

**SAFIRA NA SERRA DA MANTIQUEIRA, SUL DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO: ESTUDOS DE PROVENIÊNCIA COM USO DE ANÁLISE MINERALÓGICA E QUÍMICA MINERAL**

*SAPPHIRE IN THE MANTIQUEIRA RANGE, SOUTH OF RIO DE JANEIRO STATE: PROVENANCE STUDIES USING MINERALOGICAL AND MINERAL CHEMISTRY ANALYSES*

**Ana Carolina de FARIA DUARTE<sup>1</sup>, Marcelo dos Santos SALOMÃO<sup>2</sup>,  
Luiz Carlos BERTOLINO<sup>2,3</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio de Janeiro. Programa de Pós-graduação em Geologia (PPGL). Avenida Athos da Silveira Ramos, 274 - Cidade Universitária, Rio de Janeiro - RJ. E-mail: duarteana2@gmail.com

<sup>2</sup>Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rua São Francisco Xavier, 524 - Maracanã, Rio de Janeiro - RJ.  
E-mail: salomao.mss@gmail.com

<sup>3</sup>Centro de Tecnologia Mineral, CETEM/MCTI. Avenida Pedro Calmon, 900. Cidade Universitária, Rio de Janeiro, RJ.  
E-mail: lcbertolino@cetem.gov.br

Introdução

Localização da área de estudos

Contexto geológico regional

Geologia local

Metodologia

Resultados

Características mineralógicas das safiras

Microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de raios-X por dispersão em energia (MEV-EDS)

Microfluorescência de raios-X ( $\mu$ -FRX)

Discussões

Aspectos gerais das ocorrências de coríndon e enquadramento no contexto dos trabalhos prévios na região

Compatibilidade da metodologia de análise química do coríndon

Considerações sobre a gênese do coríndon (safira)

Conclusões

Agradecimentos

Referências

**RESUMO** - O Brasil é detentor de reservas significativas de pedras preciosas, com destaque para aquelas oriundas das Províncias Pegmatíticas Oriental e da Borborema, como turmalina paraíba, esmeralda e topázio imperial. As explorações de coríndon (rubi e safira) ainda são reduzidas no país e estão localizadas principalmente nos estados de Mato Grosso, Goiás, Santa Catarina e Minas Gerais. Campanhas prospectivas realizadas em drenagens na porção sul do estado do Rio de Janeiro coletaram 24 grãos de coríndon (safira), com dimensões menores que 2 mm e entre 2 e 5 mm. Análises de química mineral por microfluorescência de raios X permitiram o estudo de proveniência, com base nas razões  $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3$ , sugerindo formação por processo metamórfico. As análises de MEV/EDS identificaram inclusões sólidas de biotita e ilmenita. A presença das associações minerais com granada, sillimanita, espinélio e cianita nos metassedimentos neoproterozóicos reforçam a associação genética do coríndon com rochas metamorfizadas em fácies anfíbolito superior a granulito.

**Palavras-chave:** Serra da Mantiqueira. Grupo Andrelândia. Grupo Raposo. Resende.

**ABSTRACT** - Brazil has significant reserves of precious stones, especially those from the Eastern Pegmatitic and Borborema Provinces, such as paraíba tourmaline, emerald and imperial topaz. Corundum exploits (ruby and sapphire) are still reduced in the country and are located mainly in the states of Mato Grosso, Goiás, Santa Catarina and Minas Gerais. Mineral exploration campaigns carried out in drainages in the southern portion of the state of Rio de Janeiro collected 24 corundum (sapphire) grains, with dimensions smaller than 2 mm and between 2 and 5 mm. Analysis of mineral chemistry by Micro X-ray fluorescence allowed the study of provenance based on the  $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3$  ratios, indicating formation by a metamorphic process. SEM/EDS analysis identified solid inclusions of biotite and ilmenite. The presence of the mineral associations garnet, sillimanite, spinel and kyanite in the Neoproterozoic metasediments reinforce the genetic association of the corundum with metamorphic rocks in amphibolite facies (upper grade) to granulite.

**Keywords:** Mantiqueira Range. Andrelândia Group. Raposo Group. Resende.

## INTRODUÇÃO

A safira corresponde a uma variedade de coríndon e ocorre em diversas cores, sendo um óxido de alumínio simples de fórmula  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . O nome é proveniente do termo grego *sapphirus*, referência a sua cor azul. O mineral pertence ao grupo da hematita ( $\text{X}_2\text{O}_3$ ), grupo dos óxidos romboédricos que compreendem: hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), coríndon ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), eskolaíta ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), karelianita ( $\text{V}_2\text{O}_3$ ) e tistarita ( $\text{Ti}_2\text{O}_3$ ). Os cristais de coríndon são transparentes a translúcidos, com brilho adamantino a vítreo, com dureza 9 na escala de Mohs, densidade entre 3,98 e 4,06 e

tenacidade extremamente alta (Giuliani et al., 2014). A safira pode exibir qualquer cor (até incolor), sendo que as cores dos cristais refletem as substituições isomórficas do Al (na forma de  $Al^{3+}$ ). Quando o cromo (na forma de  $Cr^{3+}$ ) substitui o  $Al^{3+}$ , resulta na cor vermelha do cristal. Esse processo, somado à química do grão ( $Cr_2O_3 > Fe_2O_3$ ) e às características dos espectros de absorção, definem o cristal como rubi. A redução do percentual de Cr na substituição dá a cor rosa das safiras. As substituições de  $Al^{3+}$  por Fe ( $Fe^{2+}$  e  $Fe^{3+}$ ) e titânio ( $Ti^{4+}$ ) dão a coloração azul às safiras, devido a um mecanismo de transferência de carga entre os íons metálicos, isto é,  $Fe^{2+}-O-Ti^{4+}$  (Giuliani et al., 2014). As substituições de Al por Cr e V, por exemplo, dão cor verde às safiras; e por Fe e Cr dão a cor laranja (Branco, 2014).

As ocorrências de coríndon podem se dar em diferentes tipos de rochas, porém, em escala regional, dois são os ambientes geológicos mais favoráveis à sua formação: cinturões metamórficos de fácies anfíbolito de médio grau a granulito e ambientes de vulcanismo basáltico alcalino em riftes continentais (Simonet et al., 2008). A formação de coríndon requer condições muito específicas. É necessário não somente um ambiente enriquecido em alumina e empobrecido em sílica, mas também a presença de Fe, Ti e Cr para substituir o Al na estrutura do romboedro e condições termobarométricas favoráveis para sua cristalização e estabilidade (Giuliani et al., 2014). Os diferentes tipos de cátions associados e a estabilidade das paragêneses minerais relacionadas ao grau metamórfico também devem ser levadas em conta para formação do coríndon, já que deve haver não só um excesso de alumina em relação à sílica, mas também em relação ao Fe e Mg, quando o grau metamórfico for muito alto (Liccardo, 2003). As condições termobarométricas ideais para formação do coríndon correspondem a um domínio de pressões acima de 3 kbar com temperaturas entre 500 e

800°C (Giuliani et al., 2014). As rochas-fonte correspondem a litotipos ricos em alumina e/ou pobres em sílica, como mármore, gnaisses aluminosos, micaxistos, rochas máficas-ultramáficas, ou rochas justapostas félsicas e empobrecidas em sílica que foram afetadas pela circulação de fluidos ao longo dos seus contatos e alteradas por metassomatismo (pegmatitos dessilicificados e escarnitos). Ou seja, são rochas que passaram por processo de metamorfismo regional ou de contato. O coríndon também pode ser encontrado como constituinte primário de rochas ígneas básicas ou intermediárias (supersaturadas em alumina e pobres em sílica), bem como em aluviões e colúvios.

Os maiores produtores de safiras são Sri Lanka, Mianmar, Tailândia e Vietnã, com predomínio de depósitos elúvio-aluvionares. No Brasil, as ocorrências de safira estão presentes principalmente nos estados de Mato Grosso, Goiás, Santa Catarina e Minas Gerais, e correspondem a depósitos alúvio-coluvionares.

Na região sudeste do país, abrangendo parte dos estados de Minas Gerais e do Rio de Janeiro, há ocorrências de safira nos municípios de Bocaina de Minas, MG, e em Resende, Itatiaia e Quatis, RJ (Pereira et al., 2003). Novas campanhas prospectivas foram realizadas nos distritos de Visconde de Mauá e Pedra Selada (município de Resende), visando à identificação de coríndon, por meio de concentrados de minerais pesados em leito ativo de drenagem, além da caracterização mineralógica e química, sugerindo possíveis alvos prospectivos para a rocha-fonte.

