmente mal classificado e mal selecionado (Winge, 2020a, 2020b).

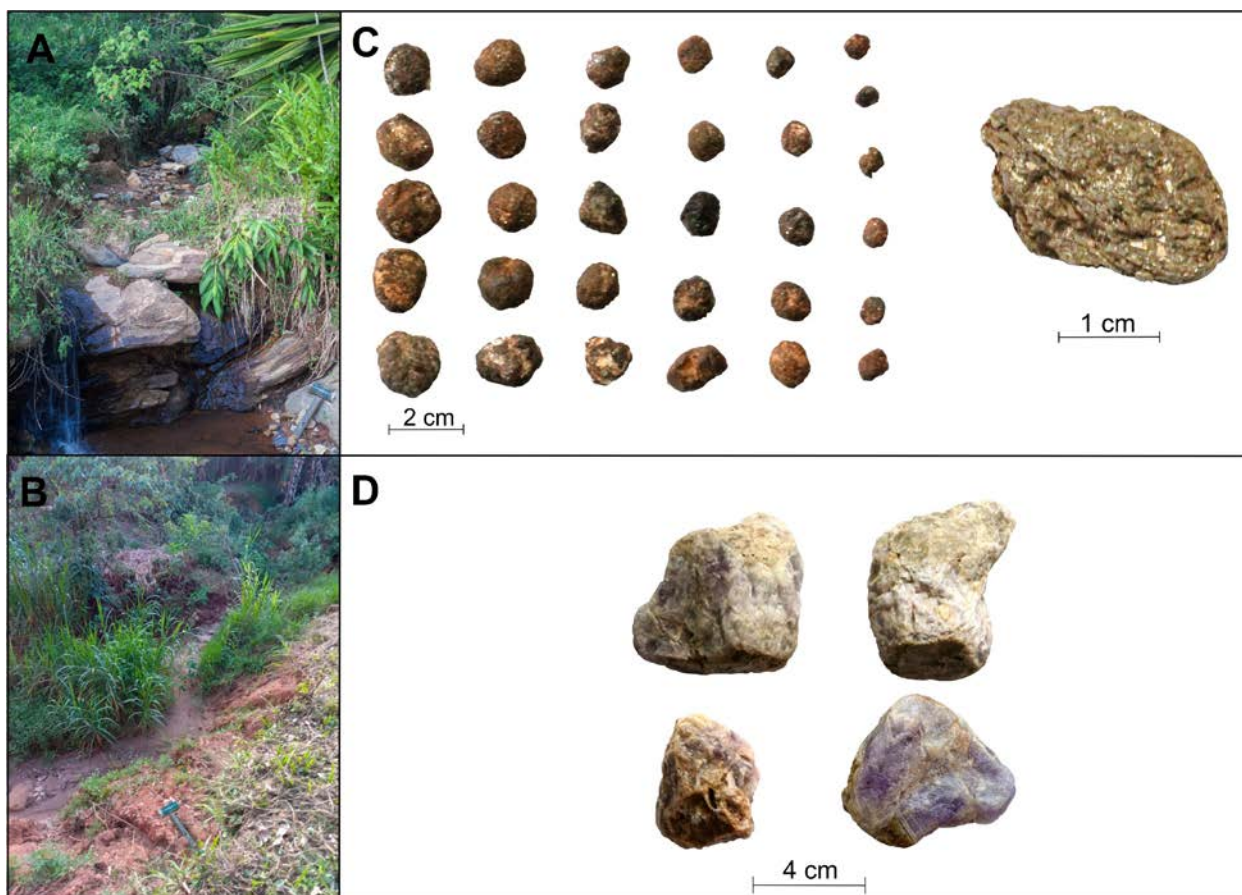


Figura 13. Afluente do Rio Piranga, em Guaraciaba (MG). A) e B) Depósito secundário; C) Ocorrência de granadas (à esquerda), e mica muscovita (à direita); D) Ametista com grãos de granulação muito grossa, que varia em torno de 8 cm.

Figure 13. Rio Piranga tributary, Guaraciaba (MG). A) and B) Secondary deposit; C) Occurrence of garnets (left), and muscovite mica (right); D) Amethyst with very coarse-grained, that vary around 8 cm.

Os minerais associados nos sedimentos foram: granada arredondada (Fig. 13C), exibindo raras faces dodecaédricas variando de 0,5 a 2 cm com alto grau de oxidação superficial; mica branca de granulação fina em fragmentos xistosos de 3 cm (Fig. 13C). A ametista deste depósito caracteriza-se em grãos de granulação muito grossa, com grau de esfericidade moderado, e grãos subangulosos, com formas cristalográficas definidas por seções prismáticas e pirâmides romboédricas assemelhando-se a uma bipirâmide hexagonal biterminada (Fig. 13D). Os cristais têm tamanho médio de 8 cm e alguns apresentam estriamentos ortogonais ao eixo cristalográfico c. Esporadicamente, ocorrem bordas de quartzo leitoso e centro de cor roxa. A concentração da ametista contida nesses depósitos sedimentares, ocorre a partir da desagregação e transporte de material, e seu uso é bem restrito para indústria de refratários.

As amostras de Piranga são de baixa qualidade gemológica o que se atribui ao grande volume de fraturas intragranulares e transgranulares observadas em microscópio, que levam à baixa diafaneidade. O acervo de fraturas mostra a atuação de processos de deformação durante e após a cristalização da ametista. Feições de escape de fluido, crepitação, e de turbilhamento SC registram essas atividades tectonotermiais. Inclusões sólidas de óxidos epigenéticos ao longo de fraturas secundárias diminuem a diafaneidade substancialmente.

