

Pseudomorfismo: um importante processo mineralógico descrito com exemplos brasileiros

PSEUDOMORPHISM: AN IMPORTANT MINERALOGICAL PROCESS DESCRIBED FROM BRAZILIAN EXAMPLES

MARIO LUIZ DE SÁ CARNEIRO CHAVES¹, MARIANA BESSA FAGUNDES², PAULO ROBERTO GOMES BRANDÃO³

1 - UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, FACULDADE DE GEOLOGIA, RUA SÃO FRANCISCO XAVIER, 524, 20550-013, RIO DE JANEIRO, RJ, BRASIL.

2 - UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, FACULDADE DE GEOLOGIA, LABORATÓRIO DE ESTUDOS TECTÔNICOS (LET-TEKTOS), RIO DE JANEIRO, RJ, BRASIL.

3 - UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, ESCOLA DE ENGENHARIA, DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS, BELO HORIZONTE, MG, BRASIL.

E-MAIL: SACARNEIRO.70@GMAIL.COM. MARIANAFBESSA@GMAIL.COM. PBRANDAO@DEMIN.UFMG.BR.

Abstract: Introduction. Pseudomorphism consists of replacing one mineral species over another, which may be the partial or total or only the coating with subsequent removal of the original material. The main preponderant factor is the maintenance of the form of this original mineral, with the “substitute” mineral not needing to have the same atomic structure as its predecessor. **Objective and Methodology.** In order to better explain the phenomenon, typical although distinct cases of pseudomorphism types were studied on occurrences of four different Brazilian localities. All minerals were analyzed with X-ray diffractometer; parasite-(La) also with SEM/EDS and electron microprobe. **Results.** The described mineral assemblages are: (1) microperthite-nepheline-analcime after leucite (pseudoleucite), (2) quartz after anhydrite, (3) rare earth minerals after parasite-(La), and (4) rutile after anatase. **Conclusion.** It is expected that a detailed description of different cases of pseudomorphism, based on Brazilian samples, can serve as enlightening didactic material for the reported phenomenon.

Resumo: Introdução. O pseudomorfismo consiste na substituição de uma espécie mineral por outra, podendo ser essa substituição parcial ou total, ou somente o recobrimento de um mineral com posterior remoção do material original. O principal fator preponderante é a manutenção da forma do mineral original, não tendo o mineral “substituto” qualquer necessidade de possuir a mesma estruturação atômica do seu predecessor. **Objetivo e Metodologia.** Para bem explicar o fenômeno, foram estudados casos típicos, embora distintos, de ocorrências de pseudomorfismo em quatro diferentes localidades brasileiras. Todos os minerais foram analisados por difratômetro de raios-X (DRX); a parasita-(La) e minerais paragenéticos também com MEV/EDS e microsonda eletrônica. **Resultados.** As assembleias minerais descritas são: (1) microperthita-nefelina-analcima sobre leucita (pseudoleucita), (2) quartzo sobre anidrita, (3) minerais de terras raras sobre parasita-(La), e (4) rutilo sobre anatósio. **Conclusão.** Acredita-se que a descrição pormenorizada de casos distintos de pseudomorfismo, com base em amostras brasileiras, possa servir como material didático esclarecedor para o fenômeno retratado.

Introdução

A Mineralogia, como uma Ciência derivada principalmente da Geologia e da Química, envolve uma série de conceitos básicos dependentes de tais áreas do conhecimento. Dentre estas, destaca-se um fenômeno relativamente comum na gênese dos minerais, o pseudomorfismo (do grego *pseudos* = falso + *morphes* = forma), que corresponde à substituição de uma espécie por outra durante seu processo de formação ou, mais comumente, de ocorrência em algum estágio posterior à sua cristalização primária, embora mantendo-se a forma original do mineral modificado.

Este conceito é conhecido desde o início do século XIX (Hussak, 1917) e ocorre devido a variações químicas e/ou de temperatura e pressão no

ambiente de crescimento do mineral (Stonehouse, 1981). Segundo os manuais clássicos de mineralogia (e.g., Dana & Hurlbut Jr., 1976, Klein & Hurlbut Jr., 1999), o pseudomorfismo ocorre por diversos fatores genéticos, e provavelmente por isso não existe consenso absoluto sobre as nomenclaturas vigentes quanto à sua tipologia. Certos autores, como Whitten & Brooks (1972) e Dana & Hurlbut Jr. (1976) reconhecem a existência de quatro tipos distintos de pseudomorfismo segundo a maneira pela qual se formam:

(1) por substituição, quando há remoção gradual do material primitivo e uma substituição simultânea por outro material, sem qualquer reação química entre ambos, como o caso muito comum

Citation/Citação: Chaves, M. L. S. C., Fagundes, M. B., & Brandão, P. R. G. (2023). Pseudomorfismo: um importante processo mineralógico descrito com exemplos brasileiros. *Terræ Didática*, 19(Publ. Contínua), 1-11, e023006. doi: 10.20396/td.v19i00.8672057.



Artigo submetido ao sistema de similaridade

Keywords: Mineral growth, Pseudomorphism types, Brazilian minerals.

Palavras-chave: Crescimento mineral, Tipologia do pseudomorfismo, Minerais brasileiros.

Manuscript/Manuscrito:

Received/Recebido: 21/01/2023

Revised/Corrigido: 11/02/2023

Accepted/Aceito: 25/02/2023

Editor responsável: Celso Dal Ré Carneiro 

Revisão de idioma (Inglês): Hernani Aquini Fernandes Chaves 



de goethita sobre pirita (“limonita”); (2) por incrustação, ou “perimorfismo” (Strunz, 1982), quando uma crosta de certo mineral é depositada sobre outro e o mineral original é posteriormente removido por dissolução, ficando sua presença indicada pelo molde deixado, como quartzo sobre cristais cúbicos de fluorita; (3) por alteração, quando ocorre adição parcial de material novo, ou remoção parcial do material primitivo, podendo-se encontrar um núcleo com um núcleo do mineral relicto, a exemplo de anidrita sobre gipsita; (4) por “paramorfismo”, quando minerais de mesma composição química (ou seja, polimorfos) trocam seu comportamento estrutural sem haver mudança na forma externa, como as paramorfoses de rutilo sobre anatásio ou brookita (TiO_2).

Em outros compêndios (e.g., Stonehouse, 1981, Klein & Hurlbut Jr., 1999, Klein & Dutrow, 2012), o quarto tipo (“paramorfismo”) foi excluído sem explicações, talvez por se considerar como um subtipo de substituição. No entanto, parece ficar claro que os dois primeiros tipos (substituição e incrustação) se configuram como os mais “clássicos” e comuns.

Tendo em vista a exemplificação de diversos casos de pseudomorfismo, no presente estudo serão discutidas quatro localidades mineralógicas brasileiras de diferentes naturezas (Fig. 1), conforme a classificação tipológica mais completa e apresentada na mesma ordem desses autores (Whitten & Brooks, 1972, Dana & Hurlbut Jr., 1976); (1) por substituição (micropertita, nefelina e analcima sobre leucita); (2) por incrustação (quartzo sobre anidrita); (3) por alteração [principalmente monazita-(Ce) e bastnaesita-(La) sobre parisita-(La)]; e (4) por paramorfismo (rutilo sobre anatásio).

