

# Evento colisional e eventos térmicos proterozóicos registados pela monazite inclusa em corindo da região de Itaguara (Cratão São Francisco meridional, Brasil)

## Collisional event and thermal events of Proterozoic age recorded by monazite included in corundum from Itaguara (southern São Francisco Craton, Brazil)

A. O. Chaves<sup>1\*</sup>, A. C. O. M. Dutra<sup>1</sup>

Recebido em 16/01/2020 / Aceite em 08/08/2020

Publicado online em outubro de 2020

© 2020 LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia IP

Artigo original  
Original article

**Resumo:** Inclusions of monazite crystals in corundum occur, in the southern sector of São Francisco Craton (Brasil), in the region of Itaguara, in the contact between gneisses and metultramafic rocks involved in the collisional tectonics of the Paleoproterozoic Transamazonian event. Different internal compositional domains of these monazite crystals were generated during regional thermal events along the Paleoproterozoic. U-Th-Pb geochronological method using electron microprobe reveals seven major distinct ages for these domains:  $2126 \pm 97$  Ma,  $1750 \pm 78$  Ma,  $1495 \pm 40$  Ma,  $1415 \pm 41$  Ma,  $1200 \pm 70$  Ma,  $1071 \pm 26$  Ma and  $932 \pm 77$  Ma. The oldest age is interpreted as the monazite crystallization age and, consequently, of the corundum itself, which has been formed during the mentioned regional collisional tectonics. The other six ages coincide with the ages of several regional thermal events described in the literature, which are generally related to the activity of mantle plumes.

**Palavras-chave:** Monazite in corundum, collision, thermal events, mantle plumes, São Francisco-Congo Craton.

**Abstract:** Inclusions of monazite crystals in corundum occur in the southern sector of the São Francisco Craton (Brazil) in the region of Itaguara, in the contact between metultramafic rocks and gneisses involved in the collisional tectonics of the Paleoproterozoic Transamazonian event. Different internal compositional domains of these monazite crystals were generated during regional thermal events along the Paleoproterozoic. The U-Th-Pb geochronological method using electron microprobe reveals seven major distinct ages for these domains:  $2126 \pm 97$  Ma,  $1750 \pm 78$  Ma,  $1495 \pm 40$  Ma,  $1415 \pm 41$  Ma,  $1200 \pm 70$  Ma,  $1071 \pm 26$  Ma and  $932 \pm 77$  Ma. The oldest age is interpreted as the monazite crystallization age and, consequently, of the corundum itself, which has been formed during the mentioned regional collisional tectonics. The other six ages coincide with the ages of several regional thermal events described in the literature, which are generally related to the activity of mantle plumes.

**Keywords:** Monazite in corundum, collision, thermal events, mantle plumes, São Francisco-Congo Craton.

### 1. Introduction

A monazite é um fosfato monoclinico de composição principal [(ETR)PO<sub>4</sub>] que se destaca pela presença de elementos como os terras-raras (ETR) leves (Parrish, 1990). Linthout (2007) demonstra a existência de uma série isomorfa entre a monazite [ETR(PO<sub>4</sub>)], a cheralite [Ca,Th(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>] e a huttonite [2ThSiO<sub>4</sub>], na qual pode ocorrer tanto a substituição cheralítica, expressa pela equação:  $\text{Ca}^{2+} + \text{Th}^{4+} \leftrightarrow 2\text{ETR}^{3+}$ , quanto a substituição huttonítica, descrita por  $\text{P}^{5+} + \text{ETR}^{3+} \leftrightarrow \text{Si}^{4+} + \text{Th}^{4+}$ . Ademais, há o xenótimo (YPO<sub>4</sub>), que faz solução sólida com a monazite através da troca de ETR leves por Y e ETR pesados (Mogilevsky, 2007). Nota-se na monazite quantidade considerável de Th, U e Pb, sendo o Pb originado principalmente pelo decaimento radioativo do Th e U, e não incorporado durante os processos de cristalização da monazite (Parrish, 1990), o que torna viável a datação química U-Th-Pb deste mineral. Cristais de monazite tipicamente contêm domínios composicionais distintos e a microsonda eletrônica pode ser usada para caracterizar a geometria destes domínios, analisar a composição de cada domínio e determinar a idade química U-Th-Pb (equiparável à idade obtida por métodos isotópicos) para domínios individuais tão pequenos como 5 µm de largura (Williams *et al.*, 2007). Tanto a homogeneização de domínios composicionais quanto a perda de Pb pós-cristalização da monazite como resultado de difusão iônica foram experimentalmente demonstrados insignificantes em temperaturas abaixo de 800 °C (considerada a temperatura de fechamento do sistema U-Th-Pb na monazite), o que explica porque distintos domínios composicionais e cronológicos sobrevivem após a superimposição de eventos mais jovens de temperaturas inferiores a 800 °C (Gardés *et al.*, 2006).