4.6 Características gerais das amostras

As principais características dos cristais de ametista estudados encontram-se de forma resumida no Quadro 1.

Quadro 1. Características dos cristais de ametista em estado bruto de acordo com a lavra/tipo de depósito.

Chart 1. Characteristics of amethyst crystals in the raw state according to quarry/deposit type.

Lavra/Tipo de Depósito	Características	Aplicabilidade
Lavra Baixinho Demuner (Santa Teresa, ES)/ Pegmatito	Cristais euédricos a subédricos, com hábito piramidal/prismático, cor roxa predominante na parte apical do mineral	Gema de boa a alta qualidade e/ou como amostra de coleção
Mattedi I (Santa Teresa, ES)/ Pegmatito alterado	Cristais subédricos, cor roxa intensa em algumas partes das amostras, não existe um padrão de cor e zonamento, que varia do branco ao roxo	Gema de baixa a média qualidade
Aspreno Novelli (Santa Teresa, ES)/ Hidrotermal	Cristais anédricos a subédricos, ou com hábito maciço, tonalidade roxa fraca, intenso zonamento de cor e com muitas fraturas	Industrial metalúrgica (quando hialino), gemas menores e de baixa qualidade. Não muito comum a ocorrência
Ametista do Sul, RS/ Geodos em basalto	Cristais raramente euédricos a subédricos, tonalidade roxa gradativa, mais intensa em direção à parte apical dos cristais	Peça ornamental ou amostra de coleção
Guaraciaba, MG/ Secundário (alúvio e colúvio)	Cristais anédricos a subédricos em seixos, sem padrão de cor/tonalidade, que varia do branco ao roxo	Indústria de refratários

Os resultados obtidos da marcha analítica apresentam consistência com os dados disponíveis na literatura (Dedeyne *et al.*, 2021), não sendo registradas particularidades merecedoras de destaque entre as cinco localidades que permitissem individualizar os

espécimes pela sua origem geográfica. As amostras apresentam uma diafaneidade transparente a translúcida, nenhuma apresentou fluorescência e todas mostraram um caráter anisotrópico uniaxial positivo.

A principal diferença entre as amostras das cinco áreas estudadas diz respeito à presença de inclusões sólidas singenéticas de hematita orientadas paralelamente ao eixo c e perpendicularmente às faces dos cristais de ametista das Lavras do Demuner e Mattedi I. Essas inclusões, entretanto, são rotineiramente encontradas em diversas localidades não se constituindo uma particularidade de difícil ocorrência (Gubelin & Koivula, 2005).

As características observadas mostraram que, dentre as amostras estudadas, os cristais de ametista oriundos de depósitos de pegmatito possuem melhor qualidade gemológica, ou seja, podem ser melhor aproveitados pela indústria joalheira. Este dado é corroborado pela literatura e descrito por Scholz *et al.*, (2012). Podemos destacar ainda que as inclusões de agregados de hematita nas amostras da lavra Mattedi I valorizam esse material, conhecido comercialmente como *super seven*.

A Tabela 2 traz de forma resumida o resultado da marcha analítica realizada para cada depósito.

5. Conclusões

A partir do estudo realizado, observou-se que os cristais de ametista da lavra Baixinho Demuner, localizada em Santa Teresa (ES) e provenientes de um depósito pegmatítico, apresentam forma euédrica ou subédrica, com hábito piramidal/prismático e uma cor roxa intensa nas faces romboédricas. Eles são classificados como gemas de boa a alta qualidade, adequadas para uso em joias ou como amostras de coleção.

Por outro lado, as amostras de ametista da lavra Mattedi I, também localizada em Santa Teresa (ES) de um pegmatito alterado, apresentam-se na forma subédrica, com uma cor roxa intensa em algumas partes, mas sem um padrão de cor ou zonamento definido, que varia do branco ao roxo. Embora sejam classificadas como gemas de baixa a média qualidade, a presença de inclusões de agregados de cristais de hematita as torna comercialmente mais atrativas, sendo conhecidas pelo nome *super seven*.

Os cristais de ametista da lavra Aspreno Novelli, localizada em Santa Teresa (ES), que são provenientes de um depósito hidrotermal, não são muito comuns e geralmente apresentam uma forma anédrica ou subédrica, ou com hábito maciço. Eles possuem uma tonalidade roxa fraca e muitas fraturas. Sua aplicação mais comum é na indústria metalúrgica, quando são transparentes (hialinos), ou como gemas menores e de baixa qualidade.

As amostras de cristais de ametista provenientes de geodos em basalto de Ametista do Sul (RS) apresentam uma forma raramente euédrica a subédrica com um hábito piramidal/prismático. Eles têm uma tonalidade gradativa, que vai do incolor ao roxo claro e ao escuro, sendo mais intensa em direção à parte apical dos cristais. Geralmente, são utilizados para peças ornamentais e colecionadores.

As amostras do depósito secundário de Guaraciaba (MG) possuem características aluvionares e coluvionares, sendo mal classificadas e mal selecionadas. Os cristais apresentam-se em hábito maciço em seixos, com esfericidade moderada e subangulosos, com variação de cor do branco ao roxo, porém sem aproveitamento gemológico. Por isso, são destinados à indústria, geralmente na produção de refratários.

Tabela 2 - Características gemológicas das ametista de diferentes depósitos.
 Table 2 - Gemological characteristics of amethyst from different deposits.