Metodologia

As amostras estudadas foram coletadas pelo primeiro autor, em trabalhos de campo nas suas regiões de origem, quando era Professor de Mineralogia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (IGC/UFMG). Tendo em vista homogeneizar as respectivas análises, todas as amostras foram submetidas ao método de difratometria de raios-X (DRX), por se julgar que tal metodologia é eficaz para as determinações pretendidas.

As análises foram realizadas nos laboratórios de mineralogia do Departamento de Engenharia de Minas (DEMIN), da Escola de Engenharia da

UFMG. A parisita-(La) foi também estudada por espectrometria de energia dispersiva (*Energy Dispersive Spectroscopy* - EDS), sob microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) nesses laboratórios, previamente à sua determinação como uma nova espécie mineral, com análises complementares por microsonda eletrônica no Centro de Microscopia da UFMG. As composições químicas fornecidas estão de acordo com Mandarin & Back (2008).

Caso 1: Pseudomorfismo por substituição de micropertita (KAlSi_3O_8), nefelina $[(\text{Na},\text{K})\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ e analcima ($\text{NaAlSi}_2\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$) sobre leucita (KAlSi_2O_6) de Rio das Ostras, Rio de Janeiro

Características Gerais

As primeiras descrições sobre pseudoleucitas remontam ao século XIX, associadas a rochas alcalinas no Brasil, na Serra do Tinguá, Nova Iguaçu, Estado do Rio de Janeiro (Hussak, 1887, Derby, 1891, Knight, 1906). Após isso, muitas outras ocor-

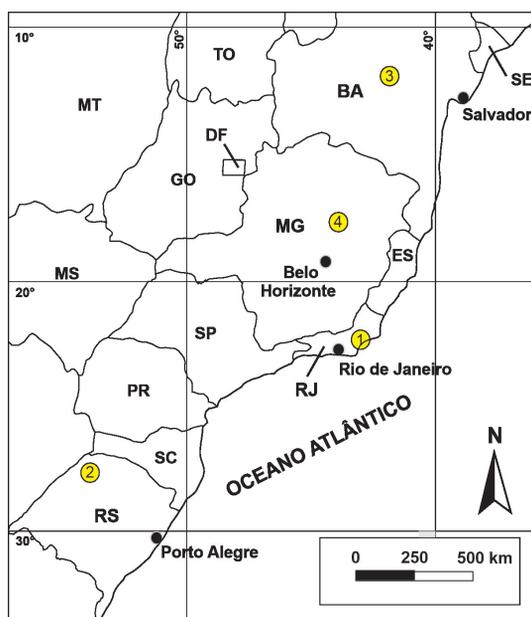


Figura 1. Localização dos exemplos estudados de tipos de pseudomorfismo. 1) Substituição de micropertita-nefelina-analcima sobre leucita em Rio das Ostras (Rio de Janeiro, RJ); 2) incrustação de quartzo sobre anidrita em Ametista do Sul (Rio Grande do Sul, RS); 3) alteração de minerais de terras raras sobre parisita-(La) em Novo Horizonte (Bahia, BA) e; 4) paramorfose de rutilo sobre anatásio em Diamantina (Minas Gerais, MG)

rências foram descritas mundialmente. Na época, a dúvida predominante consistia na origem do fenômeno, se pela reação da leucita cristalina primária com o magma durante sua cristalização (Bowen & Ellestad, 1937), ou por meio da quebra do *subsolidus* durante ou após os estágios finais de cristalização do magma (Knight, 1906, Larsen & Buie, 1938).

Fudali (1963) efetuou a primeira análise experimental acerca da formação do citado material e procurou comprovar a segunda hipótese. Posteriormente, Taylor & Mackenzie (1975) evidenciaram, também experimentalmente, que o sódio na fase vapor poderia ser transportado para enriquecer ou empobrecer a composição original da leucita. Todavia, mesmo com ambos os resultados experimentais sendo satisfatórios quanto formação de pseudoleucita, permaneceram incertezas sobre a frequência relativa e importância desses processos na natureza. Um fator importante citado por tal autor é consequência da descrição deficiente das amostras, com interpretação de texturas e mineralogia aquém do desejado devido ao alto grau de alteração que as amostras em geral apresentam.

Nos maciços alcalinos do Estado do Rio de Janeiro, uma caracterização petrográfica e química mais acurada da pseudoleucita foi inicialmente apresentada por Valença & Edgar (1979) a partir de amostras dos maciços alcalinos de Itaúna (município de São Gonçalo) e Tanguá (na época pertencente ao município de Rio Bonito, atualmente Tanguá). A ocorrência do Complexo Alcalino do Morro de São João (município de Casemiro de Abreu) foi mais recentemente descrita por diversos autores (Brotzu et al., 2007, Mota et al., 2009, Fagundes, 2020). Todos os maciços estão inseridos na Província Alcalina Serra do Mar (Riccomini et al., 2005) com idades cretácicas variáveis principalmente entre 85 Ma e 65 Ma (Sonoki & Garda, 1988, Brotzu et al., 2007).

A substituição de pseudoleucita sobre leucita de Rio das Ostras

Nas proximidades da zona central da cidade de Rio das Ostras (Fig. 1), ocorre um dique de rocha félsica de morfologia lenticular com cerca de 2 m de largura e quase 20 m de comprimento segundo a direção N40°W (Cassedanne & Menezes, 1989). Tal rocha, bastante meteorizada, encaixa-se em gnaisses semelhantes aos hospedeiros do Complexo Alcalino do Morro de São João, e provavelmente

se associa também ao magmatismo alcalino desse complexo e de outras intrusões reportadas para a região litorânea do estado, na referida província alcalina.

O Morro de São João constitui um corpo circular de aproximadamente 4 km de diâmetro, que intrude o Complexo Região dos Lagos, composto por gnaisses e migmatitos do embasamento paleoproterozoico (Heilbron, 2016). O complexo alcalino apresenta uma grande variedade faciológica de sienitos potássicos a ultrapotássicos ricos em Ca e Ti, associados ou não à pseudoleucita, além de rochas hipoabissais (Mota et al., 2009) e uma variedade de rochas máficas e ultramáficas sem olivina (Brotzu et al., 2007).

A idade deste maciço foi datada em 64,8 Ma (K-Ar em rocha total; conforme Mota et al., 2009), idade que pode ser presumida também, por sua proximidade, para o dique alcalino em questão. A ocorrência de pseudoleucitas perfeitamente cristalizadas em Rio das Ostras (Fig. 2A) foi inicialmente descrita por Menezes & Tubs (1986) e Cassedanne & Menezes (1989). Material de aspecto e qualidade semelhante foi reportado anteriormente no Maciço Alcalino de Poços de Caldas, Minas Gerais, por Guimarães & Ilchenko (1954) (Fig. 2B).