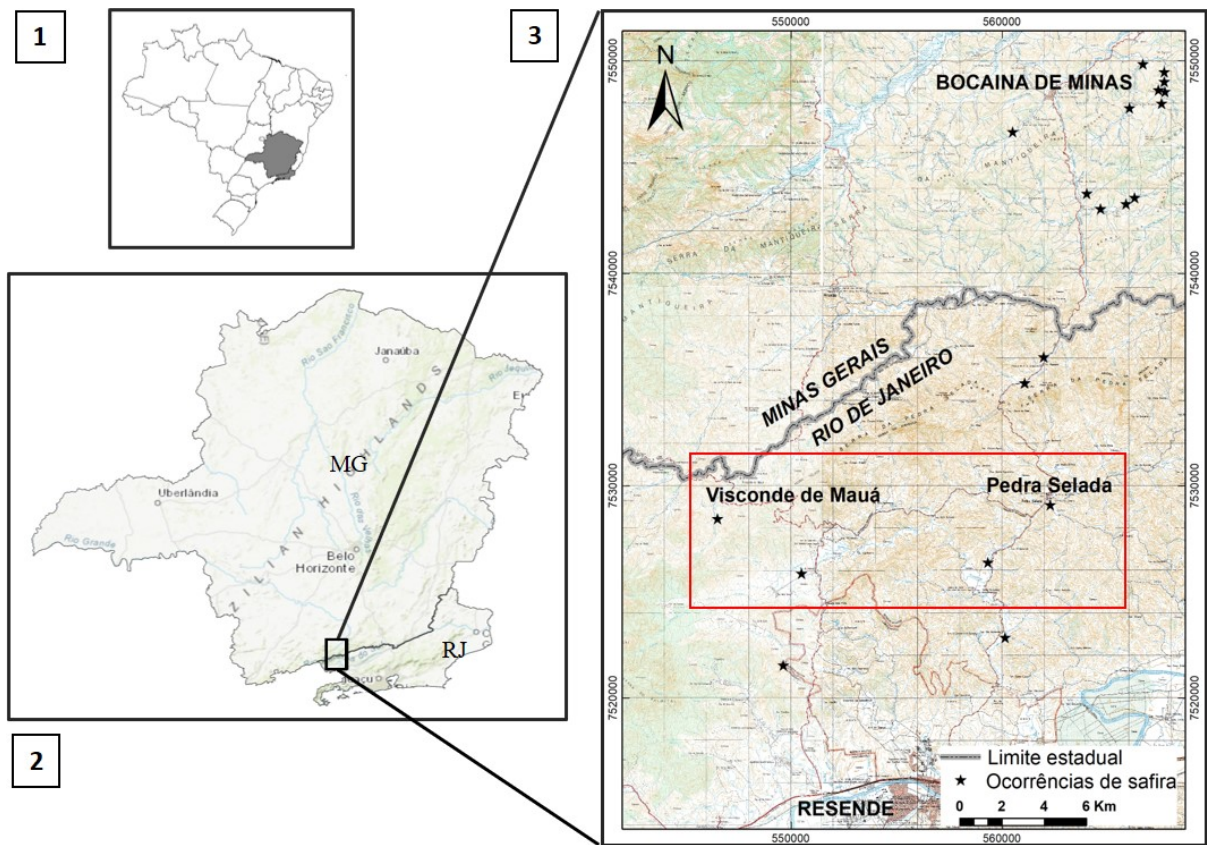
#### **Localização da área de estudo**

A área da pesquisa abrange a região sul do estado do Rio de Janeiro, nos distritos de Visconde de Mauá e Pedra Selada (município de Resende, RJ; Figura 1). Na região, são registradas ocorrências de coríndon (safira) em aluviões recentes do vale do Rio Paraíba do Sul (Pereira et al., 2003).

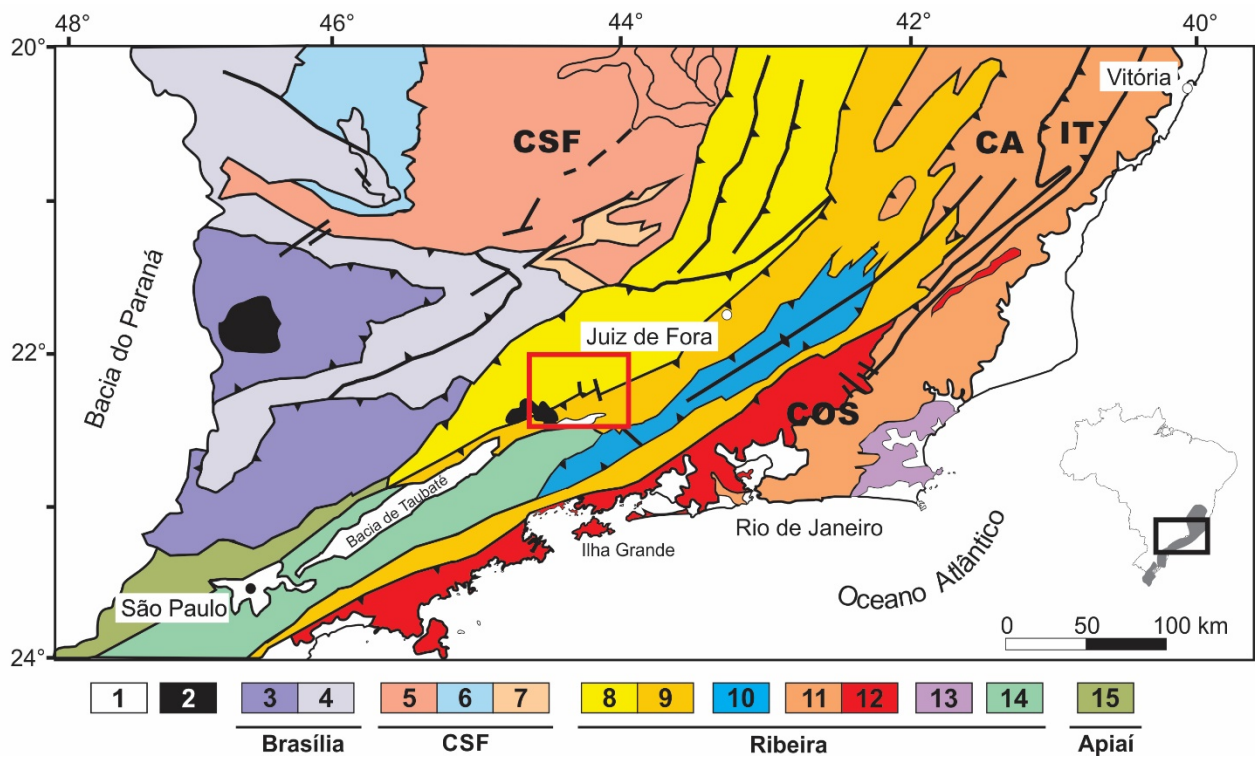
### **CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL**

O Orógeno Ribeira, integrante do conjunto de orógenos neoproterozóico-cambrianos da Província Mantiqueira, resulta do empilhamento estrutural de terrenos tectono-estratigráficos amalgamados entre 580 e 520 Ma. Estes terrenos encontram-se limitados por empurrões ou por zonas de cisalhamento oblíquas (Heilbron et al., 2004), sendo que o orógeno possui *trend* estrutural NE-SW.

A região de interesse inserida no município de Resende, no RJ, está localizada no Terreno Ocidental do Orógeno Ribeira (Figura 2), correspondente à paleoplaca inferior do orógeno, separada da paleoplaca superior (Terreno Oriental) por uma zona de cisalhamento redobrada denominada de Limite Tectônico Central (Tupinambá et al., 2007).



**Figura 1** - Mapas de localização das ocorrências de safira ao sul da Serra da Mantiqueira. O polígono em vermelho destaca a área de trabalho (Figura 3). Fontes: base cartográfica do IBGE na escala 1:50.000 (1973, 1974).