Lavra	Tipo de depósito	Densidade relativa	Índice de refração	Birrefringência	Pleocroísmo	Inclusões
Baixinho Demuner (Santa Teresa/ES)	Pegmatito	2,652	1,545 – 1,555	0,010	Fraco	Fraturas primárias com inclusões fluidas (L) e fraturas secundárias com óxidos epigenéticos; zonamento e bandamento de cor; finos agregados de hematita singenética
Mattedi I (Santa Teresa/ES)	Pegmatito alterado	2,654	1,542 – 1,551	0,009	Fraco a médio	Fraturas primárias com inclusões fluidas (L) (L-G) e fraturas secundárias com óxidos epigenéticos; zonamento e bandamento de cor; finos agregados de hematita singenética
Aspreno Novelli (Santa Teresa/ES)	Hidrotermal	2,661	1,541 – 1,549	0,008	Muito fraco	Fraturas primárias com inclusões fluidas (L) (L-G) e fraturas secundárias com óxidos epigenéticos; zonamento e bandamento de cor; estruturas de escape de fluido, estrangulamento e crepitação
Ametista do Sul-RS	Geodos em basalto	2,657	1,540 – 1,552	0,012	Muito fraco	Fraturas primárias com inclusões fluidas (L) (L-G) e fraturas secundárias com óxidos epigenéticos; zonamento e bandamento de cor
Guaraciaba-MG	Secundário (alúvio e colúvio)	2,650	1,547 – 1,553	0,006	Muito fraco	Fraturas primárias com inclusões fluidas (L) e fraturas secundárias com óxidos epigenéticos; bandamento de cor; feições de escape de fluido, crepitação e turbilhamento SC

As amostras das cinco localidades apresentam diferenças entre a forma dos cristais, o acervo de inclusões e qualidades gemológicas. Essas diferenças são suficientes para individualizar as ocorrências entre si, mas não para atribuir uma origem geográfica, pois, as inclusões observadas são comuns e frequentes em depósitos de mesma origem geológica situados em localidades diversas. A qualidade gemológica e sua aplicabilidade está diretamente relacionada a sua origem geológica.

O estudo contribui para a caracterização gemológica em amostras provenientes de depósitos distintos de ametista do Brasil descrevendo os diferentes contextos geológicos que interferem diretamente na característica, qualidade e uso dos cristais de ametista.

Agradecimentos. Os autores agradecem aos garimpeiros Aspreno Novelli, Baixinho Demuner, Brás, Carolino Mattedi e à proprietária Sra. Alice Silva por permitirem o acesso e colaborarem com esta pesquisa, cedendo gentilmente amostras dos depósitos estudados. Aos gemólogos Joana D'arc Galvão Rodrigues, Geraldo Fernandes Pignaton, Miriam Cristina Santana Lopes, Noelia dos Santos Mineli e Fátima Donisete da Silva Alencar, agradecemos pela colaboração no trabalho de campo e coleta das amostras. Agradecemos também a Iulo Pessotti Moro pelos registros fotográficos das amostras brutas e a Lucas Drumond pela edição das imagens. À Prof^a Dra. Daniela Teixeira Carvalho de Newman (Departamento de Gemologia, UFES), à graduanda em Gemologia Daniele Flornier e Silva, agradecemos pelo registro das fotomicrografias, e a Guilherme Carneiro de Assis pela edição das imagens. Os autores agradecem também ao editor chefe, Prof. Dr. Eduardo Guimarães Barboza, ao editor de área, Prof. Dr. Carlos Augusto Sommer, e aos revisores anônimos pelas pertinentes sugestões para melhoria do artigo, bem como a todos os demais membros da equipe técnica responsável pelo periódico Pesquisas em Geociências. Este trabalho está vinculado ao projeto PRPPG-UFES: 9312/2019.

Contribuições dos Autores: Concepção, M.V.D.M., J.B.D. e R.A.M.; metodologia, M.V.D.M., J.B.D. R.A.M. e P.D.F.; software, M.V.D.M. e F.C.C.; validação, M.V.D.M., F.C.C. e P.D.F.; pesquisa, M.V.D.M., F.C.C. e P.D.F.; recursos, M.V.D.M. e J.B.D.; preparação de dados, M.V.D.M., J.B.D., R.A.M., F.C.C. e P.D.F.; escrita do artigo, M.V.D.M., F.C.C. e P.D.F.; revisão, M.V.D.M., P.D.F., F.C.C., R.A.M. e J.B.D.; supervisão, J.B.D., M.V.D.M. e F.C.C.

Conflito de Interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse.

Referências

- Alkmim, F.F. 2018. História geológica de Minas Gerais. In: Pedrosa-Soares, A.C.; Voll, E. & Cunha, E.C. *Recursos minerais de Minas Gerais on-line*. (Org.). Belo Horizonte: Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais (CODEMGE), 1:1-37. Disponível em: <<http://recursomineralmg.codemge.com.br/wp-content/uploads/2018/10/HistoriaGeologicadeMG.pdf>>. Acesso em: 13 jul. 2023.
- Alkmim, F.F., Marshak, S., Pedrosa-Soares, A.C., Peres, G.G., Cruz, S.C. P. & Whittington, A. 2006. Kinematic evolution of the Araçuaí-West Congo orogen in Brazil and Africa: Nutcracker tectonics during the Neoproterozoic assembly of Gondwana. *Precambrian Research*, 149(1-2): 43-64. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2006.06.007>
- Almeida, F.F.M. 1977. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 7(4): 349-364. Disponível em: <<https://papegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/11179>>. Acesso em: 13 jul. 2023.
- Arem, J.E. 2020. Amethyst value, price and jewelry information. *International Gem Society*. Disponível em: <<https://www.gemsociety.org/article/amethyst-jewelry-and-gemstone-information/>>. Acesso em: 10 jan. 2023.
- Baggio, S.B., Hartmann, L.A., Massonne, H.J., Theye, T. & Antunes, L.M. 2015. Silica gossan as a prospective guide for amethyst geode deposits in the Ametista do Sul mining district, Paraná volcanic province, southern Brazil. *Journal of Geochemical Exploration*, 159(1): 213-26. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.09.011>