Os fenocristais pseudo-cúbicos (trapezoédricos) da pseudoleucita do dique de Rio das Ostras apresentam coloração branca, branca-amarelada ou bege. Conforme Menezes & Tubs (1986), cristais isolados são abundantes na matriz do dique, no entanto geminados duplos e agregados de três ou mais cristais também são comuns. Valença & Edgar (1979) determinaram com microsonda eletrônica que as pseudoleucitas dos maciços alcalinos por eles estudados são compostas principalmente de ortoclásio micropertítico e nefelina, com analcima subordinada. Entretanto, os cristais ocorrentes no dique estão ainda “sobrealterados” para hidróxido de alumínio e caolinita (Cassedanne & Menezes, 1989).

A maioria dos cristais possui diâmetros entre 15-25 mm, sendo observados alguns raros de 4 cm. Segundo tais autores, nos cristais trapezoédricos cada uma das 24 faces é um trapézio, entretanto, no conjunto das três faces trapezoidais de cada setor são notadas diferenças decorrentes de defeitos de crescimento, resultando no aparecimento de faces pentagonais e heptagonais. A média de cinco medidas de densidade relativa efetuadas sobre a amostra da figura 2A resultou em 2,31, contrastante com a densidade da leucita (2,4-2,5), diferença considerada consequente da mistura com outros minerais menos densos.

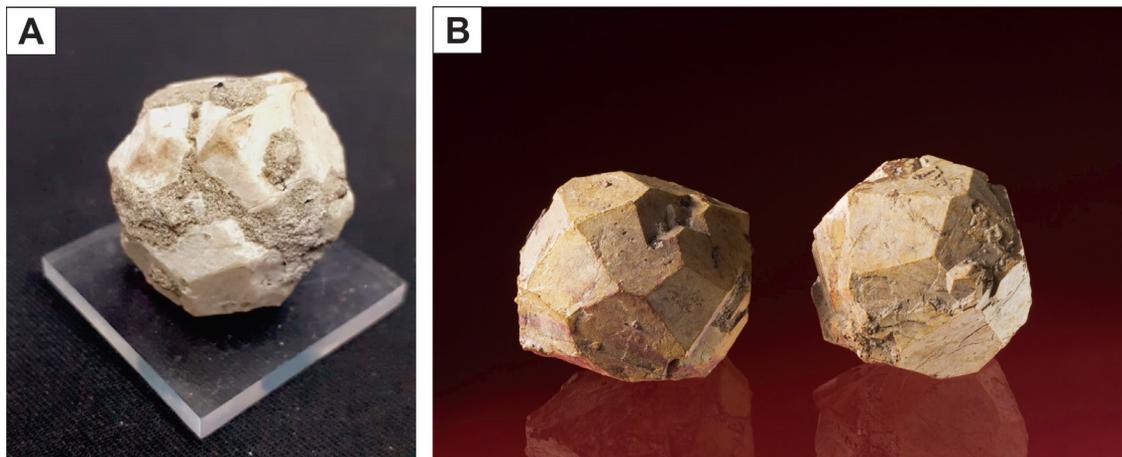


Figura 2. Exemplos de cristais de pseudoleucita. A) Pseudoleucita coletada em Rio das Ostras, Rio de Janeiro, com 25 x 23 mm (coleção e foto do co-autor M. Chaves). B) Crisais de pseudoleucita do Maciço de Poços de Caldas (MG), peça à direita com 45 x 40 mm (coleção A. Bartorelli, foto Marcelo Lerner, in Cornejo & Bartorelli, 2010)

Discussões acerca do contexto tectônico das rochas hospedeiras remetem a um ambiente geológico de baixa profundidade. De acordo com os dados experimentais de Fudali (1963) e Barton & Hamilton (1978), a leucita se torna instável acima da pressão de 1 kbar (H_2O). Com isso, a ocorrência de pseudoleucita indica a colocação dessas rochas em profundidades próximas à estabilidade inicial da leucita, entre 2-3 km. Um esquema evolutivo esquemático relativo à formação da pseudoleucita por pseudomorfismo de substituição é apresentado na Figura 3.

Caso 2: Pseudomorfismo por incrustação de drusas de quartzo (SiO_2) sobre anidrita ($CaSO_4$) associadas a depósitos de ametista do Rio Grande do Sul

Características Gerais

Desde a década de 1980, existe no mercado para colecionadores de minerais um material pouco comum, com baixa densidade e destacada beleza, em geral denominado de “pseudomorfo de quartzo microcristalino sobre anidrita”, proveniente das minas de quartzo ametista de classe mundial situadas nos arredores de Ametista do Sul, noroeste do Rio Grande do Sul (Fig. 1). Primeiramente descrito num *Extended Abstract* na

Alemanha, por Lieber (1985), tal material tem sido assim caracterizado, embora sem estudos químicos complementares mais detalhados.

O Brasil é o maior produtor mundial de ametista, sendo cerca de 80% de sua produção derivada dos depósitos contidos em rochas vulcânicas do Rio Grande do Sul, relacionadas à Bacia do Paraná. Os derrames basálticos podem atingir espessura máxima de 1.700 m, cobrindo uma área aproximada de 917.000 km^2 no Brasil, Uruguai, Paraguai e Argentina (Frank et al., 2009). Os depósitos de ametista, assim como os pseudomorfos, são tipicamente gerados no topo dos derrames que se associam à Formação Serra Geral, do Grupo São Bento (Gordon Jr., 1947, Juchen, 1999).

Juntamente com seus equivalentes na Namíbia (África Ocidental), tais rochas fazem parte da Província Vulcânica Paraná-Etendeka (Peate, 1997). O Grupo São Bento é integrado ainda pelos arenitos eólicos da Formação Botucatu, que aparecem abaixo ou localmente traçados nos derrames. As cavidades nos basaltos, conhecidas como geodos, podem ser preenchidas por ametista e/ou outras

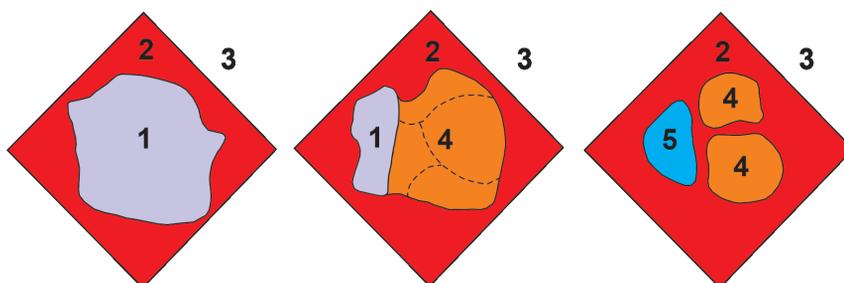


Figura 3. Esquema genético hipotético do pseudomorfismo por substituição nas pseudoleucitas de Rio das Ostras. 1) Leucita original; 2) Feldspato sobre leucita; 3) Rocha alcalina; 4) Nefelina; 5) Analcima

variedades de quartzo como calcedônia, ágata e quartzo hialino, além de zeólitas, opala, calcita, gipsita, e bem mais raramente, o (enfocado) quartzo pseudomorfo sobre anidrita e barita (Juchem, 1999, Gilg et al., 2014).