Na área de estudo localizada no setor sul do Cratão São Francisco (CSF) e apresentada a seguir, a monazite encontra-se como inclusões em cristais de corindo [Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – óxido de alumínio], um mineral que blindava e previne a monazite de ser atacada por eventuais fluidos hidrotermais e cuja condutividade térmica diminui quando submetido a altas temperaturas (Shakhtin *et al.*, 1982), conforme o gráfico apresentado na figura 1.

<sup>1</sup> Centro de Pesquisas Manoel Teixeira da Costa - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais. Av. Antonio Carlos, 6627, 31270-901 Belo Horizonte – MG, Brasil.

\*Corresponding author/Autor correspondente: alochaves@yahoo.com.br

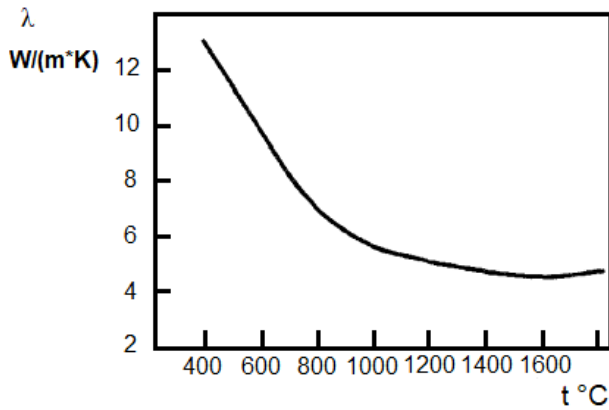


Figura 1. Gráfico da condutividade térmica  $\lambda$  (W / m.K) do corindo em função da temperatura ( $^{\circ}$ C) (Modificado de Shakhtin *et al.*, 1982).

Figure 1. Graph of corundum thermal conductivity (W / m.K) corresponding to the temperature function ( $^{\circ}$ C) (Modified from Shakhtin *et al.*, 1982).

Desta forma, estima-se que o calor proveniente de eventos térmicos seja absorvido pelos cristais de corindo sendo, porém, transmitido para os demais minerais da rocha de maneira lenta e gradual, ficando armazenado em seu interior por tempo suficiente para gerar diferentes domínios composicionais na monazite nele inclusa.

Plumas mantélicas, responsáveis pela geração de províncias ígneas gigantes (LIP – *large igneous provinces*), quando ancoradas na litosfera têm sua área de influência termal correspondente a um círculo que alcança por volta de 5000 km em diâmetro (Ernst, 2014). O objetivo do presente estudo é datar não apenas a idade do corindo como também eventos térmicos disparados pela atividade de distintas plumas mantélicas ao longo do tempo geológico, os quais teriam ficado guardados em domínios composicionais individualizados em cristais de monazite inclusos em corindo do CSF.