Bergmann, M., Rocha, P. G., Sander, A. & Parisi, G. N. 2020. Modelo prospectivo para ametista e ágata na fronteira sudoeste do Rio Grande do Sul. *Informe de Recursos Minerais*, Porto Alegre, CPRM, 129 p. Disponível em: <<https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/18795>>. Acesso em 22. ago. 2023.

Castro, J.F.M. 2010. História e geografia do Município de Guaraciaba - MG. In: ENCONTRO DE PESQUISADORES DA HISTÓRIA DA ZONA DA MATA MINEIRA, I, 2010, Rio Pomba. *Anais...* Rio Pomba, IFET, v.1, p. 1-27. Disponível em: <http://www1.pucminas.br/imagdb/mestrado_doutorado/publicacoes/PUA_ARQ_ARQUI20140508115410.pdf>. Acesso em: 13 jul. 2023.

Chaves, M.L. de S.C., Dias, C. H., Benitez, L. & Silva, S.M. da. 2023. Geologia dos depósitos de quartzo ametista de Montezuma e adjacências em Minas Gerais e Bahia. *Geologia USP. Série Científica*, 23(1): 19-27. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v23-191136>

Cheng, R. & Guo, Y. 2020. Study on the effect of heat treatment on amethyst color and the cause of coloration. *Scientific Reports*, 10: 14927. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71786-1>

Cohen, A.J. 1985. Amethyst color in quartz, the result of radiation protection involving iron. *American Mineralogist*, 70: 1180-1185. Disponível em: <<https://pubs.geoscienceworld.org/msa/ammin/article-abstract/70/11-12/1180/41687/Amethyst-color-in-quartz-the-result-of-radiation>>. Acesso em: 13 jul. 2023.

Cohen, A.J. & Hassan, F. 1974. Ferrous and ferric ions in synthetic α -quartz and natural amethyst. *American Mineralogist*, 59(7-8): 719-728. Disponível em: <<https://pubs.geoscienceworld.org/msa/ammin/article-abstract/59/7-8/719/541105/Ferrous-and-ferric-ions-in-synthetic-quartz-and>>. Acesso em 13 jul. 2023.

Correa, M. 2010. *Variedades gemológicas de quartzo na Bahia, geologia, mineralogia, causas de cor, e técnicas de tratamento*. São Paulo, 170p. Dissertação de Mestrado, São Paulo, Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44144/tde-20012011-114502/pt-br.php>. Acesso em: 13 jul. 2023.

Cox, R.T. 1977. Optical absorption of the d^4 ion Fe^{4+} in pleochroic amethyst quartz. *Journal of Physics C: Solid State Physics*, 10(22): 4631. <https://doi.org/10.1088/0022-3719/10/22/032>

Czaja, M., Gawel, M.K., Konefal, A., Sitko, R., Teper, E., Mazurak, Z. & Sachanbinski, M. 2017. The Mössbauer spectra of prasiolite and amethyst crystals from Poland. *Physics and Chemistry of Minerals*, 44(5): 365-375. <https://doi.org/10.1007/s00269-016-0864-z>

Dedeyne, R., Gay, G. & Mainguy, A. 2021. *New tables of gemstone identification*. Bouchemaïne: Editions 4G, 448 p.

Dedushenko S.K., Makhina I.B., Mar'in A.A., Mukhanov V.A. & Perfiliev Y.U.D. 2004. What oxidation state of iron determines the amethyst colour? *Hyperfine Interactions*, 156: 417-422. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2852-6_63

De Campos, C., Medeiros, S.R., Mendes, J.C., Pedrosa-Soares, A.C., Dussin, I., Ludka, I.P. & Dantas, E.L. 2016. Cambro-ordovician magmatism in the Araçuaí belt (SE Brazil): snapshots from a post-collisional event. *Journal of South American Earth Sciences*, 68(1): 248-268. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.11.016>

De Campos, C., Mendes, J., Ludka, I., Medeiros, S., Costa-de-Moura, J. & Wallfuss, C. 2004. Review of the Brasiliano magmatism in Southern Espírito Santo, Brazil, with emphasis on post-collisional magmatism. *Journal of The Virtual Explorer*, 17(1): 1-39. Disponível em: <<https://virtualexplorer.com.au/system/files/papers/00106/assets/brasiliano-magmatism.pdf>>. Acesso em: 13 jul. 2023.

Dennen, W.H. & Puckett, A.M. 1972. On the chemistry and color of amethyst. *The Canadian Mineralogist*, 11(2): 448-456. <https://pubs.geoscienceworld.org/canmin/article-abstract/11/2/448/10835/On-the-chemistry-and-color-of-amethyst>. Acesso em: 13 jul. 2023.