A origem dos derrames mineralizados em questão relaciona-se às atividades vulcânicas ocorridas na Plataforma Sul-Americana durante a abertura da porção sul do Oceano Atlântico. Thiede & Vasconcelos (2010) determinaram uma idade cretácica de $134,7 \pm 1$ Ma para tais rochas (método $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$), sugerindo um evento curto de erupção ($<1,2$ Ma). Dodd et al. (2015) apresentaram dados paleomagnéticos que demonstram um período de atividades vulcânicas mais longo, superior a 4 Ma.

As incrustações de quartzo sobre anidrita de Ametista do Sul

Ao que parece, não existe material similar em todo mundo, destacando assim sua importância científica. Alguns trabalhos posteriores visando a descrição e/ou gênese dos depósitos de ametista dessa região (e.g., Gilg et al., 2003, 2014, Branco & Gil, 2002), têm aceito tal derivação a partir do recobrimento sobre a anidrita, embora sem informações analíticas adicionais. Uma nova discussão a respeito do material, com a obtenção de dados suplementares por DRX e fluorescência de raios-X, são apresentados neste trabalho.

Os agregados de quartzo microcristalino constituem palhetas placoides compridas, cujos monocristais possuem extremidades em cunha. Os indivíduos são todos ocós e, portanto, de baixa densidade,

calculada entre 2,02 e 2,29 (média de cinco análises cada sobre cinco amostras). A largura das palhetas atinge até 1,5-2,0 cm, e sua coloração característica é bege ou levemente rosada. O conjunto drusiforme pode alcançar cerca de 50 cm de diâmetro (os mais procurados por colecionadores), mas em geral os agregados são de poucos centímetros (Fig. 4A-B).

Até o presente estudo, faltavam ainda estudos analíticos específicos e detalhados de tais amostras. Dois espécimes são procedentes da Mina do Claudir, foram analisados. O primeiro, adquirido no local, constitui o material “clássico” aí produzido (Fig. 4A-B), enquanto o outro exemplar, coletado no rejeito por um dos autores (M. Chaves), apresenta as palhetas cobertas por uma crosta preta, assemelhando-se a um óxido/hidróxido de manganês (Fig. 4C).

Após a descrição sumária de Lieber (1985) relatando a presença do pseudomorfismo, somente Gilg et al. (2014) reafirmaram tal presunção de origem, embora não tenha ficado claro por parte dos autores se houve novo aporte analítico ou simplesmente uma menção aos dados do primeiro artigo. Com o material agora analisado, foi confirmada a presença de anidrita em ambas as amostras (4,0 e 4,5% de massa), subordinadamente ao quartzo (96 e 72%). Na amostra parcialmente coberta por crostas pretas (Amostra 2), foi identificada a presença de montmorillonita (2,5%), provavelmente constituinte da crosta, junto com calcita (21%), esta última visível macroscopicamente (Fig. 4C). A análise de FRX comprovou tais resultados e não detectou a presença de manganês (Tabela 1).

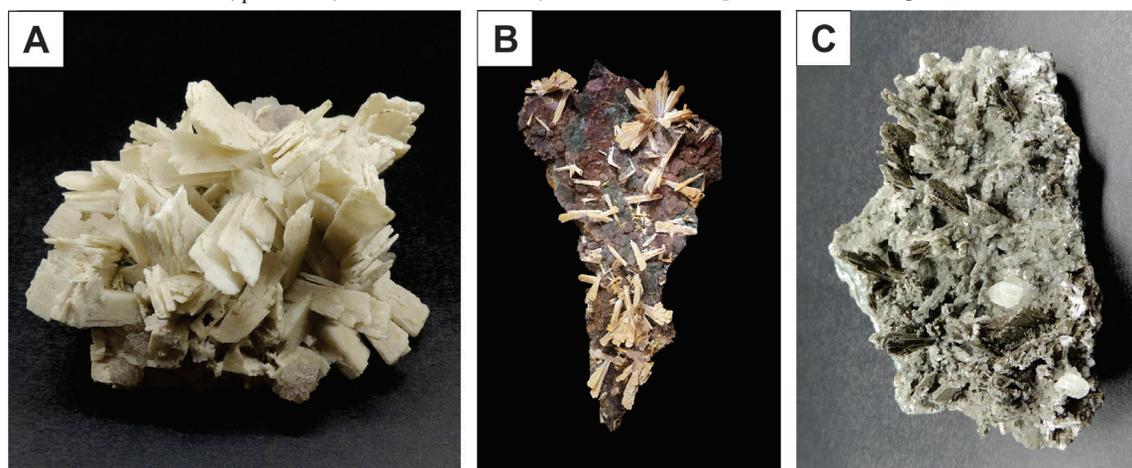


Figura 4. A) Drusa de quartzo sobre anidrita de Ametista do Sul, Rio Grande do Sul, com 110 x 80 mm (coleção e foto do co-autor M. Chaves). B) Agregados de “palhetas” do mesmo material cobrindo rocha basáltica e calcedônia, com 77 x 43 mm (coleção e foto de Paulo Levy, in Cornejo & Bartorelli, 2020). C) Agregado de quartzo sobre anidrita com cristais parcialmente dissolvidos de calcita de Ametista do Sul, com 140 x 105 mm (coleção e foto do co-autor M. Chaves)

No estudo da sequência paragenética constituinte dos geodos de ametista da região, Gilg et al. (2014) identificaram quatro estágios de cristalização de minerais e quatro tipos de fluidos relacionados, determinados por estudo de inclusões fluidas e isótopos estáveis (O, H e S), em perfil da borda para o centro dos geodos (Fig. 5). A anidrita foi reconhecida no Estágio II, em paragênese com calcita, quartzo macrocristalino, ametista, e goethita o que também foi confirmado na caracterização das duas amostras deste trabalho. No estágio IV, pode-se ainda acrescentar o quartzo microcristalino que cobriu as palhetas de anidrita.

Caso 3: Pseudomorfismo por alteração de minerais de terras raras sobre parisita-(La) [CaLa₂(CO₃)₃F₂], um novo mineral brasileiro descrito em Novo Horizonte, Bahia

Características Gerais

No início da década de 2010, um grupo de pesquisadores nacionais e estrangeiros se uniu para tentar identificar novas espécies minerais brasileiras, a partir de amostras colecionadas pelo Eng. de Minas Luiz Alberto Menezes Filho desde longa data. Esse grupo, do qual faziam parte dois dos autores do presente artigo (M. Chaves e P. Brandão), tinha também como objetivo apoiar a Tese de Doutorado de Menezes Filho, afinal não concluída pelo seu falecimento precoce em 2014.