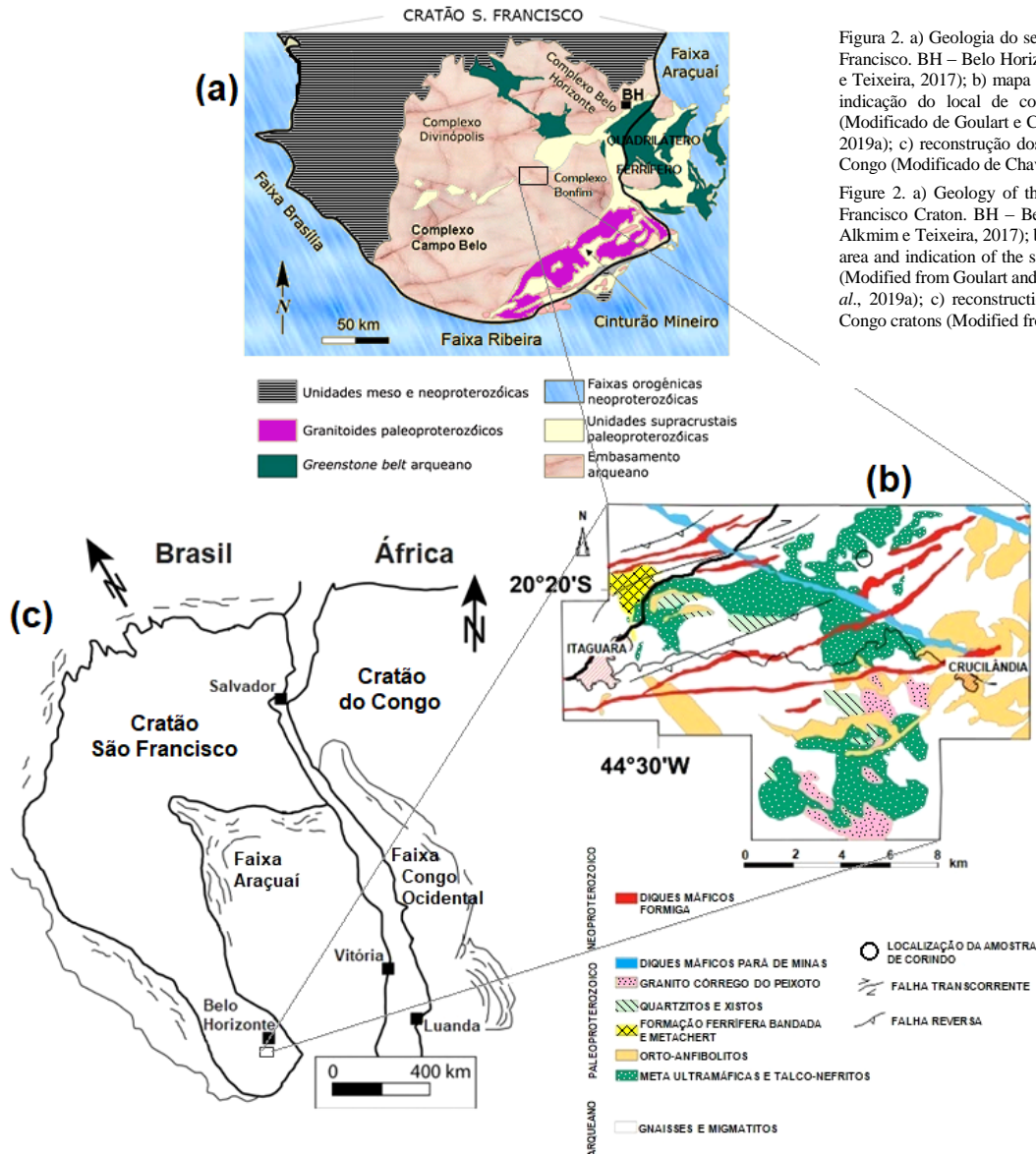


Figura 2. a) Geologia do setor meridional do Cratão São Francisco. BH – Belo Horizonte (modificado de Alkmim e Teixeira, 2017); b) mapa geológico da área de estudo e indicação do local de coleta da amostra de corindo (Modificado de Goulart e Carneiro, 2008 e Chaves *et al.*, 2019a); c) reconstrução dos Cratões São Francisco e do Congo (Modificado de Chaves *et al.*, 2019b).

Figure 2. a) Geology of the southern sector of the São Francisco Craton. BH – Belo Horizonte (modified from Alkmim e Teixeira, 2017); b) geological map of the study area and indication of the sampling site of the corundum (Modified from Goulart and Carneiro, 2008 and Chaves *et al.*, 2019a); c) reconstruction of the São Francisco and Congo cratons (Modified from Chaves *et al.*, 2019b).

## 2. Geologia da Área de Estudo

A área de estudo está localizada na parte sul do Cratão São Francisco (CSF), conforme mostra a figura 2a, mais precisamente entre as cidades de Itaguara e Crucilândia, Minas Gerais, Brasil (Fig. 2b). O CSF se consolidou no final do Paleoproterozóico (Almeida *et al.*, 1981). A parte sul do CSF, delimitada por cinturões orogênicos neoproterozóicos, consiste em um núcleo arqueano (3200 – 2600 Ma) composto principalmente de terrenos granito-gnáissico-migmatíticos (Complexos Belo Horizonte, Campo Belo/Bonfim e Divinópolis) e sequências metavulcano-sedimentares (*greenstone-belts*) do Supergrupo Rio das Velhas, que incluem associações de protólitos máficos a ultramáficos, de vulcânicas félsicas, de rochas vulcanoclásticas e sedimentos clásticos (Baltazar e Zucchetti, 2007). Há ainda rochas supracrustais do Supergrupo Minas, compreendendo tipos metassedimentares clásticos e químicos, incluindo as formações ferríferas bandadas do famoso distrito de mineração Quadrilátero Ferrífero, com idade mínima de deposição de 2000 Ma (Machado *et al.*, 1996; Alkmim e Teixeira, 2017). Em termos regionais, há ainda o Cinturão Mineiro no extremo da borda SE do CSF (Fig. 2a), marcador de eventos paleoproterozóicos de natureza acrecionária (Alkmim e Teixeira, 2017). O cenário tectônico proposto por Chaves *et al.* (2019a) para a região mostrada na figura 2b indica a existência de um prisma acrecionário paleoproterozóico marcador de uma zona de paleosubdução local, o que corresponderia a um dos primeiros registros do processo de subdução seguido por colisão continental no mundo. Esta subdução é corroborada pelo retroeclogito encontrado na área por Chaves e Porcher (2020).

É importante ressaltar a relação existente entre o Cratão São Francisco e o Cratão do Congo, os quais foram unidos por processos tectônicos colisionais entre 2100 Ma e 2070 Ma (Aguilar *et al.*, 2017), de acordo com a reconstrução mostrada na figura 2c, e assim integraram os supercontinentes Columbia, Rodínia e Pangea, até serem separados pela abertura do oceano atlântico em 130 Ma (Ernst *et al.*, 2013). Destacam-se na região dos Cratões São Francisco e do Congo a intrusão dos diques máficos Pará de Minas (Fig. 2b), cuja datação U-Pb indicou idades de 1800 Ma a 1710 Ma (Cederberg *et al.*, 2016), eventos de magmatismo máfico em Angola (África) datados em 1505 Ma, 1380 Ma e 1110 Ma (Ernst *et al.*, 2013), o registro de zircons detriticos de 1186 Ma na faixa móvel Araçuaí, a formação da província ígnea gigante (LIP – *large igneous province*) Bahia-Gangila na junção dos Cratões São Francisco e do Congo, com idade de 925-900 Ma (Chaves *et al.*, 2019b), da qual fazem parte os diques Formiga mostrados na figura 2b, além dos eventos tectônicos Transamazônico e Brasileiro, cujos picos de atividade foram datados em 2070 Ma e 530 Ma, respectivamente (Machado e Noce, 1993).