Dias, A.A. & Parisi, G.N. 2007. *Programa Geologia do Brasil, Projeto Geologia para apoio aos Arranjos Produtivos de Gemas do Rio Grande do Sul, RS: Frederico Westphalen, folha SG.22-Y-C-II*. Porto Alegre, CPRM, 73p. Disponível em: <<https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/18130?mode=full>>. Acesso em: 13 jul. 2023.

Dias, C.H., Chaves, M.L.S.C., Juchem, P.L. & Romano, A.W. 2019a. Ocorrências de ametista em basaltos do Triângulo Mineiro (Minas Gerais): descrição e comparações com depósitos similares do

Rio Grande do Sul. *Pesquisas em Geociências*, 46(3): e0822. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.97385>

Dias, C.H., Chaves, M.L.S.C. & Silva, R.C.F. 2019b. Depósitos de quartzo ametista em Minas Gerais. *Geonomos*, 27(1): 22-31. <https://doi.org/10.18285/geonomos.v27i1.21850>

Dias, C.H., Chaves, M.L.S.C., Silva, R.C.F. & Gomes, S.D. 2021. Fluid inclusions in amethyst quartz of different geological environments from Brazil. *Mineralogical Magazine*, 85(3): 332-347. <https://doi.org/10.1180/mgm.2021.38>

Dotto, C.T. & Isotani, S. 2006. Irradiation and heating effects in amethyst crystals from Brazil. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 117(4): 355-61. <https://doi.org/10.1080/10420159108220755>

Drummond, N.F., Mendes, J.C. & Lameiras, F.S. 2010. Quartz characterization to obtain its gemological varieties by means of gamma irradiation and/or heat treatment. *Revista Escola de Minas*, 63(3): 449-456. <https://doi.org/10.1590/S0370-44672010000300005>

Duarte, L.C., Hartmann, L. A., Vasconcelos, 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. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.05.019>

Duarte, L.C., Hartmann, L.A., & Vasconcellos, M.A.Z. 2005. Epigenetic geode formation in the world class amethyst deposit of the Southern Paraná Basaltic Province. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE METALOGENIA, I, 2005, Gramado. *Anais...* Gramado, CD-ROM, 6p.

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(3): 239-255. <https://doi.org/10.1007/s00126-010-0323-6>

Duarte, L.C.; Hartmann, L.A., Juchem, P.L. & Tononi, L.L. 2021. Depósitos de ametista do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. In: Jelinek, A.R. & Sommer, C.A. (Ed). *Contribuições à geologia do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina*. Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Geologia, Compasso Lugar-Cultura, p. 371-388. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/235034>>. Acesso em: 13 jul. 2023.

Fischer, A.C. 2004. *Petrografia e geoquímica das fases silicosas dos geodos mineralizados à ametista (região do Alto Uruguai, RS, Brasil)*. Porto Alegre, 159p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Fischer, A.C., Berger, G., Polvé, M., Dubois, M., Sardini, P., Beaulfort, D. & Formoso, M. 2010. Petrography and chemistry of SiO₂ filling phases in the amethyst geodes from the Serra Geral Formation deposit, Rio Grande do Sul, Brazil. *Journal of South America Earth Sciences*, 29(3): 751-60. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2009.10.002>

Fonseca, M.J.G., Silva, Z.D., Campos, D.D.A., & Tosatto, P. 1979. *Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, Folhas Rio de Janeiro (SF. 23), Vitória (SF. 24) e Iguape (SF. 23)*. Departamento da Produção Mineral-DNPM, Brasília.

Gemworld International. 2018. Gem Guide: Market driven independent pricing, November/December 2018. *The Gem Guide*, 37(6).

GIA - Gemological Institute of America. *Amethyst Quality Factors*. 2023. GIA. Disponível em: <<https://www.gia.edu/amethyst-quality-factor>>. Acesso em: 26 ago. 2023.

Gilbertson, A. 2018. *Colored Gemstone Value Factors*. GIA. Disponível em: <<https://www.gia.edu/gia-news-research/value-factors-design-cut-quality-colored-gemstone-value-factors>>. Acesso em: 13 jul. 2023.

Gilg, H.A., Morteani, G., Kostitsyn, Y., Preinfalk, C., Gatter, I. & Strieder, A.J. 2002. 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(8): 1009-1025. <https://doi.org/10.1007/s00126-002-0310-7>

Götze, J. 2012. Classification, mineralogy and industrial potential of SiO₂ minerals and rocks. In: Götze, J.; Möckel, R. (Ed.). *Quartz: deposits, mineralogy and analytics*. Berlin, Heidelberg, Springer Science & Business Media, pp. 1-28. https://doi.org/10.1007/978-3-642-22161-3_1

Gubelin, E.J., Koivula, J.I. & Schwarz, D. 2005. Inclusion defined. In Gubelin, E. J.; Koivula, J. I. *Photoatlas of inclusions in gemstones*. Basel, Opinio Publishers, v. 2:18-23.

Gubelin, E.J. & Koivula, J.I. 2005. *Photoatlas of inclusions in gemstones*. Basel: Opinio Publishers, v. 2, 829 p.

Guttler, S.R. & Kohigashi, H.C. 2006. Treated violetish blue to violet quartz from Brazil. *Gems & Gemology*, 42(4): 285-86. Disponível em: <<https://www.gia.edu/doc/WN06.pdf>>. Acesso em: 13 jul. 2023.

Guzzo, P.L. 2008. Quartzo. In: Luz, A.B.; Lins, F.A.F. *Rochas & minerais industriais: usos e especificações*. Rio de Janeiro, CETEM/MCT, p. 681-721. Disponível em: <<http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/522>>. Acesso em: 13 jul. 2023.