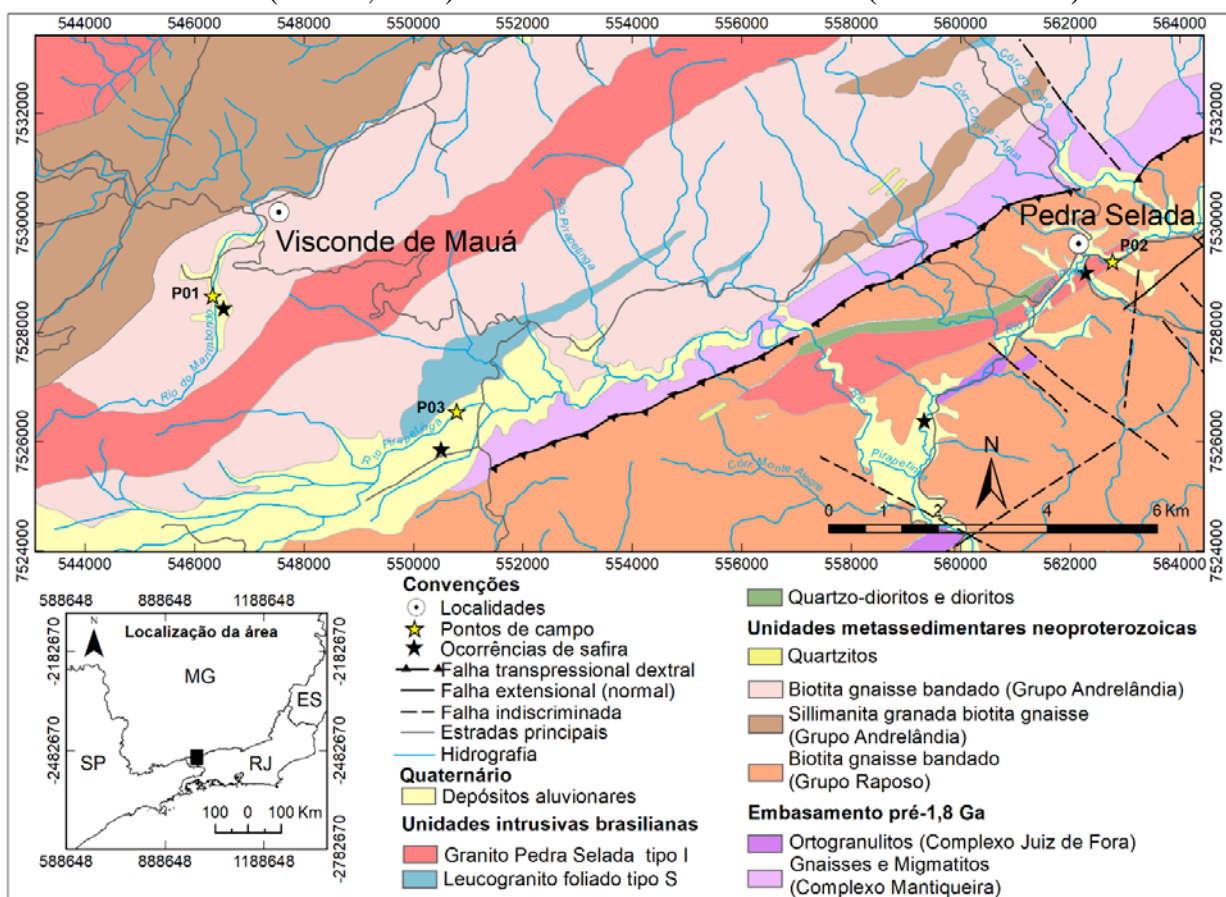


**Figura 2** - Mapa tectônico do sudeste brasileiro com as principais unidades do setor central do Sistema Orogênico Mantiqueira. A área de estudo está indicada pelo polígono vermelho. (1) Bacia do Paraná e sedimentos cenozóicos; (2) Rochas alcalinas do Cretáceo e Terciário; Orógeno Brasília: (3) nappes inferiores, (4) nappes superiores; Cráton do São Francisco (CSF): (5) embasamento, (6) Supergrupo São Francisco, (7) rochas metassedimentares do Domínio Autóctone; Orógeno Ribeira: (8) e (9) Terreno Ocidental (Domínios Andrelândia e Juiz de Fora), (10) Terreno Paraíba do Sul, (11) Terreno Oriental incluindo (12) arco magmático Rio Negro, (13) Terreno Cabo Frio, (14) Terreno Embu; (15) Orógeno Apiaí (Terreno São Roque). LTC – Limite Tectônico Central da Faixa Ribeira. Fonte: adaptado de Heilbron et al. (2004) e CPRM (2007).

O Terreno Ocidental, conforme redefinido em CPRM (2016), engloba dois domínios estruturais: i) Domínio Inferior, composto principalmente pela associação do embasamento pré-1,8 Ga (Complexo Mantiqueira) e pela associação neoproterozoica metassedimentar do Grupo Andrelândia; e ii) Domínio Superior, composto pela associação do embasamento paleoproterozoico (Complexo Juiz de Fora) intercalado tectonicamente com os metassedimentos neoproterozoicos do Grupo Raposo, mais deformado.

Três fases de deformação metamórficas foram explicitadas através de paragêneses minerais e texturas características (CPRM, 2007): metamor-

fismo M0, somente registrado nas rochas do Complexo Juiz de Fora, nas quais a paragêneses com ortopiroxênio indica condições de fácies granulito (P entre 4-6 Kb e T de 800 e 895°C) para as condições pico do metamorfismo M0 (Nogueira, 1994; Duarte, 1998); metamorfismo M1, nas rochas de todos os domínios tectônicos do Terreno Ocidental (Heilbron, 1995), com K-feldspato-sillimanita-granada-ortopiroxênio (fácies granulito) no Complexo Juiz de Fora e no Grupo Raposo; e Metamorfismo M2, atribuído à recristalização e/ou crescimento de minerais metamórficos, como ocorre na porção norte do Grupo Andrelândia, onde gerou paragêneses da fácies xisto verde (clorita e biotita).



**Figura 3** – Mapa geológico da porção sul do estado do Rio de Janeiro, com os pontos de ocorrência de safira. Modificado de CPRM (2007, 2016).

### GEOLOGIA LOCAL

Na área estudada, ocorrem seis unidades litoestratigráficas principais (Figura 3), segundo CPRM (2007, 2016): a) Complexo Mantiqueira, constituído predominantemente por gnaisses e migmatitos, aflorantes ao norte da cidade de Resende; b) Complexo Juiz de Fora: ortogramulitos, entre os quais predominam enderbitos, charno enderbitos e charnockitos, que ocorrem como escamas tectônicas limitadas por zonas de cisalhamento (CPRM, 2007); c) Grupo Andre-

lândia: composta por uma unidade basal com gnaisses bandados pelíticos, textura migmatítica com veios e bandas leucossomáticas, intercalações de quartzitos puros a feldspáticos, filitos a xistos cinzentos, biotita filitos a xistos, rochas calcissilicáticas e manganésíferas. A unidade superior compreende granada-biotita gnaisses bandados e pelíticos, ricos em biotita, granada e sillimanita, com abundantes intercalações de rochas manganésíferas, biotita gnaisses bandados,

rochas calcissilicáticas, sillimanita quartzitos, quartzitos puros e granada-plagioclásio gnaiss. Ambas as unidades citadas são cortadas por diques de ortoanfibolitos concordantes; d) Unidade Conservatória (Grupo Raposo): formado por biotita gnaiss bandado com intercalações de quartzitos puros a impuros, sillimanita-granada-biotita gnaiss e lentes de rochas calcissilicáticas, anfibolitos e gonditos. A presença de bandamento migmatítico, com porções leucossomáticas félsicas e melanosomáticas de biotita e granada (+ sillimanita), e

localmente espinélio do tipo hercinita, revela que este pacote sofreu anatexia (CPRM, 2016); e) Granitoides brasileiros do tipo S ou híbridos, de composição monzogranítica, que ocorrem na forma de lentes métricas ou *stocks*; f) Granitoides brasileiros do tipo I, representados por granitos porfiríticos que compreendem suíte cálcio-alcalina de alto-K, metaluminosa a fracamente peraluminosa. Destaca-se o corpo Pedra Selada, com 12 quilômetros de extensão, aflorando como paredões lisos e íngremes na Serra da Mantiqueira.

## METODOLOGIA

Foram definidos três pontos de amostragens de sedimento de leito ativo (Figura 3), coletados no Rio do Marimondo (P01), em aflente do Rio da

Pedra Preta (P02) e no Rio Pirapetinga (P03), com a coleta de 50 litros de material em cada local. A figura 4 exibe as etapas desenvolvidas no trabalho.

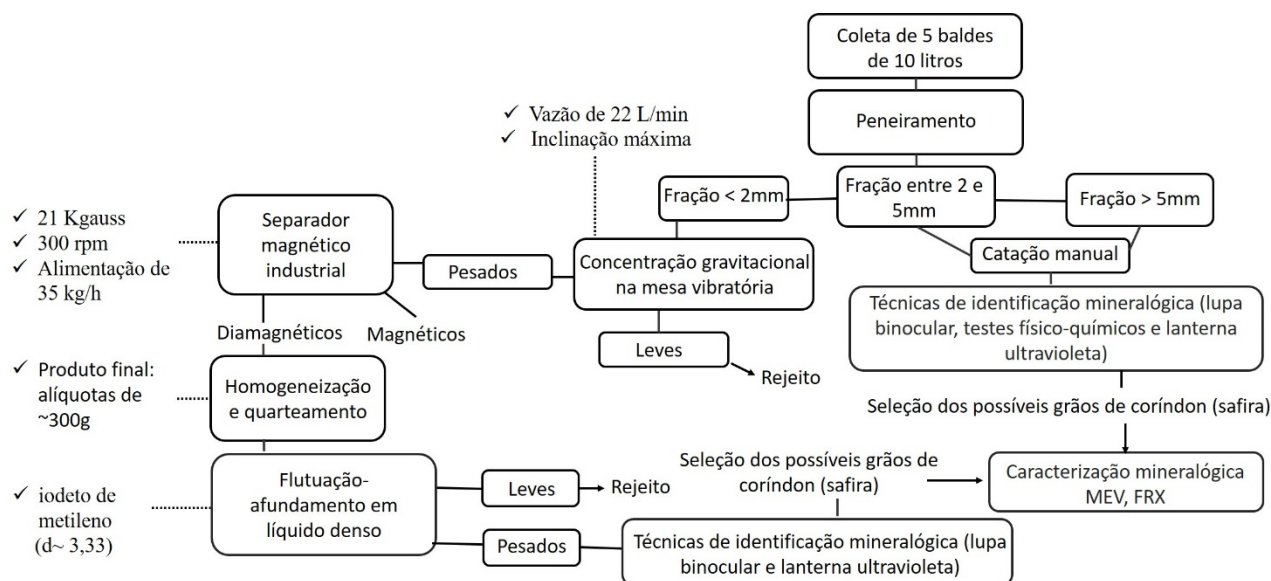


Figura 4 - Fluxograma demonstrativo das etapas desenvolvidas no trabalho.

Para a identificação qualitativa dos grãos de coríndon e de suas inclusões sólidas, foi utilizada a microscopia eletrônica de varredura (MEV) Hitachi Modelo TM3030 Plus, equipado com um sistema de microanálise química por dispersão de energia (EDS) Bruker Quantax. Para a aquisição dos dados de MEV foi utilizado o software Hitachi, versão 2.1. Já para os dados de EDS, o software utilizado foi Quantax, versão 2.1. A infraestrutura utilizada foi do Laboratório Multiusuário de Caracterização Tecnológica (LMCT) do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM).