As amostras de corindo usadas no presente artigo foram coletadas na região demarcada por um círculo preto na figura 2b, no contacto entre rocha metaultramáfica e gnaiss félsico, envolvendo respectivamente uma rocha deficiente em sílica e uma rocha rica em sílica e alumina. Simonet *et al.* (2008) argumentam que, neste tipo de situação geológica, o gnaiss sofre perda de sílica (SiO<sub>2</sub>), e a alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), que é menos móvel, permanece no protólito félsico, se recristalizando como corindo e fuchsite, minerais que foram encontrados na rocha do referido contacto (Fig. 3a). Stern *et al.* (2013) demonstram que mundialmente o corindo está frequentemente associado a zonas de colisão continental e se forma devido a reações metassomáticas entre rochas ricas em aluminossilicatos (granitóides, gnaisses, migmatitos) e rochas pobres em sílica (ultramáficas, carbonatos, evaporito, xisto). Ao redor dos cristais de corindo de cor roxa

(variedade safira – por não ser vermelho, que é a cor que identifica a variedade rubi – Stern *et al.* 2013), notam-se bordas de alteração bege na rocha esverdeada rica em fuchsite, possivelmente provocadas por sucessivas perdas lentas de calor a partir do corindo (Fig. 3a).

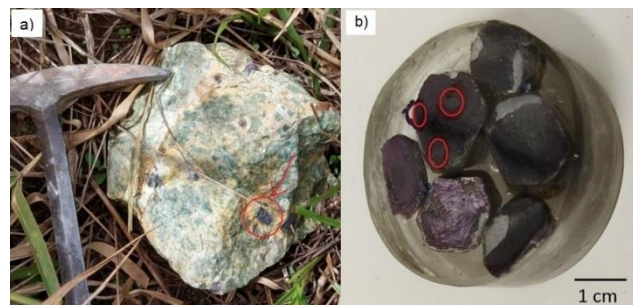


Figura 3. a) Amostra da zona de contacto entre gnaiss e rocha metaultramáfica, mostrando cristais de corindo de cor roxa (um deles em destaque no círculo vermelho indicado pela seta); b) bloco de resina com corindon usado na análise por microsonda eletrônica. Círculos vermelhos marcam a posição dos cristais de monazite inclusos no corindo.

Figure 3. a) Field sample showing purple corundum crystals (one of them highlighted in the red circle indicated by the arrow); b) corundum resin block used in electron microprobe analysis. Red circles mark the position of the monazite crystals included in the corundum.

## 3. Materiais e Métodos

Três cristais de monazite (com dimensões entre 20 e 40 micrômetros) foram analisados, todos inclusos no mesmo cristal de corindo (cristal alongado que alcança 4 cm na maior dimensão) retirado da amostra de rocha ilustrada na figura 3a. Foi necessária a montagem dos fragmentos deste cristal de corindo em um bloco de resina, que foi desbastado e polido para se obter uma superfície ideal para imageamento e realização das análises químicas por microsonda eletrônica. A figura 3b ilustra o bloco de resina com corindo, com o local das inclusões monazíticas ressaltado por círculos vermelhos.

Imagens de elétrons retro-difundidos e mapas composicionais de Y dos três cristais de monazite foram obtidos no Laboratório de Microanálises (LMA) do Centro de Microscopia (CM) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), utilizando uma microsonda JEOL, modelo JXA-8900. As composições químicas das monazites analisadas foram obtidas na mesma microsonda através do método de espectrometria por dispersão de comprimento de onda (WDS). Nos cristais 1 e 3, foram escolhidos 10 pontos para análise da monazite, enquanto para o cristal 2 foram 8 pontos. Os parâmetros e padrões analíticos empregados seguem os procedimentos descritos por Chaves *et al.* (2013) e estão apresentados na tabela 1.