Tabela 1. Análise química por fluorescência de raios-X em amostra de quartzo pseudomorfose sobre anidrita. *Todo ferro como Fe³⁺. Soma das concentrações normalizadas para 100%

Óxidos	Am. 1		Am. 2	
	% em peso	Std Err	% em peso	Std Err
SiO ₂	82,48	0,42	53,81	0,24
SO ₃	8,33	0,14	5,84	0,11
CaO	2,83	0,08	33,05	0,24
Al ₂ O ₃	2,42	0,08	0,94	0,07
MgO	0,62	0,03	3,65	0,09
Fe ₂ O ₃ *	0,18	0,02	2,82	0,18
Na ₂ O	0,14	0,04	0,00	0,00
K ₂ O	0,04	0,00	0,00	0,00
TiO ₂	0,02	0,00	0,01	0,01
MnO	0,00	0,00	0,10	0,08
P ₂ O ₅	0,00	0,00	0,54	0,01

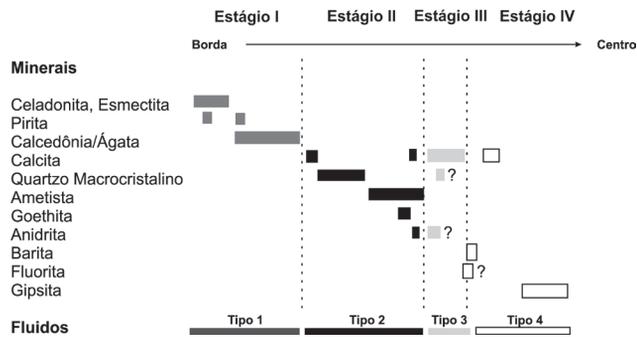


Figura 5. Sequência paragenética com quatro estágios de cristalização mineral e seus tipos de fluidos relacionados em geodos ricos em ametista de Ametista do Sul (conforme Gilg et al., 2014)

Nesse contexto, o mineral parisita-(La) foi descrito a partir de amostras provenientes da região de Novo Horizonte, na Serra do Espinhaço, sudoeste da Bahia (Fig. 1), com o estudo químico envolvendo um dos tipos de pseudomorfismo, caracterizado por substituição química parcial (ou total) do mineral original por outro(s) mineral(is) durante a evolução do processo geológico vigente (Chaves et al., 2017, Menezes Filho et al., 2018). Seu par isomórfico, a parisita-(Ce), já havia sido descrito anteriormente (Yang et al., 1993).

A Serra do Espinhaço na região de Novo Horizonte é constituída por rochas metavulcânicas ácidas relacionadas ao Grupo Rio dos Remédios, basal do Supergrupo Espinhaço na Bahia, com idades de extrusão relacionadas ao Mesoproterozoico (Chaves et al., 2018a). Essa região tem se notabilizado nas últimas décadas como a principal fornecedora mundial de amostras de quartzo hialino com inclusões de hematita e/ou rutilo para o mercado de minerais de coleção (Menezes Filho & Chaves, 2007). Peças com mais de 1 m de comprimento já foram produzidas no local, muitas delas valendo algumas centenas de milhares de dólares.

Na procura por tais amostras, outros minerais têm sido recuperados, dentre os quais o ora descrito parisita-(La), além de outro novo mineral brasileiro, a almeidaíta (Menezes Filho et al., 2015). Mais recentemente, Chaves et al. (2018a) dataram pelo método U-Pb amostras de xenotímio-(Y) associadas aos mesmos depósitos onde foram encontrados esses dois minerais, determinando uma idade de ~490 Ma. Tais idades foram consideradas também as idades de formação dos veios hidrotermais de quartzo nos quais se hospedam as mineralizações, que se relacionam à fase hidrotermal tardia associada ao colapso do Ciclo Brasileiro (desenvolvido entre 630-490 Ma, conforme Pedrosa-Soares et al., 2011).

A parisita-(La) e sua alteração para minerais de terras raras

O principal descobridor da parisita-(La) (L.A.D. Menezes Filho) que, além de colecionador famoso era comerciante de minerais, havia adquirido de outro comerciante na feira de gemas e minerais de Teófilo Otoni (FIPP-2009), diversas amostras tidas como um “material diferenciado”. Todas elas se apresentavam como prismas hexagonais compridos e bem formados, afinando para o topo (Fig. 6A), os quais foram submetidos a diversos tipos de análises visando sua caracterização. Análise preliminar por DRX e MEV/EDS, no DEMIN-UFMG sob a supervisão de um dos autores (P. Brandão), revelou a presença de bastnaesita-(La) na zona de borda do cristal.

Nova análise por DRX (no IG-USP), mostrou também a ocorrência de bastnaesita-(La), no entanto, associada a outra espécie mineral, aparentemente desconhecida. Estudos mais detalhados com microsonda eletrônica (Centro de Microscopia - UFMG) e varredura completa ao longo da seção transversal do cristal identificaram o novo mineral, designado como parisita-(La), o qual era substituído em direção às bordas do cristal por uma mistura de bastnaesita-(La), rabdofânio-(La), monazita-(Ce) e monazita-(La) (Menezes Filho et al., 2018).

Os cristais de parisita-(La) alterados para minerais de terras raras variam de comprimento desde alguns milímetros até 8 cm, tamanho do cristal gigante comprado por um dos autores (M. Chaves), possivelmente o maior já recuperado na área (Fig. 6A). No entanto, a maioria mostra-se entre 1 e 2 cm (Fig. 6B). Agregados cristalinos são raros. Apresentam coloração externa que varia do verde bem claro ao verde escuro e podem ainda estar cobertos por minicristais de quartzo (Fig. 6C), enquanto os núcleos com parisita-(La) são brancos, verde-amarelados ou alaranjados. A presença de sulcos e estrias perpendiculares à direção maior dos cristais é uma constante verificada.

Embora a alteração da parisita-(La) para outros minerais tenha sido bem estabelecida, a ordem do sequenciamento de tais mudanças precisa, contudo, ser melhor caracterizada. Para estudos complementares, além de amostras guardadas por um dos autores (M. Chaves), o espécime-tipo do novo mineral está depositado na coleção mineralógica do Museu de Geociências, da Universidade de São Paulo, com o número de registro DR1032, e também no University of Arizona Mineral Museum em Tucson, Arizona (USA).

Caso 4: Paramorfismo de rutilo (TiO_2) sobre anatásio (TiO_2) em grãos aluvionares associados a depósitos diamantíferos da região de Diamantina, Minas Gerais

Características Gerais

Trata-se provavelmente do mais antigo caso de pseudomorfismo retratado na literatura mineralógica brasileira. De acordo com Hussak (1917) a paramorfose de anatásio para rutilo foi primeiramente descrita pelo mineralogista russo V. Tankow, em 1842, sem estudo químico associado, quando as amostras foram apelidadas de “cativos do Serro Frio”. Conforme Chaves (1997), o termo “cativo” é desde longa data utilizado pelos garimpeiros da região de Diamantina (Fig. 1), para os minerais acompanhantes de forma octaédrica do diamante nos depósitos aluvionares (os “escravos”). Os tipos mais comuns são o cativo-de-ferro (magnetita) e o cativo-de-cobre (rutilo pseudo-octaédrico).