O espectrômetro de microfluorescência de raios X ( $\mu$ -XRF) utilizado foi o EDAX/Ametek, modelo Orbis PC SDD, com colimação do feixe para uma área de  $30\mu\text{m}$ , através de ótica policapilar. As seguintes condições analíticas de

operação foram utilizadas: 48 kV e 235 uA por 300 segundos. Foram usados filtros para suprimir o ruído e eliminar a linha espectral do ródio. Foi utilizado o *software* ORBIS Vision da EDAX Inc., versão 2.1, para análise semiquantitativa à vácuo, utilizando o método de parâmetros fundamentais, dispensando, portanto, o uso de padrão para o coríndon. Para executar a leitura pelo feixe de raios X, foram escolhidas áreas dos grãos livres de impurezas. A infraestrutura utilizada foi do Laboratório de Pesquisas Gemológicas (LAPEGE) do CETEM. Para plotagem da composição química do coríndon no digrama  $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3$  x  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  (Sutherland et al., 1998) foi utilizado o *software* Excel, versão 2016.

Em um estudo comparativo feito por Sutherland et al. (1998) sobre exemplares de

coríndon na Austrália e no Camboja, foram utilizadas as relações Cr/Ga e Fe/Ti como parâmetro indicativo de possível origem do coríndon, metamórfica ou ígnea. De acordo com os autores, o coríndon de origem ígnea tem uma relação  $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3$  baixa ( $<1$ ), enquanto que os grãos de origem metamórfica têm uma

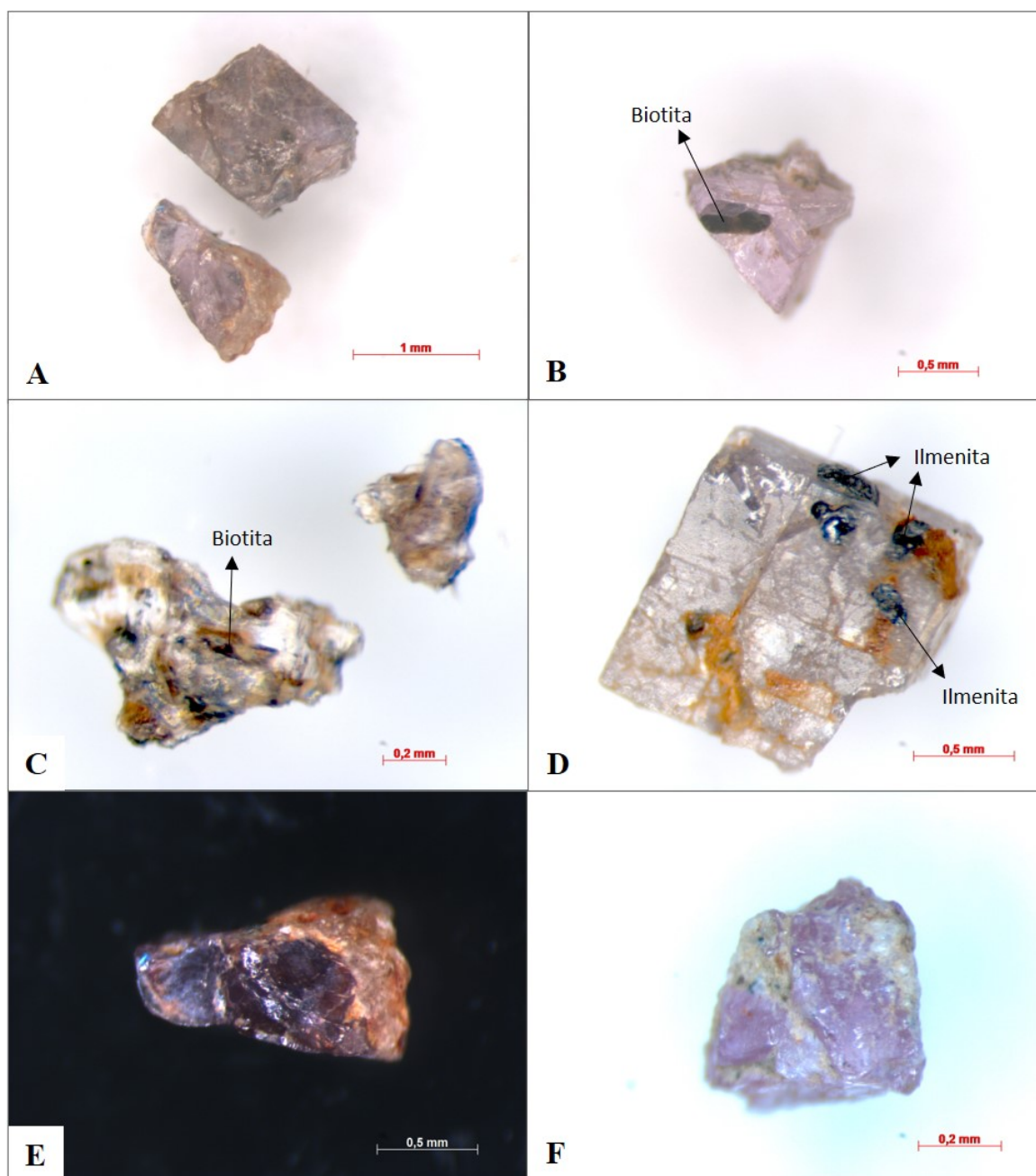
relação alta ( $\geq 1$ ). Para Sutherland et al. (2002), os valores transicionais entre esta divisão magmática/metamórfica podem apontar para processos metassomáticos. Este método tem sido empregado por diversos autores e foi, portanto, escolhido para avaliação do coríndon deste trabalho.

## RESULTADOS

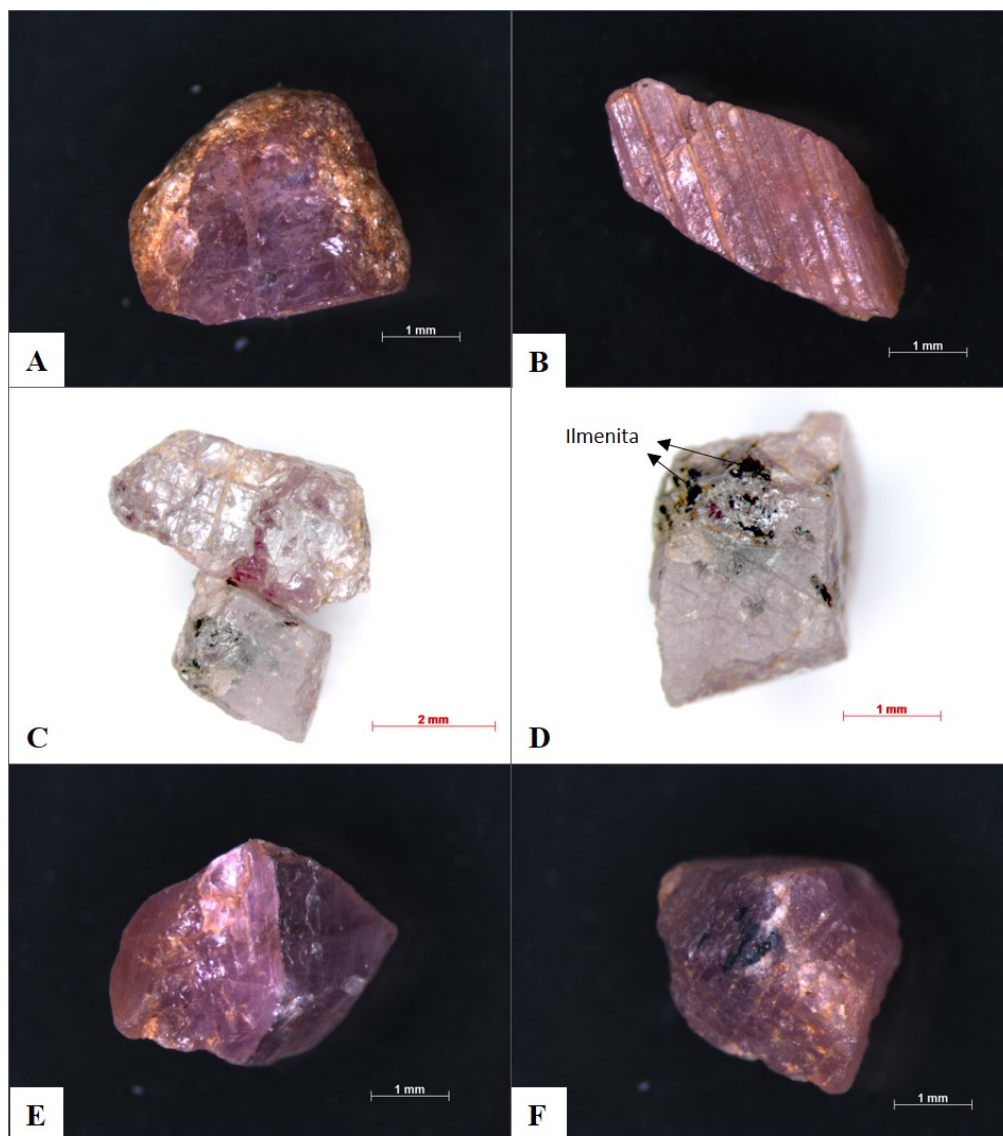
### Características mineralógicas das safiras

Ao todo, foram coletados 24 grãos de coríndon na variedade safira, organizados segundo pontos de coleta e frações granulométricas ( $< 2$

mm – figura 5 - e entre 2 e 5 mm – figura 6), nas cores rosa, amarela, azul-escuro, cinza-azulado, castanho, castanho-avermelhado e incolor.



**Figura 5** – Grãos de coríndon da fração granulométrica fina. (A) Safira de cor castanho, exibindo hábito romboédrico, e safira rosa (abaixo); (B) Safira rosa-violeta com inclusão de biotita; (C) Coríndon anedral incolor com inclusões sólidas de biotita acastanhada; (D) Safira cinza-azulada com estrias de geminação na face superior, paralelas aos planos de partição do mineral, e com inclusões de ilmenita; (E) Safira rosa com borda de alteração intempérica; (F) Safira rosa com formato achatado e de brilho vítreo.