Foi realizado ainda o seguinte ajuste para urânio,  $U_{\text{corrigido}} = U_{\text{medido}} - (0,006365 \times Th_{\text{medido}})$ , baseado em Scherrer *et al.* (2000), para corrigir a interferência do tório M gama sobre urânio M beta. Os demais cálculos de idades U-Th-Pb e respectivos erros foram realizados com o auxílio do *software* EPMA Dating de Pommier *et al.* (2004), que utiliza a fórmula:

$$Pb_{\text{monazite}} = \left[ Th_{\text{monazite}} \left( e^{\lambda_{232} t} - 1 \right) \frac{M_{206}}{M_{232}} \right] + \left[ U_{\text{monazite}} \left( e^{\lambda_{235} t} - 1 \right) \frac{M_{206}}{M_{238}} \times 0,9928 \right] + \left[ U_{\text{monazite}} \left( e^{\lambda_{235} t} - 1 \right) \frac{M_{207}}{M_{235}} \times 0,0072 \right]$$

em que  $t$  é a idade em Ma;  $M_{206}$ ,  $M_{207}$ ,  $M_{208}$ ,  $M_{232}$ ,  $M_{235}$  e  $M_{238}$  são respectivamente as massas atômicas de <sup>206</sup>Pb, <sup>207</sup>Pb, <sup>208</sup>Pb, <sup>232</sup>Th, <sup>235</sup>U, <sup>238</sup>U;  $\lambda_{232} = 0,49475 \times 10^{-4} \text{ Ma}^{-1}$ ;  $\lambda_{238} = 1,55125 \times 10^{-4} \text{ Ma}^{-1}$ ;  $\lambda_{235} = 9,8485 \times 10^{-4} \text{ Ma}^{-1}$ .

Tabela 1. Condições, parâmetros de medidas quantitativas e padrões analíticos usados pela microsonda eletrônica do CM-UFMG (Chaves *et al.*, 2013).

Table 1. Conditions, quantitative measurement parameters and analytical standards used in the CM-UFMG electron microprobe (Chaves *et al.*, 2013).

Método= WDS		Tensão de aceleração = 25kV					
Intensidade da corrente = 50nA		Diâmetro do feixe de elétrons = 2 µm					
Elemento	Raio-X	Cristal	Tempo de contagem (s)		Offsets Background		Padrão Analítico
			Pico	Bg	Bg L	Bg U	
Y	La	TAP	20,0	10,0	1,12	0,84	YAG (Granada de Y e Al)
Dy	Lb	LiF	20,0	10,0	0,84	0,00	DyPO <sub>4</sub>
P	Ka	PETJ	10,0	5,0	0,70	0,70	Monazite
Si	Ka	TAP	10,0	5,0	1,38	0,84	ThSiO <sub>4</sub> (Thorite sintética)
Gd	Lb	LiF	20,0	10,0	0,84	0,98	GdPO <sub>4</sub>
Pb	Mb	PETJ	200,0	100,0	1,64	0,64	Crocoite
Th	Ma	PETJ	20,0	10,0	1,95	0,84	ThSiO <sub>4</sub> (Thorite sintética)
Sm	Lb	LiF	20,0	10,0	0,55	0,53	REE <sub>2</sub>
U	Mb	PETJ	150,0	75,0	0,00	2,00	UO <sub>2</sub> (sintético)
Ca	Ka	PETJ	10,0	5,0	0,84	0,70	Ca <sub>2</sub> P <sub>2</sub> O <sub>7</sub> (apatite sintética)
Nd	Lb	LiF	20,0	10,0	0,84	0,84	NdPO <sub>4</sub>
La	La	PETJ	10,0	5,0	0,84	0,84	Monazite
Pr	Lb	LiF	20,0	10,0	0,84	0,66	PrPO <sub>4</sub>
Ce	La	LiF	10,0	5,0	0,84	1,12	Monazite

#### 4. Resultados

Na figura 4, as imagens de elétrons retro-difundidos dos cristais de monazite revelam porções huttoníticas (H), mais claras devido ao predomínio de Th. Através dos mapas de Y é possível verificar as regiões do cristal de monazite mais ricas em xenótimo (x), onde se percebe concentração maior de Y preferencialmente na borda dos cristais de monazite. Os pontos escolhidos para aplicação do feixe de elétrons da microsonda localizam-se em regiões dos cristais de monazites isentas de huttonites e xenótimos (números vermelhos na figura 4) e a idade em milhões de anos obtida para cada ponto aparece nos números pretos da figura 4. Percebe-se que existe uma tendência das idades mais antigas se concentrarem nas porções mais interiores dos cristais, enquanto as mais novas estão mais próximas das extremidades.

A tabela 2 mostra a composição química para cada um dos pontos analisados pela microsonda eletrônica nos cristais de monazite, sendo M1 o primeiro cristal com 10 pontos, M2 o segundo com 8 pontos e M3, o terceiro também com 10 pontos. Percebem-se variações nas composições, porém os cristais são sempre monazites de cério (Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub> entre 16% e 30%), o principal ETR destas monazites.

A tabela 3 indica as concentrações de U, Th e Pb para cada ponto estudado, com suas respectivas incertezas e a idade com respectivo erro para cada ponto. Nesta tabela, MPb corresponde a massa média do chumbo, obtida de acordo com a metodologia de Pommier *et al.* (2004). Nota-se a grande diferença nos valores de idade, que variam de 2126 ± 97 Ma a 904 ± 38 Ma.