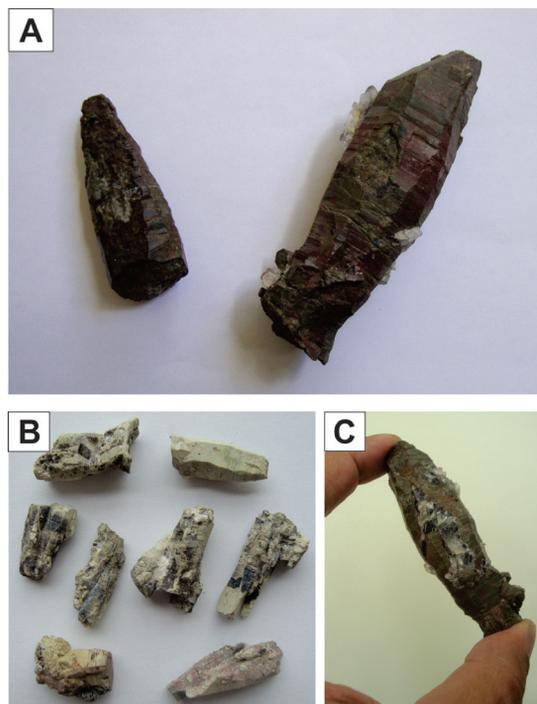


Figura 6. A) Cristais de uma mistura de minerais de terras raras sobre parisita-(La), o maior destes medindo 72 x 24 mm. B) Pequenos cristais do mesmo mineral, em sua forma mais comum, o superior à esquerda medindo 20 x 12 mm. C) Cristal “gigante” do mineral (talvez o maior já encontrado) mostrando ainda pequenos cristais de quartzo sobrecrecidos, medindo 80 x 27 mm (amostras da coleção com fotos do co-autor M. Chaves)

Previamente à descoberta dos kimberlitos na região central da atual República Sul Africana, nos séculos XVIII e XIX o Brasil era o principal produtor mundial de diamantes, e diversos autores procuravam relacionar seus minerais acompanhantes à então desconhecida rocha matriz. O primeiro a determinar o material como sendo um pseudomorfismo de rutilo sobre anatásio foi o célebre mineralogista francês A. Damour, em 1856 (in Hussak, 1917), que assim o descreveu: “a densidade relativa é 4,06, os cristais octaédricos são foscos, de cor pardacenta ou avermelhada, cheios de pequeninos poros, sendo que as agulhas de rutilo se cruzam em diversas direções nesta paramorfose” (Fig. 7).

Cassedanne & Cassedanne (1974) também descreveram o material e sua constituição química indicando o paramorfismo, porém, conforme Chaves (1997) se confundiram ao utilizar o termo “ponta-de-alavanca”, cunhado por garimpeiros, para tal modificação. Segundo Chaves (1997), ponta-de-alavanca é o termo usado por garimpeiros para designar o anatásio em grãos euédricos a subédricos (pouco rolados), cinza claros com tonalidades azuladas. Quando euédricos, os cristais se apresentam alongados e constituídos por duas pirâmides de base quadrada, muitas vezes tortas ou achatadas longitudinalmente pelo desenvolvimento excessivo de duas faces (111) opostas.

O paramorfismo de rutilo sobre anatásio

Cristais de rutilo são muito comuns nos depósitos aluvionares diamantíferos da região de Diamantina, especialmente no Rio Jequitinhonha, sendo verificados por Chaves (1997) em todos os pontos de amostragem aluvionar para o estudo de minerais acompanhantes do diamante. Hussak (1917) já havia considerado esse mineral como

o mais abundante e constante dos “satélites”, ao analisar amostras da mineração, em larga escala, de depósitos aluvionares por potentes dragas de alcatruzes, durante as décadas de 1960 a 1990 (Fig. 7A). No entanto, o mineral pode ocorrer de três formas diferentes na região (Chaves, 1997):

1. O caso estudado, como bipirâmides tetraédricas, frequentemente fragmentadas, de colorações avermelhadas ou róseas (Fig. 7B). Os cristais são sempre porosos, mostrando um brilho fosco, e raramente atingem mais que 0,5 cm de comprimento. Tal variedade tem sido considerada como paramorfismo de anatásio para rutilo (Hussak, 1917, Cassedanne & Cassedanne, 1974) e o novo estudo por DRX realizado no presente estudo reiterou esses dados.
2. Como prismas alongados, estriados longitudinalmente quando não estão arredondados pelo transporte fluvial e, às vezes, apresentando geminação polissintética pela face (101). Esses cristais em geral são pretos e, no caso de alguns menores ou mais achatados, vermelhos escuros. Os maiores observados alcançaram 1 cm de comprimento.
3. Como grãos completamente rolados, achatados e algo compridos, de coloração creme “queimado” ou marrom clara, apresentando superfícies brilhosas, como se fossem envernizadas. São particularmente comuns no Rio Jequitinhonha, onde atingem até quase 1 cm de comprimento. Tais rutilos são leucoxenizados e anteriormente eram incluídos entre as designadas “fâvas” fosfatadas, florencita-(Ce), gorceixita e goyazita (Cassedanne & Cassedanne, 1974).

Os garimpeiros conhecem as várias formas de rutilo da região de Diamantina com nomes carac-



Figura 7. A) Draga da Cia Andrade Gutierrez em operação no Rio Jequitinhonha, Diamantina, na década de 1990, local de amostragem das paramorfoses de rutilo sobre anatásio (foto aérea gentilmente cedida por essa empresa à época). B) Pequenos cristais aluvionares desta localidade, de onde foi separado material para DRX, conhecido pelos garimpeiros como “cativos-de-cobre”; todos os espécimes medindo entre 4 e 6 mm (coleção e foto do co-autor M. Chaves). C) Pseudomorfose de rutilo sobre anatásio em depósito primário da região de Gouveia, ao sul de Diamantina; cristal medindo 28 x 16 mm (coleção e foto do co-autor M. Chaves)

terísticos, respectivamente (1) “cativo-de-cobre”, (2) “agulha” e, (3) “fava marrom”.

Juntamente com a maioria dos minerais aluvionares da região, as paramorfoses de rutilo sobre anatásio possuem sua origem em veios de quartzo hidrotermais, que cortam as sequências metassedimentares pré-cambrianas (supergrupos Rio Paraúna e Espinhaço). Tais veios foram datados em ca. 491 Ma (Chaves et al., 2010). A gênese desse fenômeno mineralógico tem sido relacionada à cristalização original do TiO₂ na forma de anatásio, porém com o aumento nas condições principalmente de pressão local levaram à sua transformação para rutilo (Chaves et al., 2018b). Esses autores descrevem ainda a ocorrência comum de anatásios cobertos parcial ou totalmente por rutilo em depósitos de Datas e Gouveia (Fig. 7C).