Hartmann, L.A. 2014. Geologia da riqueza do Rio Grande do Sul em geodos de ametista e ágata. In: Hinrichs, R. (Org.). *Técnicas instrumentais não destrutivas aplicadas a gemas do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, IGeo/UFRGS, pp. 15-26. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/107246/000918182.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 13 jul. 2023.

Hartmann, L.A. 2015. Indicadores geológicos da presença de jazidas de ametista, ágata e cobre em basaltos no Grupo Serra Geral. In: Donato, M., Duarte, L.C. & Hartmann L.A. (Eds.). *Inovação, design e pesquisas aplicadas em gemas, joias e mineração*. Porto Alegre, IGeo/UFRGS, v. 1, pp. 6-13. Disponível em: <http://ctpedras.upf.br/images/pdf/livros/livro_exposol_2015.pdf>. Acesso em: 13 jul. 2023.

Hartmann, L.A., Duarte, L.C., Massonne, H.J., Michelin, C., Rosenstegel, L.M., Bergman, M., Theye, T., Pertille, M., Arena, K.R., Duarte, S.K., Pinto, V.M., Barboza, E.G. & Wildner, W. 2012a. Sequential opening and filling of cavities forming vesicles, amygdaloids and giant amethyst geodes in lavas from the southern Paraná volcanic province, Brazil and Uruguay. *International Geology Review*, 54(1): 1-14. <https://doi.org/10.1080/00206814.2010.496253>

Hartmann, L.A., Medeiros, J.T.N. & Petruzzellis, L.T. 2012b. Numerical simulations of amethyst geode cavity formation by ballooning of altered Paraná volcanic rocks, South America. *Geofluids*, 12: 133-141. <https://doi.org/10.1111/j.1468-8123.2011.00346.x>

Heilbron, M., Campos Neto, M.C., Janasi, V.A., Pedrosa-Soares, A.C., Silva, L.C. & Trouw, R.A.J. 2004. Província Mantiqueira. In: Mantesso-Neto V., Bartorelli A., Brito Neves B.B., Carneiro, C.D.R. (Eds.). *Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo: Beca, pp. 203-234. Disponível em: <<https://geologia.ufc.br/wp-content/uploads/2016/02/geologia-do-continente.pdf>>. Acesso em: 13 jul. 2023.

Holden, E.F. 1925. The cause of color in smoky quartz and amethyst. *American Mineralogist*, 10(9): 203-252. Disponível em: <<https://pubs.geoscienceworld.org/msa/ammin/article-abstract/10/9/203/537319/The-cause-of-color-in-smoky-quartz-and-amethyst>>. Acesso em: 13 jul. 2023.

Juchem, P.L. 2014. Mineralizações de ametista em riodacitos do Grupo Serra Geral, Província Vulcânica Paraná. In: Hartmann, L.A. & Baggio, S.B. (Eds.). *Metagenia e exploração mineral no Grupo Serra Geral*. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pp. 41-54. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/344457101_MINERALIZACOES_DE_AMETISTA_EM_RIO_DACITOS_DO_GRUPO_SERRA_GERAL_PROVINCIA_VULCANICA_PARANA>. Acesso em: 13 jul. 2023.

Juchem, P.L. 1999. *Mineralogia, geologia e gênese dos depósitos de ametista da região do Alto Uruguai, Rio Grande do Sul*. São Paulo, 225p. Tese de Doutorado. Curso de Pós-graduação em Geociências, Programa de mineralogia aplicada. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/T.44.1999.tde-28052015-095948>

Juchem, P.L., Fallick, A.E., Bettencourt, J.S. & Svisero, D.P. 1999. Geoquímica isotópica de oxigênio em geodos mineralizados a ametista da região do Alto Uruguai, RS – um estudo preliminar. In: SIMPÓSIO SOBRE VULCANISMO E AMBIENTES ASSOCIADOS, v. 1., 1999, Gramado. Boletim de Resumos... Gramado, SBG. p. 21. Disponível em: <<https://repositorio.usp.br/item/003127248>>. Acesso em: 13 jul. 2023.