A figura 5 apresenta seis gráficos estatísticos, cada um ilustrando um grupo de idades próximas entre si, sendo suas médias de 1750 ± 78 Ma, 1495 ± 40 Ma, 1415 ± 41 Ma, 1200 ± 70 Ma, 1071 ± 26 Ma e 932 ± 77 Ma. Quando as composições dos domínios internos dos cristais de monazite são lançadas no diagrama triangular 3\*(SiO<sub>2</sub>+ThO<sub>2</sub>); La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 10\*Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,

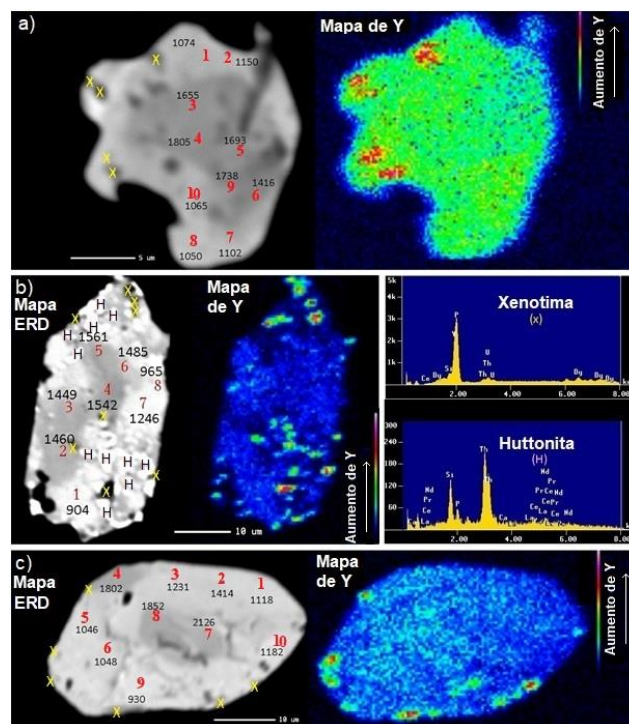


Figura 4. Imagens de elétrons retro-difundidos (ERD) e mapas composicionais de Y obtidos na microsonda para os três cristais de monazite, com a localização dos pontos analisados (números vermelhos), suas idades em milhões de anos (números pretos) e indicações das regiões ricas em xenótimo (x) e huttonite (H). a) M1, cristal de monazite 1; b) M2, cristal de monazite 2 e espectros de energia dispersiva (EDS) por microsonda eletrônica do xenótimo e huttonite; c) M3, monazite cristal 3.

Figure 4. Backscattered electron (BSE) images and compositional Y maps obtained in the microprobe for the three monazite crystals, with the location of the points analyzed (red numbers), their ages in millions of years (black numbers) and indication of regions rich in xenotime (x) and huttonite (H). a) M1, monazite crystal 1; b) M2, monazite crystal 2 and xenotime and huttonite dispersive energy spectra; c) M3, monazite crystal 3.

percebe-se que a variação da composição destes domínios no decorrer do tempo geológico acompanha as alterações das idades médias encontradas para os respectivos domínios desde ~1800 Ma até ~1400 Ma, conforme apontam as setas 1, 2 e 3 da figura 6. A seta 4 desta figura mostra menores variações composicionais a partir de ~1400 Ma até ~900 Ma. A figura 7 apresenta diferenças entre os padrões de ETR leves normalizados ao condrito agrupados de acordo com as idades médias.

#### 5. Discussão

O corindo (óxido de alumínio) é um mineral de baixa condutividade térmica para altas temperaturas (Shakhtin *et al.*, 1982), o que leva a um acúmulo de energia térmica em sua estrutura cristalina, seguido por lenta dissipação da mesma, quando submetido a eventos térmicos regionais. Os valores de idade obtidos nos cristais de monazite sugerem uma possível sequência de eventos térmicos em 1750 ± 78 Ma, 1495 ± 40 Ma, 1415 ± 41 Ma, 1200 ± 70 Ma, 1071 ± 26 Ma e 932 ± 77 Ma que alteraram a química e a estrutura cristalina em diferentes porções dos cristais de monazite, fazendo inclusive com que o Y tenha migrado para as bordas destes cristais.

Segundo Catlos (2013), o claro entendimento da composição da monazite e do ambiente tectônico em que ela se forma é necessário para a correta interpretação das idades obtidas. A idade mais antiga encontrada, de 2126 ± 97 Ma, parece indicar a formação dos cristais de monazite inclusos no corindo e, como consequência, a idade do próprio corindo. Essa idade registra as