**Figura 6** – Grãos de safira com granulometria entre 2 e 5 mm. (A) Safira rosa de brilho vítreo, com formato achatado e presença de material de alteração recobrendo as bordas do grão. Destaque para as estrias na superfície em duas direções, referentes aos planos de geminação; (B) Safira rosa fragmentado e com brilho adamantino, apresentando estrias na sua superfície; (C) Safira castanho-avermelhada, com estrias na face superior, correspondentes às lamelas de geminação romboédrica; e safira cinza-azulada, de brilho vítreo; (D) Safira cinza-azulada com inclusão de ilmenita; (E) Safira rosa com zoneamento de cor, possivelmente associado a um plano de geminação do cristal. Observam-se fraturas e irregularidades, preenchidas por material de alteração; (F) Safira com hábito romboédrico (romboedro negativo), com estrias em suas faces.

Os grãos de safira encontrados nos concentrados de pesados < 2 mm apresentaram formato achatado, angulosos a subarredondados, transparentes a translúcidos e com brilho vítreo. Foram encontrados grãos em diversas cores, tais quais rosa, rosa-violeta, amarelo, castanho, cinza-azulado e incolor, sendo que alguns apresentaram zonas amareladas de alteração intempélica (Figuras 5A, 5E e 5F). Embora a maioria dos grãos estivessem fraturados, por vezes apresentando fratura conchoidal, e sem hábito definido, alguns apresentaram hábito romboédrico característico do coríndon, exibindo planos de partição em duas direções e estrias em suas faces, correspondentes às lamelas de geminação

polissintética ao longo dos planos romboédricos do cristal. Foram identificadas inclusões sólidas de biotita (Figura 5B) e ilmenita (Figura 5D).

Na fração entre 2 e 5 mm os grãos encontrados exibem as cores rosa, azul-escuro, cinza-azulado e castanho-avermelhado, com brilho vítreo (Figura 6A) a adamantino (Figura 6C). No geral, essas safiras são semelhantes às < 2 mm, com alguns exemplares de hábito romboédrico típico (Figura 6F), por vezes exibindo fraturas e estrias em suas faces (Figura 6C), correspondentes às lamelas de geminação do cristal, e zoneamento de cor devido à variação composicional (Figura 6E). Inclusões sólidas de ilmenita foram encontradas em safira cinza-azulada (Figura 6D).

## Microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de raios X por dispersão em energia (MEV-EDS)

Os 24 grãos de coríndon encontrados foram confirmados pelas análises de MEV/EDS, que também identificaram inclusões sólidas de ilmenita e biotita (Figura 7). A composição

química das inclusões de biotita, encontradas nos três pontos de coleta, revelou presença de O, Si, Al, Fe, Mg, K e Ti. As inclusões de ilmenita foram encontradas em grãos de coríndon de cor cinza-azulada (pontos P01 e P03) e apresentaram O, Fe, Ti, Mn e quantidades reduzidas de Al e Si.

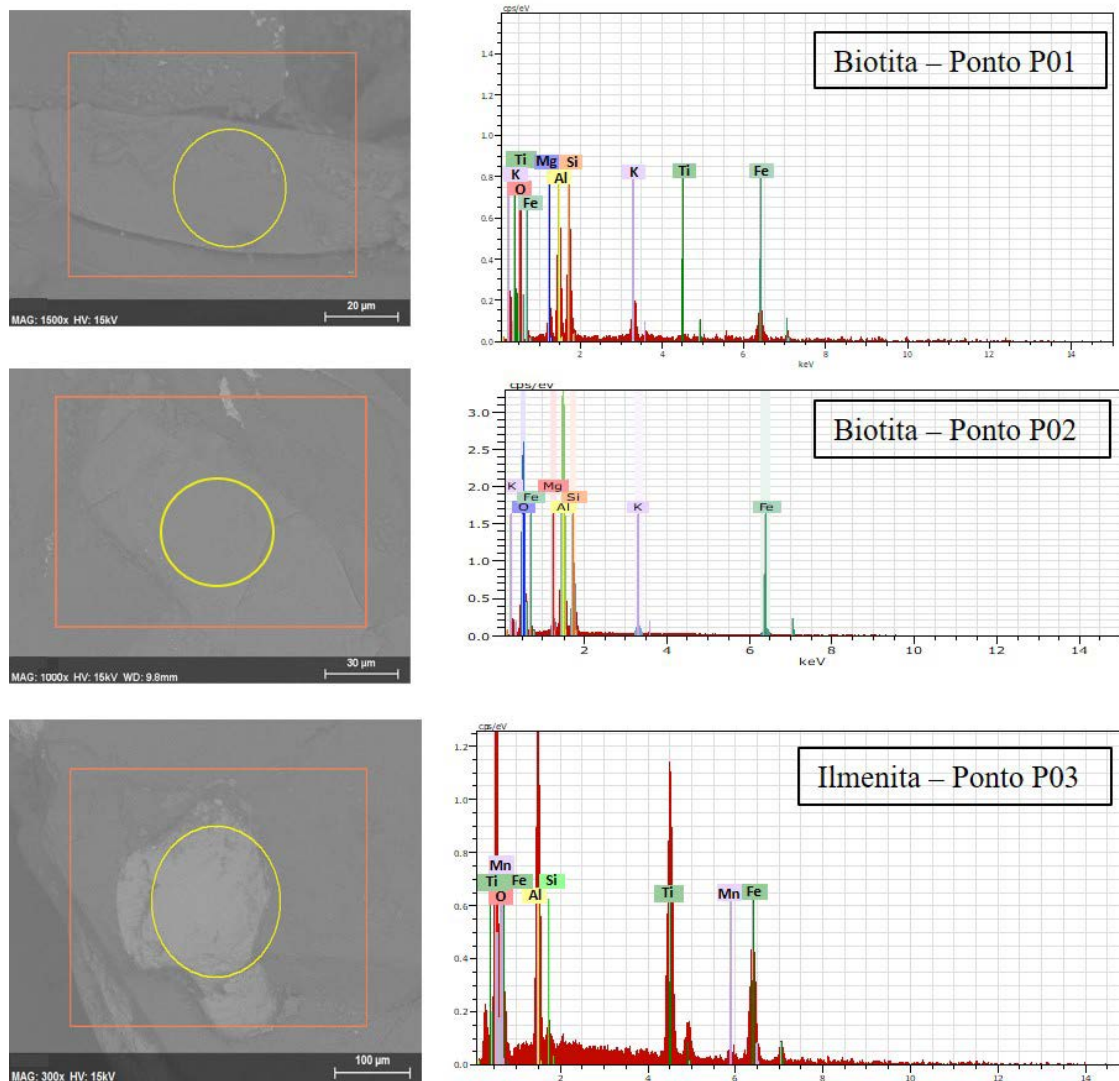


Figura 7 – Imagens de EDS das inclusões selecionadas dos grãos de coríndon.

## Microfluorescência de raios X

As análises químicas quantitativas por espectrômetro de microfluorescência de raios X forneceram dados sobre a composição das safiras (Tabela 1). As análises de  $\mu$ -XRF permitem observar que os principais elementos menores encontrados nos grãos de coríndon são silício, titânio, cromo e ferro.

Os valores elevados dos elementos Fe, Ti e Cr sugerem maior influência sobre a coloração dos grãos, embora apenas teores não sejam suficientes para discriminar elementos cromóforos. Adicionalmente, o V apresentou valores mais elevados nos grãos coletados na amostra P03, enquanto os maiores teores de Ga foram

encontrados no ponto P01.

As safiras apresentam, no geral, teores de Fe bem elevado (entre 0,222 e 0,868wt.%), sendo os maiores valores encontrados nas safiras amarelas e nos grãos incolores. As variedades de safira rosa-violeta, por sua vez, têm uma contribuição diferenciada dos teores de Fe e Ti em relação às safiras rosa.

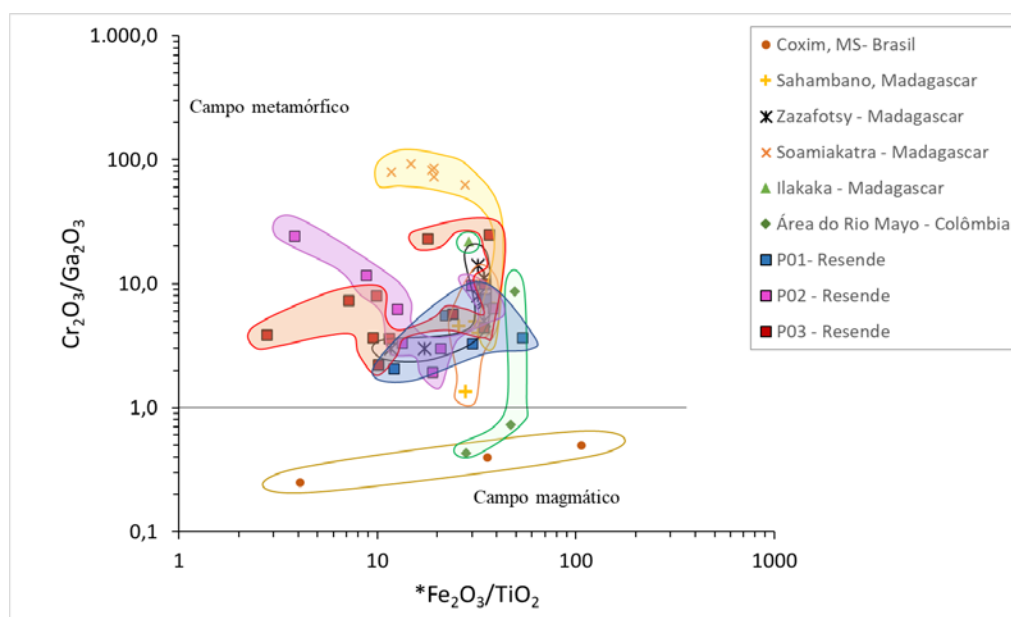
A fim de avaliar a origem genética do coríndon, com base na metodologia empregada por Sutherland et al. (1998), foi gerado um gráfico da variação química dos elementos-traço de coríndon coletados, de acordo com a classificação quanto à origem metamórfica ou ígnea (Figura 8).