Considerações Finais

A descrição detalhada dos diferentes tipos de pseudomorfismo, a partir de amostras de localidades brasileiras de relativamente fácil acesso, além

do interesse científico e didático, busca incentivar a execução de novos estudos pertinentes, uma vez que a ocorrência do fenômeno parece ser bem mais comum do que se supõe. Especialmente em ambientes hidrotermais pós-orogênicos ou pós-vulcânicos, ambos verificados com frequência em depósitos minerais brasileiros, a presença de pseudomorfos pode servir para melhor entendimento das condições de T/P de formação dos depósitos minerais. Cabe ainda salientar que o pseudomorfismo gera amostras mineralogicamente diferenciadas, as quais possuem forte interesse comercial no mercado internacional de minerais para colecionadores.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Prof. Dr. Pedro Juchen (UFRGS) pelas discussões iniciais sobre o pseudomorfismo de quartzo sobre anidrita e à Profª. Dra. Coralie H. Dias (UEMG), pela revisão crítica do manuscrito.

Taxonomia CRediT: • Reconhecimentos: Agradecimentos aos professores Pedro Juchen (UFRGS) e Coralie H. Dias (UEMG). • Financiamento: Não aplicável. • Conflitos de interesse: Os autores certificam que não têm interesse comercial ou associativo que represente um conflito de interesses em relação ao manuscrito. • Aprovação ética: Não aplicável. • Disponibilidade de dados e material: Disponível no próprio texto. • Contribuições dos autores: Conceitualização; Curadoria de dados; Análise formal; Investigação; Metodologia; Administração do projeto; Recursos; Supervisão; Validação; Visualização; Escrita – rascunho original; Escrita – revisão & edição: Mario Luiz de Sá Carneiro Chaves, Mariana Bessa Fagundes, Paulo Roberto Gomes Brandão.

Referências

- Back, M. E., & Mandarino, J. A. (2008). *Fleischer's Glossary of Minerals Species 2008*. Tucson: Mineralogical Record Inc.
- Barton, M., & Hamilton, D. L. (1978). Water-saturated melting relations to 5 kilobars of three Leucite Hills lavas. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 66(1), 41-49.
- Bowen, N. L., & Ellestad, R. B. (1937). Leucite and pseudoleucite. *American Mineralogist*, 22, 409-415.
- Branco, P. M., & Gil, C. A. A. (2002). *Mapa Gemológico do Estado do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: CPRM-SGB. 43p. (Informe de Recursos Minerais, Série Pedras Preciosas n°5). URL: http://dspace.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/1631/mapa_gemologico_rs.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso 20.01.2023.
- Brotzu, P., Melluso, L., Bennio, L., Gomes, C. B., Lustrino, M., Morbidelli, L., Morra, V., Ruberti, E., Tassinari, C., & D'Antonio, M. (2007). Petrogenesis of the Early Cenozoic potassic alkaline complex of Morro de São João, southeastern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 24(1), 93-115. doi: 10.1016/j.jsames.2007.02.006.
- Cassedanne, J. P., & Cassedanne, J. O. (1974). Les anatases de Diamantina (Minas Gerais): minéralogie et importance paléogéographique. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 46, 83-97.
- Cassedanne, J. P., & Menezes, S. O. (1989). “Pseudoleucite” pseudomorphs from Rio das Ostras, Brazil. *Mineralogical Record*, 20(6), 439-440.
- Chaves, M. L. S. C. (1997). *Geologia e Mineralogia do Diamante da Serra do Espinhaço em Minas Gerais*. (Tese Doutorado). São Paulo: Departamento de Mineralogia e Petrologia, Inst. Geoc., USP. doi: 10.11606/T.44.1997.tde-18112015-110030.
- Chaves, M. L. S. C., Brandão, P. R. G., & Buhn, B. (2010). Monazita em veios de quartzo da Serra do Espinhaço Meridional (MG): mineralogia, idades LA-ICP-MS e implicações geológicas. *Revista Brasileira de Geociências*, 40(4), 506-515.
- Chaves, M. L. S. C., Romano, A. W., & Menezes Filho, L. A. D. (2017). Minerais recentemente descritos no Brasil: a participação do Centro de Pesquisa Prof. Manoel Teixeira da Costa - CPMTCC, Instituto de Geociências (UFMG). *Geonomos*, 25(2), 31-43.
- Chaves, M. L. S. C., Buhn, B., Dias, C. H., & Menezes Filho, L. A. D. (2018a). Idades U-Pb em xenotímio-(Y) de um veio de quartzo com almeidaíta e parisita-(La), novos minerais encontrados na Serra do Espinhaço (Novo Horizonte, Bahia). *Geociências*, 37(2), 225-236.
- Chaves, M. L. S. C., Karfunkel, J., Bermanec, V., Zebec, V., Scholz, R., & Menezes Filho, L.