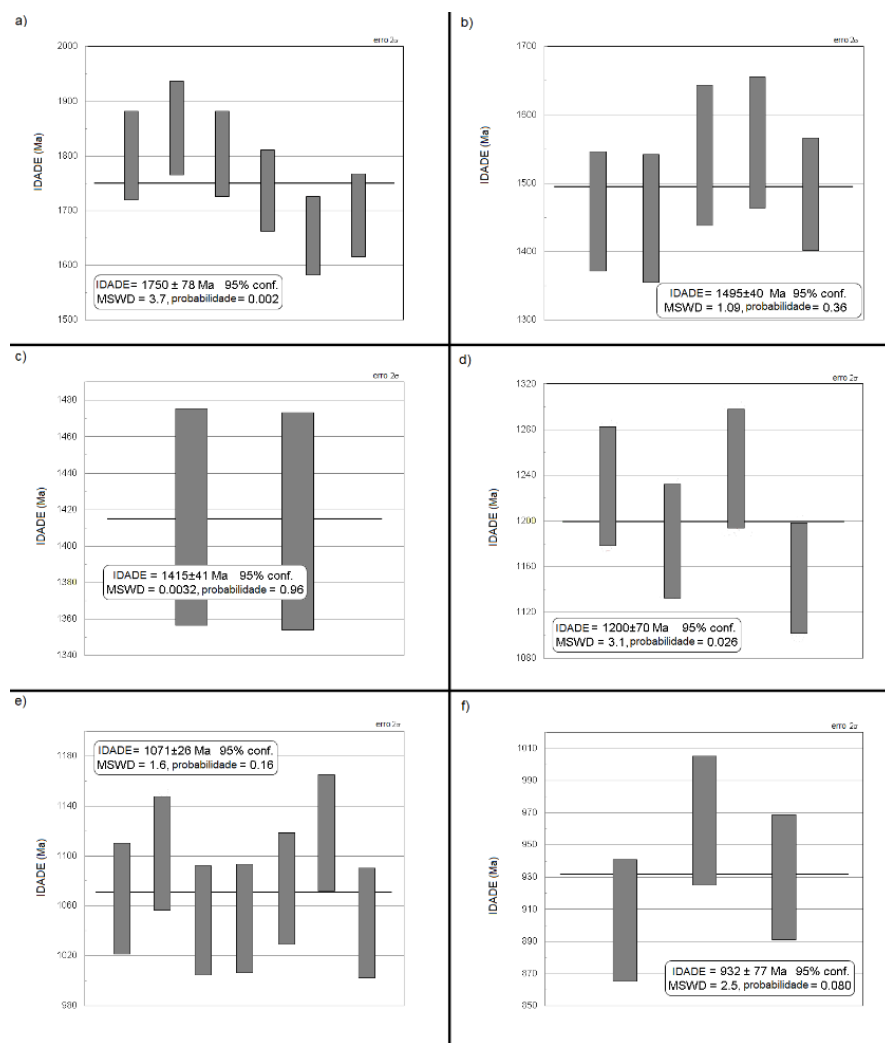


Figura 5. Gráficos com as médias das seis idades encontradas (a) 1750 ± 78 Ma; (b) 1495 ± 40 Ma; (c) 1415 ± 41 Ma; (d) 1200 ± 70 Ma; (e) 1071 ± 26 Ma, (f) 932 ± 77 Ma, obtidas com o programa Isoplot (Ludwig, 2003).

Figure 5. Graphs with the averages of the six ages found. (a). 1750 ± 78 Ma. (b) 1495 ± 40 Ma. (c) 1415 ± 41 Ma. (d). 1200 ± 70 Ma. (e) 1071 ± 26 Ma, (f) 932 ± 77 Ma, obtained by using Isoplot software (Ludwig, 2003).

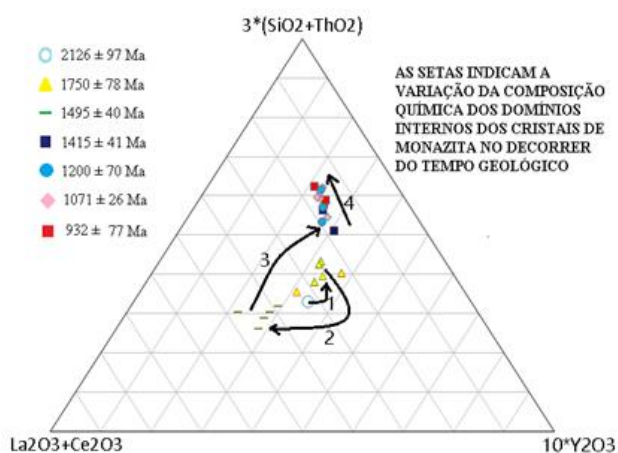


Figura 6. Diagrama triangular 3\*(SiO<sub>2</sub>+ThO<sub>2</sub>); La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 10\*Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e a variação da composição química dos domínios internos dos cristais de monazite no decorrer do tempo geológico.

Figure 6. Triangular diagram 3\*(SiO<sub>2</sub>+ ThO<sub>2</sub>), La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+ Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 10\*Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and the variation in the chemical composition of the internal domains of monazite crystals over geological time.

reações metassomáticas entre o material ultramáfico e o gnaiss, responsáveis pela criação do corindo e, como sugerido por Stern *et al.* (2013), disparadas por processo de colisão continental (Figs. 2 e 3a). Não fica, entretanto, descartada a possibilidade da idade da monazite ser mais antiga, tendo ela sido totalmente recristalizada durante a colisão em que esteve envolvida há ~2100 Ma, sob 17-20 kbar e 600-700 °C (Chaves *et al.* 2019a; Chaves e Porcher, 2020). O processo de subducção (marcado pela presença de prisma acrecionário e retroeclogito) seguido por colisão continental exatamente na área de estudo onde o corindo fora encontrado é descrito por Chaves *et al.* (2019a) e Chaves e Porcher (2020). Aguilar *et al.* (2017) apontam um episódio de metamorfismo sin-colisional regional de 2100 Ma a 2070 Ma, o que corroboraria a idade do corindo em torno dos 2126 ± 97 Ma (dentro do esperado para o pico metamórfico regional) encontrados no núcleo de um dos cristais de monazite investigados.