**Tabela 1** - Relação entre a composição química das safiras de Resende (em wt.%) e suas respectivas cores.

Grãos	Cor	Porcentagem em peso de óxidos (em wt.%)									Total (%)
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	*Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
<b>P01</b>											
01a	Rosa	98,981	0,477	0,019	0,008	0,012	0,006	0,105	0,360	0,032	100,000
01b	Castanho-avermelhado	98,725	0,720	0,006	0,006	0,011	0,007	0,121	0,388	0,016	100,000
01c	Cinza-azulado	98,969	0,627	0,008	0,009	0,020	0,013	0,076	0,241	0,037	100,000
01d	Rosa	98,618	0,886	0,008	0,019	0,015	0,006	0,100	0,330	0,018	100,000
01e	Rosa	98,776	0,811	0,008	0,006	0,005	0,005	0,096	0,268	0,026	100,001
01f	Rosa-violeta	98,829	0,654	0,012	0,013	0,009	0,007	0,114	0,344	0,018	100,000
<b>P02</b>											
02a	Cinza-azulado	99,272	0,377	N.A.	0,007	0,019	0,007	0,050	0,253	0,015	100,000
02b	Rosa	98,638	0,762	N.A.	0,014	0,015	0,006	0,106	0,447	0,011	99,999
02c	<sup>1</sup> Incolor	96,619	2,301	0,237	N.A.	0,051	0,011	0,118	0,644	0,019	100,000
02d	Amarelo	96,061	2,950	0,061	0,019	0,083	0,006	0,082	0,730	0,007	99,999
02e	Rosa	97,320	2,175	0,012	0,036	0,020	0,015	0,029	0,377	0,015	99,999
02f	Castanho	99,395	0,242	N.A.	0,006	0,058	<LID	0,073	0,222	0,003	99,999
02g	Rosa	99,473	0,243	N.A.	0,004	0,011	0,005	0,027	0,228	0,009	100,000
<b>P03</b>											
03a	Azul-escuro	97,836	1,613	0,021	0,009	0,017	0,002	0,080	0,408	0,014	100,000
03b	Rosa-violeta	98,683	0,833	N.A.	0,044	0,008	0,010	0,125	0,292	0,005	100,000
03c	Amarelo	97,916	1,141	0,029	0,025	0,066	0,006	0,047	0,757	0,013	100,000
03d	Rosa	98,276	1,191	0,011	0,016	0,027	0,026	0,155	0,257	0,042	100,001
03e	<sup>1</sup> Incolor	97,652	1,984	0,010	0,012	0,008	0,010	0,040	0,275	0,009	100,000
03f	<sup>1</sup> Incolor	96,002	2,588	N.A.	0,031	0,025	0,011	0,168	0,868	0,017	99,710
03g	<sup>1</sup> Incolor	92,480	6,105	0,152	0,027	0,305	0,019	0,054	0,844	0,014	100,000
03h	Rosa	98,541	0,883	0,029	0,015	0,021	N.A.	0,116	0,375	0,005	99,985
03i	Castanho	98,907	0,510	N.A.	0,012	0,048	0,014	0,147	0,342	0,020	100,000
03j	Cinza-azulado	99,549	0,118	N.A.	0,005	0,025	0,010	0,029	0,252	0,013	100,001
03k	Rosa	99,444	0,077	N.A.	0,008	0,030	0,009	0,120	0,297	0,015	100,000

Nota: <LID (abaixo do limite inferior de detecção do equipamento). N.A. (não analisado). \*Os valores de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> correspondem ao conteúdo de ferro total. <sup>1</sup>Os campos de cor assinalados representam grãos de safira com muitas inclusões sólidas.



**Figura 8** - Composição química das safiras do RJ (P01, P02 e P03) no diagrama Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> x Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub>, com base em estudo comparativo feito por Sutherland et al. (1998). Os campos geoquímicos reportados de rubis e safiras de origem metamórfica a metamórfica-metassomática dos depósitos de Sahambano, Zazafotsy, Soamiakatra e Ilakaka (Madagascar) são de Rakotondrazafy et al. (2008); o campo geoquímico de safiras provenientes de álcali-basaltos de Coxim, MS, são de Liccardo & Addad (2001); o campo geoquímico de rubis e safiras em campo transicional da área do Rio Mayo, na Colômbia, são baseados em razões de Sutherland et al. (2008).

Os campos geoquímicos das safiras de Resende foram plotados junto aos campos de ocorrências de safira e rubi de outros trabalhos de referência, no Brasil e no mundo. Todos os grãos de safira estão localizados no campo da origem metamórfica, com elevadas razões  $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3$ . Em relação às razões  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ , os grãos do

ponto P02 tenderam a apresentar valores reduzidos em relação aos grãos do ponto P01, provavelmente devido aos maiores teores de  $\text{TiO}_2$  encontrados. Os grãos do ponto P03 mostram valores relativamente bem distribuídos quanto à razão  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ , não apresentando tendências.

## DISCUSSÕES

### Aspectos gerais das ocorrências de coríndon e enquadramento no contexto dos trabalhos prévios na região

O trabalho realizado ao longo de uma faixa de 15 km de extensão no município de Resende (RJ) encontrou grãos de safira de dimensões maiores que os já encontrados na região (Pereira et al., 2003). Os grãos possuem formato achatado, por vezes apresentando hábito romboédrico negativo ou positivo, angulosos a subarredondados, transparentes a translúcidos e de brilho vítreo ou adamantino. A presença de planos de partição em duas direções e estrias nas faces, correspondentes às lamelas de geminação polissintética do cristal, conferem características constantes aos grãos da região. É recorrente as estrias estarem preenchidas por um material amarelado, produto de alteração produzido a partir do coríndon (Sutherland et al., 2008).

No entorno do município de Resende – RJ, outros autores já relataram a presença deste mineral. Em rochas alcalinas de abrangência local, Rosa & Ruberti (2018) apontaram ocorrências de coríndon nas unidades mais insaturadas em sílica e peraluminosas (nefelina sienito) do setor sudeste do Maciço de Itatiaia, RJ. Essas rochas, que localmente intrudem unidades do Complexo Embú, exibem associações ricas em alumínio, com plagioclásio significativo, biotita e muscovita, além de hercinita, coríndon e rutilo. Ocorrências de coríndon em depósitos secundários foram encontradas em Caputira - MG, inseridas em rochas do terreno granulítico e charnockítico do Grupo Juiz de Fora (equivalente ao Complexo Juiz de Fora, em Resende - RJ (Liccardo & Jordt-Evangelista, 2000). No mesmo local, Campos (1999) teria encontrado indícios de uma cristalização sin- a pós-tectônica para cristais do coríndon em fragmentos de rocha com foliação definida pela orientação da mica, indícios que, mais tarde, ganharam força com a plotagem das razões  $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3 \times \text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  desses cristais, que caíram exatamente no campo de origem

metamórfica para o coríndon de Caputira (Liccardo & Hanna Jordt-Evangelista, 2000). Ademais, não há registro de outras ocorrências de coríndon passíveis de associação com rochas locais, embora o ambiente geológico local com presença de ortognaisses e ortogranulitos com metabasitos associados do embasamento (Complexo Juiz de Fora), metassedimentos pelíticos com intercalações de metaultramáficas, calcissilicáticas e anfibolitos (que sofreram metamorfismo de alto grau) sinalizem condições favoráveis à gênese do mineral.

A composição química das safiras de Visconde de Mauá e adjacências no diagrama  $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3 \times \text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ , com base na metodologia de Sutherland et al. (1998), aponta para uma origem metamórfica.

Em relação às ocorrências brasileiras, a presença de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  nas safiras deste trabalho encontra semelhanças composicionais com as safiras provenientes de terrenos granulíticos de Barra Velha, SC (Chodur, 1997), bem como os teores de  $\text{V}_2\text{O}_5$  e  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  se assemelham aos das safiras provenientes do Complexo Granulítico da Província Mantiqueira (Liccardo, 2003).

O estudo das inclusões sólidas (biotita e ilmenita) encontradas em algumas safiras reforçou as tendências quanto ao ambiente de formação metamórfico para estes grãos (Chodur, 1997). Além disso, a tendência de um ambiente enriquecido em alumina se reflete em parte da associação mineral rica em sillimanita, granada e biotita (Grupo Andrelândia e Grupo Raposo), com alto grau metamórfico, confirmado pela paragênese com espinélio (Grupo Raposo), nas rochas metassedimentares neoproterozóicas (CPRM, 2007; 2016).

Os teores de Cr provavelmente foram os responsáveis por conferir coloração rosa a alguns dos grãos. Por sua vez, a cor amarela encontrada em algumas safiras de Visconde de Mauá ocorre provavelmente em virtude dos mais elevados teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (Total) encontrados (0,730% e

0,757%), assim como descrito por Chodur (1997). Nenhuma das amostras apresentaram coloração vermelha típica, nem demais especificações reportadas na literatura para caracterizá-las como rubi (Hughes, 1997; Giuliani et al., 2014).