- Juchem, P.L., Fischer, A.C., Bello, R.M.S. & Svisero, D.P. 1994. Inclusões fluidas em ametistas da região do Alto Uruguai, Rio Grande do Sul. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 38, 1994, Camboriú. Boletim de Resumos Expandidos... Camboriú, SBG, p. 649-50. Disponível em: <<http://www.sbgeo.org.br/home/pages/44>>. Acesso em: 13 jul. 2023.
- Juchem, P.L., Fischer, A.C., Svisero, D.P. & Silva, A.O. 2001. Características químicas dos minerais de sílica de geodos mineralizados a ametista da região do Alto Uruguai, RS, Brasil. *In*: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE GEOLOGIA, 11, 2001, Montevideo. *Anais...* Montevideo, Dinamige, p. 1-6.
- Klein, C. & Dutrow, B. 2012. *Manual de ciência dos minerais*. 23 ed. Porto Alegre: Bookman, 716 p. Disponível em: <<https://dageoufba.files.wordpress.com/2013/08/manual-de-cic3aancia-dos-minerais-klein-e-dutrow.pdf>>. Acesso em: 12 jul. 2023.
- Lehmann, G. & Moore, W.J. 1966. Color center in amethyst quartz. *Science*, 152(3725): 1061-1062. <https://doi.org/10.1126/science.152.3725.1061>
- Leite, J.L.M. & Ferreira, P.D. 2016. Datação de pegmatitos portadores de água-marinha no estado do Espírito Santo. *In*: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UFES, 2016, Vitória. *Anais...* Vitória, PRPPG, v. 7, p. 1-9. Disponível em: <<https://anaisjornadaic.sappg.ufes.br/>>. Acesso em: 12 jul. 2023.
- Marsh, J.S., Ewart, A., Milner, S.C., Duncan, A.R., & Miller, R.M. 2001. The Etendeka Igneous Province: magma types and their stratigraphic distribution with implications for the evolution of the Paraná-Etendeka flood basalt province. *Bulletin of Volcanology*, 62(6): 464-486. <https://doi.org/10.1007/s004450000115>
- Medeiros, S.R., Wiedemann-Leonardos, C.M., & Vriend, S. 2001. Evidence of mingling between contrasting magmas in a deep plutonic environment: the example of Várzea Alegre, in the Ribeira Mobile Belt, Espírito Santo, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 73(1): 99-119. <https://doi.org/10.1590/S0001-37652001000100009>
- Milani, E.J. 1997. *Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozoica do Gondwana sul-ocidental*. Porto Alegre, 255p. Tese de Doutorado. Curso de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Milani, E.J., Faccini, U.F., Scherer, C.M., Araújo, L.M. & Cupertino, J.A. 1998. Sequences and stratigraphic hierarchy of Paraná Basin (Ordovician to Cretaceous), Southern Brasil. *Boletim IG/USP*, 29: 125-173.
- Milani, E.J., Melo, J.H.G. de, Souza, P.A. de, Fernandes, L.A. & França, A.B. 2007. Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobras*, Rio de Janeiro, 15(2): 265-287. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/279547262_Parana_basin>. Acesso em 25 ago. 2023.
- Nassau, K. 1980. *Gems made by man*. Chilton Book Company, 364 p.
- Oliveira, I.G. Freires, T. Maciel, E., Santos, L., Pascoal, W. & Neri, T. 2021. Aspectos gemológicos de ametistas de Quixeramobim, Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências*, 44: 41769. https://doi.org/10.11137/1982-3908_2021_44_41769
- Oliveira, I.G. Maciel, E.L., Rodrigues, T. F., Mattos, I. C. & Neri, T.F.O. 2020. Caracterização gemológica das ametistas com alta birrefringência de Santa Quitéria. *Anuário do Instituto de Geociências*, 43(3): 137-144. http://doi.org/10.11137/2020_3_137_144
- Pantia, A.I. Da Silva, D.C. & Filiuță, A.E. 2022. Blue quartz in Brazil: the Rio dos Remédios occurrence – preliminary study. *Pesquisas em Geociências*, 49(1): e114132. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.114132>
- Peate, D.W., Hawkesworth, C.J. & Mantovani, M.S.M. 1992. Chemical stratigraphy of Paraná lavas (South America): classification of magma types and their spatial distribution. *Bulletin of Volcanology*, 55(1-2): 119-139. <https://doi.org/10.1007/BF00301125>
- Pedrosa-Soares, A.C. & Wiedemann-Leonardos, C.M. 2000. Evolution of the Araçuaí belt and its connection to the Ribeira Belt, Eastern Brazil. *In*: Cordani, U.G., Campos, D.A., Milani, E.J. & Thomaz Filho A. (Eds.) *Tectonic evolution of South America. International Geological Congress*, Rio de Janeiro, p. 265-285. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/media/recursos_minerais/livro_265_365.pdf>. Acesso em: 13 jul. 2023.