- A. D. (2018b). Anatase crystals with unusual habit in quartz veins from the Diamantina region (Espinhaço Range, Minas Gerais). *REM: International Engineering Journal*, 71(1), 37-43. doi: 10.1590/0370-44672017710069.
- Dodd, S. C., MacNiocaill, C., & Muxworthy, A.R. (2015). Long duration (>4 Ma) 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(1), 16-29. doi: 10.1016/epsl.2015.01.009.
- Fagundes, M. B. (2020). *Caracterização petrológica e geoquímica do Complexo Alcalino do Morro de São João, Casimiro de Abreu, RJ*. Rio de Janeiro: Fac. de Geologia, UERJ. (Dissertação Mestrado). URL: <http://www.bdtd.uerj.br/handle/1/16859>. Acesso 23.01.2023.
- 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, 49-57.
- Fudali, R. F. (1963). Experimental studies bearing on the origin of pseudoleucite and associated problems of alkalic rocks systems. *Geological Society of America Bulletin*, 74, 1101-1126.
- Gilg, H. A., Morteani, G., Kostitsin, Y., Preinfalk, C., Gatter, I., & Strieder, A. J. (2003). Genesis of amethyst geodes in basaltic rocks of the Serra Geral Formation (Ametista do Sul, Rio Grande do Sul, Brazil): a fluid inclusion, REE, oxygen, carbon and Sr isotope study on basalt, quartz, and calcite. *Mineralium Deposita*, 38, 1009-1025.
- Gilg, H. A., Kruger, Y., Taubald, H., Kerkhof, A. M., Frenz, M., & Morteani, G. (2014). Mineralisation of amethyst-bearing geodes in Ametista do Sul (Brazil) from low-temperature sedimentary brines: evidence from monophase liquid inclusions and stable isotopes. *Mineralium Deposita*, 49, 861-877. doi: <https://doi.org/10.1007/s00126-014-0522-7>.
- Gordon Jr., M. (1947). Classificação das formações gondwânicas do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. *DNPM/DGM Notas Preliminares e Estudos*, 38, 1-20.
- Guimarães, D., & Ilchenko, K. (1954). Rochas com pseudoleucita ou epi-leucita de Poços de Caldas. *Boletim Agricultura Belo Horizonte*, 3, 11-13.
- Heilbron, M. (2016). Associações do Embasamento pré- 1,8 Ga. In: Heilbron, M., Eirado, L. G., & Almeida, J. (Orgs.). *Geologia e Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro*. Belo Horizonte: CPRM-SGB. p. 33-44. URL: <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/18458?show=full>. Acesso 16.02.2023.
- Hussak, E. (1887). Ueber Leucit-Pseudokrystalle in Phonolith (Tinguait) der Serra de Tinguia, Estado do Rio de Janeiro, Brazil. *Neues Jahrb. Mineral.*, 1, 166-169.
- Hussak, E. (1917). *Os Satélites do Diamante*. Rio de Janeiro: Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil. 58p.
- Juchem, P. L. (1999). Mineralogia, geologia e gênese dos depósitos de ametista da região do Alto Uruguai, Rio Grande do Sul. São Paulo: Instituto de Geociências, USP. (Tese Dout.). URL: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44135/tde-28052015-095948/pt-br.php>. Acesso 16.02.2023.
- Klein, C., & Dutrow, B. (2012). *Manual de Ciência dos Minerais*. Trad. Rualdo Menegat. 23 ed. Porto Alegre: Bookman. 724p.
- Knight, C. W. (1906). A new occurrence of pseudo-leucite. *American Journal of Science*, 21, 286-293.
- Larsen, E. S., & Buie, B. F. (1938). Potash analcite and pseudoleucite from the Highwood Mountains of Montana. *American Mineralogist*, 23, 837-849.
- Lieber, W. (1985). Pseudomorphose von Quarz nach Anhydrit. *Aufschluss*, 36, 143-144.
- Menezes, S. O., & Tubbs, D. (1986). Sobre a pseudoleucita alterada em rochas alcalinas de Rio das Ostras, Estado do Rio de Janeiro. *Arquivos da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro*, 9(1-2), 87-89.
- Menezes Filho, L. A., & Chaves, M. L. S. C. (2007). Minerais de coleção: ciência, estética e mercado. *Geonomos*, 15(1), 65-73.
- Menezes Filho, L. A., Chumakov, N. V., Rastsvetaeva, R. K., Aksenov, S. M., Pekov, I. V., Chaves, M. L. S. C., Richards, R. P., Atencio, D., Brandão, P. R., Scholz, R., Krambrock, K., Moreira, R. L., Romano, A. W., & Ardisson, J. D. (2015). Almeidaite, Pb(Mn,Y)Zn₂(Ti,Fe³⁺)₁₈O₃₆(O,OH)₂, a new crichtonite-group mineral from Novo Horizonte, Bahia, Brazil. *Mineralogical Magazine*, 79(2), 269-283. doi: 10.1180/minmag.2015.079.2.06.
- Menezes Filho, L. A. D., Chaves, M. L. S. C., Chumakov, N. V., Atencio, D., Scholz, R., Pekov, I., Costa, G. M., ..., & Belakovskiy, L. (2018). Parisite-(La), ideally CaLa₂(CO₃)₃F₂, a new mineral from Novo Horizonte, Bahia, Brazil. *Mineralogical Magazine*, 82(1), 133-144. doi: 10.1180/minmag.2017.081.028.
- Mota, C. E. M., Gerales, M. C., Almeida, J. C. M., Vargas, T., Souza, D. M., Loureiro, R. O., & Silva A. P. (2009). Características isotópicas (Nd e Sr), geoquímicas e petrográficas da intrusão alcalina do Morro do São João: implicações geodinâmicas e sobre a composição do manto sublitosférico. *Geologia USP, Série Científica*, 9(1), 85-100.
- Peate, D. W. (1997). The Paraná-Etendeka Province. In: Mahoney, J. J., & Coffin, M. F. (Eds.). (1997). *Large igneous provinces: continental, oceanic, and planetary flood volcanism*. Washington: American Geophysical Union, Geophysical Monograph, 100, 217-245.
- Pedrosa-Soares, A. C., Campos, C. P., Noce, C. M., Silva, L. C., Roncato, J., & Alkmim, F. F. (2011). Late Neoproterozoic-Cambrian granitic magmatism in the Araçuai Orogen (Brazil) the Eastern Brazilian Pegmatite Province and related mineral resources. In: Sial, A. N., Bettencourt, J. S., Campos, C. P., & Ferreira, V. P. (Eds.). 2011. *Granite-Related Ore Deposits*. London: Geological Society Special Publications. v. 350, 25-51. doi: 10.1144/SP350.3.
- Riccomini, C., Velazquez, V. F., & Gomes, C. B. (2005). Tectonic controls of the Mesozoic and Cenozoic alkaline magmatism in central-southeastern

- Brazilian Platform. In: C.B. Gomes, C. B., & Comin-Chiaramonti, P. (Eds.), 2005, *Mesozoic to Cenozoic alkaline magmatism in the Brazilian Platform*. São Paulo: Edusp-FAPESP, p. 31-55.
- Sonoki, I. K., & Garda, G. M. (1988). Idades K-Ar de rochas alcalinas do Brasil Meridional e Paraguai Oriental: compilação e adaptação às novas constantes de decaimento. *Boletim IG-USP, Série Científica*, 19, 63-85.
- Stonehouse, H. B. (1981). Pseudomorphism. In: *Mineralogy. Encyclopedia of Earth Science*. Boston: Springer. doi: 10.1007/0-387-30720-6-115.
- Strunz, H. (1982). Nach der Einteilung der Pseudomorphosen. *Aufschluss*, 33, 313-342.
- Taylor, D., & Mackenzie, W. S. (1975). A contribution to the pseudoleucite problem. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 49, 321-333.
- 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, 747-750. doi: 10.1130/G30919.1.
- Valença, J. G., & Edgar, A. D. (1979). Pseudoleucites from Rio de Janeiro State, Brazil. *American Mineralogist*, 64, 733-735.
- Vlach, S. R. F., Ulbrich, H. H. G. J., Ulbrich, M. N. C., & Vasconcelos, P. M. (2018). Melanite-bearing nepheline syenite fragments and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age on phlogopite megacrysts in conduct breccia from the Poços de Caldas Alkaline Massif (MG/SP), and implications. *Brazilian Journal of Geology*, 48(2), 391-402. doi: 10.1590/2317-4889201820170095.
- Whitten, D. G. A., & Brooks, J. R. V. (1972). *A Dictionary of Geology*. Middlesex (England): Penguin Books.
- Yang, H., Hugues, J. M., & Mariano, A. N. (1993). The atomic arrangement of bastnäsite-(Ce), $\text{Ce}(\text{CO}_3)\text{F}$, and structural elements of synchysite-(Ce), röntgenite-(Ce), and parisite-(Ce). *American Mineralogist*, 78, 415-418.