### Compatibilidade da metodologia de análise química do coríndon

A análise de origem dos grãos de coríndon com base nas razões  $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3 \times \text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  foi realizada no trabalho precursor de Sutherland et al. (1998), bem como nas demais publicações que o sucederam, com uso de técnicas cuja sensibilidade é reconhecidamente mais elevada (e. g. microsonda eletrônica e espectrometria de massa com plasma acoplado indutivamente – ICP-MS). Embora as leituras dos elementos-traços nos grãos de safira deste trabalho tenham sido feitas em um aparelho de microfluorescência de raios X, não foram encontrados impedimentos definitivos para as comparações aqui estabelecidas.

Um dos principais aspectos levados em conta para realização da análise química das safiras foi escolher um método não destrutivo e que possibilitasse a vantagem da determinação de diversos elementos. Métodos espectroscópicos oferecem essa vantagem. Além disso, as pequenas dimensões dos grãos encontrados (0,26 mm a 4,4 mm) também foram um fator complicador, restringindo a escolha da técnica para análise química, já que preparações com pulverização, seção polida ou lâmina delgada inviabilizariam a análise de muitos grãos. A  $\mu$ -XRF, cujas principais vantagens consistem no caráter não destrutivo do método, rápida obtenção dos resultados, obtenção de teores de diversos elementos ao mesmo tempo e a falta de necessidade de preparação da amostra, tornaram essa técnica de natureza espectroscópica vantajosa para o trabalho em questão. Sabe-se que o equipamento de  $\mu$ -FRX Orbis PC SDD da EDAX utilizado possui um detector de sílica (*Silicon Drift Detector* - SDD), fornecendo resolução espectral comparativamente melhor em taxas de transferência significativamente mais altas, em relação ao antigo detector de Si{Li}. A utilização de dois colimadores (1 e 2 mm) e ótica policapilar capaz de produzir um feixe de apenas 30 $\mu$ m permite ao modelo *Orbis* fornecer a mais alta sensibilidade geral em um equipamento com área de medição extremamente pequena. Ele ainda oferece sensibilidade de ppm

a níveis de concentração de 100%. O *software* ORBIS Vision da EDAX Inc., versão 2.1, fez uma análise semiquantitativa com uso do Método de Parâmetros Fundamentais, que dispensa o uso de padrões. Além disso, as energias características das linhas K e L — geralmente as de maior intensidade no espectro de raios X — dos quatro óxidos plotados no gráfico de origem do coríndon não se sobrepõem (Tabela 2).

**Tabela 2** – Comparação entre as energias características das linhas K e L para os elementos de maior expressividade na análise química das safiras (Bruker, 2020).

Elemento	Energias características (keV)			
	K $\alpha_1$	K $\beta_1$	L $\alpha_1$	L $\beta_1$
Ti	4,512	4,933	0,452	0,458
Cr	5,415	5,947	0,572	0,582
Fe	6,405	7,059	0,705	0,718
Ga	9,251	10,267	1,098	1,125
Al	1,486	1,557		
Si	1,74	1,837		

Comparando-se o método de  $\mu$ -XRF com o de microsonda eletrônica (EPMA), que tem sido muito utilizado para determinação da origem por meio das análises de coríndon, sabe-se que há algumas limitações entre eles. A identificação dos picos dos elementos foi feita com extrema cautela, visto que a resolução espectral para o detector de sílica do aparelho de  $\mu$ -XRF utilizado é de 0,1305 keV, enquanto para os detectores de WDS de EPMA geralmente alcançam uma resolução espectral maior, da ordem de 5-30 keV. Este último apresenta maior sensibilidade para os elementos-traços, conseqüentemente a resolução dos picos dos elementos é superior.

Outra limitação é o limite de detecção do método. Embora os limites de detecção da EPMA sejam mais sensíveis a concentrações menores do analito em questão que a  $\mu$ -XRF, as análises deste trabalho fizeram uso de filtros primários, localizados entre os fótons emitidos pelo tubo de raios X e a amostra. Foi utilizado o filtro de Rh, no intuito de filtrar a energia da área do espectro correspondente às linhas de ródio emitidas pelo anodo do tubo e melhorar os limites de detecção dos elementos. Por vezes, o emprego de alguns filtros melhora a detecção cerca de três vezes mais. Comparando-se as análises de elementos-traço deste trabalho com as de outros que empregaram a mesma metodologia com EPMA, não foram encontradas grandes discrepâncias. Para as safiras de Resende, as análises de  $\mu$ -XRF mostraram um

range em porcentagem em peso de óxidos (wt.%) para o  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (0,222 – 0,868), o  $\text{TiO}_2$  (0,005 – 0,305), o  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (0,027 – 0,168), bem como o  $\text{V}_2\text{O}_5$  (0,002 – 0,026) e o  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  (0,003 – 0,042). Sutherland et al. (1998), analisando coríndon em EPMA, obtiveram limites de detecção da ordem de 0,005wt.% para  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  e 0,01wt.% para  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  e  $\text{TiO}_2$ . Por sua vez, Chodur (1997) identificou, em Barra Velha – SC, coríndons de origem metamórfica com análises em EPMA com WDS, com limite de detecção <0,02wt.%. Rakotondrazafy et al. (2008) analisaram coríndons com gêneses diferentes, obtendo limites de detecção para os elementos-traços, em ppm: Mg=34; Ti=22; V=22; Cr=26; Fe=24; Ga=43.

Por fim, verificou-se que no trabalho precursor de Sutherland et al. (1998) também foram feitas algumas análises de coríndons em fluorescência de raios X (EDXRF), complementares às análises de microsonda eletrônica, para identificar a origem dos grãos com base nas razões de elementos-traços. Chodur (1997) também executou algumas leituras em coríndons de origem metamórfica, em Barra Velha -SC, utilizando fluorescência de raios X nos grãos onde as análises por EPMA apresentaram valores muito baixos ou inexistentes. Da mesma forma, em publicação de Liccardo & Jordt-Evangelista (2000), para cinco amostras de coríndon de Indaiá (MG) foram executadas leituras complementares dos elementos-traços Cr, Ga, Fe e Ti por fluorescência de raios X (EDXRF). Estas leituras foram igualmente plotadas em gráfico de razões  $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3 \times \text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ .

#### **Considerações sobre a gênese do coríndon (safira)**

A situação geológica que favorece a formação de safira na área pode ser equiparada com outros locais no Brasil e no mundo. No município de

Resende, apontam-se os gnaisses bandados pelíticos migmatíticos (Grupo Raposo e Grupo Andrelândia), com associação de biotita, granada (+ sillimanita) e localmente espinélio (Grupo Raposo), como os principais alvos para a prospecção de safira na região. Como os sedimentos pelíticos dos Grupos Andrelândia e Raposo e ortognaisses associados do embasamento passaram por processos metamórficos de alto grau em fácies anfibolito superior a granulito, é possível associar as safiras citadas aqui com as ocorrências geradas em outros cinturões granulíticos metassedimentares do Brasil. O contexto geológico e as condições termobarométricas são semelhantes em ambos. Além disso, esse conjunto rochoso encontra-se intrudido por corpos graníticos e pegmatíticos e com presença de zonas de cisalhamento de direções NE-SW e NW-SE, situação favorável à circulação de fluidos. Em Barra Velha, SC (Chodur, 1997) e Indaiá, MG (Liccardo, 2003), a presença de gnaisses pelíticos anfibolíticos e granulíticos de alto grau metamórfico com granada, biotita, cianita e sillimanita, fazem parte, respectivamente, do Complexo Granulítico de Santa Catarina e de parte da Província Mantiqueira, e com registro de safira. Os litotipos associados a esse conjunto rochoso, assim como muitos dos associados aos metassedimentos neoproterozóicos deste trabalho, são mármore, calcissilicáticas, quartzitos, charnockitos, rochas ultramáficas e até alcalinas, favorecendo a associação geoquímica necessária à formação de safira. Da mesma forma, a situação se repete nas formações geológicas semelhantes do Domínio Granulítico Pré-Cambriano, ao sul de Madagascar (Rakotondrazafy et al., 2008), e nos Terrenos Granulíticos do Highland Complex, no Sri Lanka (Dharmaratne et al., 2012).

### **CONCLUSÕES**

O coríndon, na sua variedade safira, da região do município de Resende (RJ), ocorre em depósitos aluvionares distribuídos ao longo da bacia de drenagem do Rio Paraíba do Sul, mais precisamente no Rio do Marimbondo (próximo ao distrito de Visconde de Mauá), em afluentes do Rio da Pedra Preta (no distrito de Pedra Selada) e no Rio Pirapetinga (ao sul de Visconde de Mauá). A safira é encontrada em zonas aplainadas de planícies alúvio-coluvionares em vales encaixados e/ou suspensos, favorecendo a acumulação dos grãos pesados. Foram

encontrados 24 grãos nas cores rosa, amarela, azul-escuro, cinza-azulado, castanho, castanho-avermelhado e incolor.

As técnicas de amostragem e de processamento dos grãos permitiram diferenciar duas frações de material: menores que 2 mm e entre 2 e 5 mm. A análise química mineral por  $\mu$ -XRF exibe razões  $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3$  elevadas ( $\geq 1$ ), típicas de ambiente metamórfico de alto grau, e provavelmente relacionadas aos metassedimentos dos Grupos Andrelândia e Raposo (este último metamorfizado em fácies granulito). A técnica de

MEV/EDS identificou 2 tipos de inclusões: ilmenita e biotita, compatíveis com a caracterização de um ambiente metamórfico para a formação da safira, em fácies granulito.