- Pedrosa-Soares, A.C., Noce, C.M., Wiedemann, C.M. & Pinto, C.P. 2001a. The Araçuaí-West Congo orogen in Brazil: An overview of a confined orogen formed during Gondwanaland assembly. *Precambrian Research*, 110(1-4): 307-323. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(01\)00174-7](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(01)00174-7)
- Pedrosa-Soares, A.C., Pinto, C.P., Netto, C., Araújo, M.C., Castañeda, C., Achtschin, A. B. & Basílio, M.S. 2001b. A Província Gemológica Oriental do Brasil. In: Castañeda, C., Addad, J. E. & Liccardo, A. (Ed.). *Gemas de Minas Gerais*. Belo Horizonte, Sociedade Brasileira de Geologia, p. 16-33.
- Pedrosa-Soares, A.C., Noce, C.M., Silva, L.C., Cordani, U.G., Alkmim, F.F. & Babinski, M. 2005. Orógeno Araçuaí: Estágio Atual do Conhecimento Geotectônico. In: SIMPÓSIO SOBRE O CRÁTON DO SÃO FRANCISCO, 3, 2005. Salvador, Bahia. *Anais...* Salvador, SBG, v. 1, p. 243-246. Disponível em: <http://sbg.sitepessoal.com/sitesantigos/iicratonsf/ST5/ST5-14_Pedrosa-Soares%20rev.htm>. Acesso em: 13 jul. 2023.
- Pedrosa-Soares, A.C., Alkmim, F.F., Babinski, M., Castañeda, C., Cordani, U., Noce, C.M. & Silva, L.C. 2007. Orógeno Araçuaí: síntese do conhecimento 30 anos após Almeida 1977. *Geonomos*, 15(1): 1-16. <https://doi.org/10.18285/geonomos.v15i1.103>
- Pedrosa-Soares, A.C., Alkmim, F.F., Babinski, M., Martins-Neto, M.A., Noce, C.M., Silva, L.C. & Tack L. 2008. Similarities and differences between the Brazilian and African counterparts of the Neoproterozoic Araçuaí-West-Congo orogen. *Geological Society, London, Special Publications*, 294(1): 153-172. <https://doi.org/10.1144/SP294.9>
- Pedrosa-Soares, A.C., De Campos, C.P., Noce, C., Silva, L.C., Novo, T., Roncato, J., Medeiros, S., Castañeda, C., Queiroga, G., Dantas, E., Dussin, I. & Alkmim, F. 2011. Late Neoproterozoic-Cambrian granitic magmatism in the Araçuaí orogen (Brazil), the Eastern Brazilian Pegmatite Province and related mineral resources. *Geological Society, London, Special Publications*, 350: 25-51. <https://doi.org/10.1144/SP350.3>
- Peres, G.G., Alkmim, F.F. & Jordt-Evangelista, H. 2004. The southern Araçuaí belt and the Dom Silvério Group: geologic architecture and tectonic significance. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 76(4): 771-790. <https://doi.org/10.1590/S0001-37652004000400011>
- 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(1): 53-65. <https://doi.org/10.1017/S001675680600269X>
- 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. <https://doi.org/10.1017/S0016756807003457>
- Rosenstengel, L.M. & Hartmann, L.A. 2012. Geochemical stratigraphy of lavas and fault-block structures in the Ametista do Sul geode mining district, Paraná volcanic province, southern Brazil. *Ore Geology Reviews*, 48: 332-348. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2012.05.003>
- 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. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/38632?show=full>>. Acesso em: 22 ago. 2023.
- Rossetti, L. de M.M., Simões, M.S., Lima, E.F. de, Waichel, B.L. & Sommer, C.A. 2021. Estratigrafia do grupo Serra Geral na Calha de Torres, sul do Brasil. In: Jelinek, A.R. & Sommer, C.A. (Ed). *Contribuições à geologia do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina*. Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Geologia, Compasso Lugar-Cultura, p. 321-336. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/221988/001126526.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 18 ago. 2023.
- Rossetti, L., Lima, E.F., Waichel, B.L., Hole, M.J., Simões, M.S., & Scherer, C.M.S. 2018. Lithostratigraphy and volcanology of the Serra Geral Group, Paraná-Etendeka Igneous Province in Southern Brazil: Towards a formal stratigraphical framework. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 355:98-114. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.05.008>
- 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. (Ed.). *Quartz: Deposits, mineralogy and analytics*. Berlin, Heidelberg, Springer Science & Business Media, pp. 139-159. https://doi.org/10.1007/978-3-642-22161-3_6

Schumann, W. 2006. *Gemas do mundo*. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 279 p.

Silva, L.C., McNaughton, N.J., Armstrong, R., Hartmann, L.A. & Fletcher, I.R 2005. The Neoproterozoic Mantiqueira Province and its African connections; a zircon-based U/Pb geochronologic subdivision for the Brasiliano/Pan-African systems of orogens. *Precambrian Research*, 136(3-4): 203-240. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2004.10.004>

Taufner, I. 2013. *A Pedra da Onça: jazidas, lavras e garimpos no Espírito Santo: memórias II*. Vila Velha: Gráfica, 235 p.

Tononi, L. L. 2019. *Desenvolvimento da cor por radiação gama em quartzo incolor: geodos associados à riodacitos da região de Progresso e Nova Bréscia (Rio Grande do Sul-Brasil)*. Porto Alegre, 86p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/189205>>. Acesso em: 23 jul. 2023.

Tononi, L.L., Duarte, L.C., Juchem, P.L., Menezes, M.T.F. & Schnellrath, J. 2019. Tratamento por radiação gama em cristais de ametista da região de Progresso/RS. *Revista de Ciências Exatas Aplicadas e Tecnológicas da UPF*, 11(1): 10-18. <https://doi.org/10.5335/ciatec.v11i1.9290>

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): 1-11. <https://doi.org/10.1590/2317-488920202020190114>

Vieira, V.S., Silva, M.A., Corrêa, T.R. & Lopes, N.H.B. 2018. Mapa geológico do estado do Espírito Santo. Belo Horizonte, CPRM, escala 1:400.000. Disponível em: <<https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/15564>>. Acesso em: 12 jul. 2023.

Winge, M. 2020a. Alóctone. Disponível em: <<http://sigep.cprm.gov.br/glossario/verbete/alocstone.htm>>. Acesso em: 10 jul. 2020.

Winge, M. 2020b. Coluvião. Disponível em: <<http://sigep.cprm.gov.br/glossario/verbete/coluviao.htm>>. Acesso em: 10 jul. 2020.

Winge, M. 2020c. Aluvião. Disponível em: <<http://sigep.cprm.gov.br/glossario/verbete/aluviao.htm>>. Acesso em: 10 jul. 2020.

Zalán, P.V., Wolff, S., Conceição, J.C.J., Marques, A., Astolfi, M.A.M., Vieira, I.S., Appi, V.T. & Zanotto, O.A. 1990. Bacia do Paraná. In: Gabaglia, G.P.R. & Milani, E.J. (Ed). *Origem e evolução de bacias sedimentares*. Rio de Janeiro, Ed. Gávea, PETROBRAS, p. 135-168. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Pedro-Zalan/publication/344301182_Bacia_do_Parana_-_Origem_e_Evolucao_de_Bacias_Sedimentares/links/5f64e39c92851c14bc85cfe3/Bacia-do-Parana-Origem-e-Evolucao-de-Bacias-Sedimentares.pdf>. Acesso em: 12 jul. 2023.