A geologia da região apresenta metassedimentos neoproterozoicos ricos em alumina, metamorfizados em fácies anfíbolito superior a granulito. A associação deste pacote metassedi-

mentar com ortognaisses/ortogranulitos, além de metabasitos, com intrusões graníticas e pegmatíticas, equipara-se a outros locais no Brasil (Complexo Granulítico de Santa Catarina e Complexo Granulítico da Província Mantiqueira, em Minas Gerais) e no mundo (Terrenos granulíticos do Sri Lanka e de Madagascar), cuja ocorrência de coríndon também foi registrada.

## AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório de Exploração Mineral (LEXMIN) e ao Laboratório Geológico de Processamento de Amostras (LGPA), da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, e ao Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), pelo apoio nas atividades de campo, na infraestrutura e análise laboratorial. Ao pesquisador Dr. Marcelo dos Santos Salomão, do Departamento de Geologia Aplicada da UERJ, pela oportunidade de desenvolvimento desta pesquisa e por todo o incentivo. Aos pesquisadores colaboradores Dr. Luiz Carlos Bertolino e Dr. Jurgen Schnellrath, do Centro de Tecnologia Mineral, pela disponibilização da infraestrutura laboratorial e todo o auxílio prestado. Por fim, ao Dr. Nelson Fernandes, do Departamento de Geografia da UFRJ, por todas as contribuições dadas a esta publicação. Aos avaliadores da Revista Geociências da UNESP, pelas valiosas contribuições e sugestões.

## REFERÊNCIAS

- BRANCO, P. M. **Dicionário de Mineralogia e Gemologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 608p., 2014.
- BRUKER. Handheld / Portable XRF Spectrometry. Disponível em: <https://www.bruker.com/products/x-ray-diffraction-and-elemental-analysis/handheld-xrf.html>. Acessado em: 27nov2020.
- CAMPOS, J.C.S. **Os depósitos de caulim, ametista e coríndon a NW de Manhuaçu (MG): geologia, mineralogia e gênese**. Ouro Preto, 1999. 179p. Dissertação de mestrado - UFOP.
- CHODUR, N.L. **Mineralogia e geologia dos depósitos de rubi e safira da região de Barra Velha, Santa Catarina**. São Paulo, 1997. 225 f. Tese (Doutorado em Geociências) – IG, USP.
- CPRM – COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Geologia da Folha Santa Rita do Jacutinga SF23-Z-A-II**. HEILBRON, M. (Coordenadora). Brasília, Escala 1:100.000, 173 p., 2007. Disponível em: <<http://geosgb.cprm.gov.br/>>. Acessado em: 25mar2020.
- CPRM – COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Geologia e recursos minerais do estado do Rio de Janeiro**. HEILBRON, M.; EIRADO, L.G.; ALMEIDA, J. (Organizadores). Belo Horizonte, Escala 1:400.000, 184 p., 2016. Disponível em: <<http://geosgb.cprm.gov.br/>>. Acessado em: 25mar2020.
- DHARMARATNE, P.G.R.; PREMASIRI, H.M.R.; DILLIMUNI, D. Sapphires from Thammannawa, Kataragama Area, Sri Lanka. **Gems & Gemology**, v. 48, n. 2, 2012.
- DUARTE, B.P. **Evolução tectônica dos ortognaisses dos Complexos Juiz de Fora e Mantiqueira na região de Juiz de Fora, M.G.: Geologia, petrologia e geoquímica**. São Paulo, 1998. 284p. Tese (Doutorado em Geociências) – IG, USP.
- GIULIANI, G.; OHNENSTETTER, D.; FALLICK, A.E.; GROAT, L.; FAGAN, A.J. **The geology and genesis of gem corundum deposits**. In: GROAT, L.A. (Editor), *The geology of gem deposits*. Tucson, AZ: Mineralogical Association of Canada Short Course, v. 44, p. 29-112, 2014.
- HEILBRON, M. **O Segmento Central da Faixa Ribeira: Compartimentação Tectônica e Ensaio Evolutivo**. Rio de Janeiro, 1995. 115 p. Tese de Livre Docência – FGEL, UERJ.
- HEILBRON, M.; PEDROSA-SOARES, A.C.; CAMPOS NETO, M. DA C.; SILVA, L.C. DA; TROUW, R.A.J.; JANASI, V. DE A. **A Província Mantiqueira**. In: MANTESSO-NETO, B.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. DAL R.; BRITO-NEVES, B.B. DE. (Organizadores), *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo: Beca, p. 203-234, 2004.
- HUGHES, R.W. **Ruby and sapphire**. Boulder: RWH publishing, 511p., 1997.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Carta topográfica da Folha Agulhas Negras – SF-23-Z-A-I-4**. [S.l.]: IBGE, 1974. 1. ed. 1 mapa: 58 x 73 cm. Escala: 1:50.000. (Série Carta do Brasil).
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Carta topográfica da Folha Alagoa – SF-23-Z-A-I-2**. [S.l.]: IBGE, 1973. 1. ed. 1 mapa: 58 x 73 cm. Escala: 1:50.000. (Série Carta do Brasil).
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Carta topográfica da Folha Liberdade – SF-23-Z-A-II-1**. [S.l.]: IBGE, 1973. 1. ed. 1 mapa: 58 x 73 cm. Escala: 1:50.000. (Série Carta do Brasil).
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Carta topográfica da Folha Resende – SF-23-Z-A-II-3**. [S.l.]: IBGE, 1973. 1. ed. 1 mapa: 58 x 73 cm. Escala: 1:50.000. (Série Carta do Brasil).
- LICCARDO, A. **Coríndon no Brasil: ocorrências, mineralogia, química e gênese**. Ouro Preto, 2003. 186 p. Tese (Doutorado em Geociências) – DEGEO, UFOP. (Contribuições às Ciências da Terra, série D, vol. 4).
- LICCARDO, A. & ADDAD, J. E. As safiras nos depósitos de diamante aluvionar da região do Rio Coxim, Mato Grosso do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 31, n. 4, p. 635-638, 2001.
- LICCARDO, A. & JORDT-EVANGELISTA, H. Ocorrências de coríndon na porção Leste de Minas Gerais. **Geonomos**, v. 8, n. 1, p. 39-45, 2000.
- NOGUEIRA, J.R. **Relações tectonoestruturais e metamórficas entre metassedimentos e ortognaisses em facies granulito na região à sudoeste de Juiz de Fora, MG**. Rio de Janeiro, 1994. 151 p. Dissertação (Mestrado em Geociências) – IGEO, UFRJ.
- PEREIRA, R.M.; ÁVILA, C.A.; NEUMANN, R. **Novas ocorrências de coríndon (safira) nos estados de Minas Gerais e do Rio de Janeiro**. In: VIII Simpósio de Geologia do

- Sudeste, 2003, São Pedro. Resumos... São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 2003, p. 145.
- RAKOTONDRAZAFY, A.F.M.; GIULIANI, G.; OHNENSTETTER, D.; FALLICK, A.E.; RAKOTOSAMIZANANY, S.; ANDRIAMAMONJY, A.; RALANTOARISON, T.; RAZANATSEHENO, M.; OFFANT, Y.; GARNIER, V.; MALUSKI, H.; DUNAIGRE, C.; SCHWARZ, D.; RATRIMO, V. Gem corundum deposits of Madagascar: A review. **Ore Geology Reviews**, v. 34, p. 134–154, 2008.
- ROSA, P.A.S. & RUBERTI, E. Nepheline syenites to syenites and granitic rocks of the Itatiaia Alkaline Massif, Southeastern Brazil: new geological insights into a migratory ring Complex. **Brazilian Journal of Geology**, v. 48, n. 2, p. 347–372, 2018.
- SIMONET, C.; FRITSCH, E.; LASNIER, B. A classification of gem corundum deposits aimed towards gem exploration. **Ore Geology Reviews**, v. 34, p. 127–133, 2008.
- SUTHERLAND, F.L.; DUROC-DANNER, J.M.; MEFFRE, S. Age and origin of gem corundum and zircon megacrysts from the Mercaderes - Rio Mayo area, South-west Colombia, South America. **Ore Geology Reviews**, v. 34, p. 155–168, 2008.
- SUTHERLAND, F.L.; GRAHAM, I.T.; POGSON, R.E.; SCHWARZ, D.; WEBB, G.B.; COENRAADS, R.R.; FANNING, C.M.; HOLLIS, J.D.; ALLEN, T.C. The Tumbarumba basaltic gem field, New South Wales: in relation to sapphire–ruby deposits of eastern Australia. **Records of the Australian Museum**, 54, p. 215–248, 2002.
- SUTHERLAND, F.L.; HOSKIN, P.W.O.; FANNING, C.M.; COENRAADS, R.R. Models of corundum origin from alkali basalt terrains: a reappraisal. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, v. 133, p. 356–372, 1998.
- TUPINAMBÁ, M.A.; HEILBRON, M.; DUARTE, B.P.; NOGUEIRA, J.R.; VALLADARES, C.; ALMEIDA, J.; SILVA, L.G. DO E.; MEDEIROS, S.R. DE; ALMEIDA, C.G. DE; MIRANDA, A.; RAGATKY, C.D.; MENDES, J.; LUDKA, I. Geologia da Faixa Ribeira Setentrional: estado da arte e conexões com a Faixa Araçuaí. **Geonomos**, v. 15, n. 1, p. 67–79, 2007.

*Submetido em 1º de abril de 2020*

*Aceito para publicação em 8 de dezembro de 2020*