O enxame de diques conhecido como Pará de Minas que aparece parcialmente na figura 2b, cujas idades variam de 1800 Ma a 1710 Ma (Chaves, 2001; Cederberg *et al.*, 2016), é uma ramificação de uma enorme província ígnea gigante (LIP) conhecida como Avanavero-Xiong'ér (nome Avanavero segundo Reis *et al.* 2013) existente no supercontinente Columbia (Nuna),

Tabela 2. Composição de pontos individuais dos cristais de monazite por microsonda eletrônica. Dados em %.

Table 2. Composition of individual points of monazite crystals by electron microprobe. Data in %.

Ponto de	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	ThO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub>	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	PbO	Total
M1-1	23,61	6,31	19,90	0,37	3,41	4,14	17,70	2,92	14,54	3,93	2,62	0,93	0,26	0,96	101,59
M1-2	23,85	6,51	18,57	0,39	3,43	4,19	18,21	2,97	14,49	3,93	2,68	0,97	0,26	0,97	101,41
M1-3	26,47	4,30	11,27	0,31	3,47	5,57	21,04	3,22	16,36	4,13	2,69	1,08	0,21	0,88	101,00
M1-4	26,67	4,19	11,15	0,32	3,46	5,71	21,79	3,22	16,16	4,27	2,76	1,05	0,20	0,96	101,91
M1-5	26,62	3,90	8,93	0,40	3,38	6,19	22,65	3,35	16,97	4,33	2,70	1,03	0,28	0,76	101,50
M1-6	26,25	5,31	14,35	0,46	3,58	3,86	17,15	3,55	15,27	4,35	2,70	1,00	0,22	0,97	99,00
M1-7	24,55	4,59	18,11	0,47	3,47	4,04	17,98	2,91	15,90	4,46	2,79	0,84	0,25	0,92	101,27
M1-8	23,03	6,06	22,57	0,43	3,18	3,86	16,67	2,64	13,93	3,84	2,62	0,96	0,28	1,07	101,12
M1-9	25,93	4,82	9,49	0,45	3,99	4,05	19,42	3,54	18,81	5,60	3,15	1,12	0,15	0,83	101,36
M1-10	23,88	4,89	20,06	0,46	3,28	3,86	17,80	3,06	15,11	4,17	2,60	1,03	0,27	0,97	101,44
M2-1	23,66	5,90	20,41	0,38	3,11	4,30	18,02	2,77	14,70	4,10	2,61	0,90	0,28	0,82	101,96
M2-2	26,15	2,24	6,82	0,23	2,58	8,97	28,10	3,15	14,40	3,30	2,13	0,71	0,19	0,48	99,43
M2-3	26,85	2,06	6,31	0,17	1,84	10,15	29,13	3,36	14,33	3,03	1,80	0,55	0,22	0,43	100,24
M2-4	28,39	1,80	5,58	0,18	2,43	10,42	28,45	3,10	13,26	3,16	2,15	0,85	0,44	0,41	100,60
M2-5	28,70	1,91	6,32	0,18	2,43	9,49	27,62	3,30	14,29	3,33	2,19	0,82	0,32	0,47	101,37
M2-6	27,82	2,21	7,43	0,27	2,69	8,26	27,03	3,21	14,72	3,71	2,36	0,71	0,21	0,53	101,14
M2-7	24,16	4,80	16,73	0,42	3,34	4,36	19,35	3,23	16,18	4,57	2,74	0,89	0,21	0,96	101,94
M2-8	22,98	5,37	21,52	0,40	3,50	4,07	17,60	2,81	14,25	3,99	2,66	0,80	0,25	0,93	101,12
M3-1	21,52	5,68	20,50	0,35	3,17	3,96	18,22	2,90	14,68	4,00	2,74	0,93	0,19	1,03	99,88
M3-2	22,87	5,30	18,53	0,31	3,33	4,13	18,24	2,81	14,99	3,84	2,71	0,90	0,18	1,18	99,33
M3-3	21,31	5,31	19,28	0,32	3,36	4,18	18,24	2,83	15,34	4,18	2,79	0,99	0,18	1,06	99,36
M3-4	24,07	5,67	8,54	0,34	3,70	6,00	22,17	3,30	16,55	4,54	2,69	0,95	0,17	0,76	99,47
M3-5	21,65	5,28	20,49	0,36	2,99	4,26	18,05	2,83	15,23	4,08	2,66	0,81	0,19	0,96	99,83
M3-6	20,95	5,95	21,69	0,37	3,14	4,27	17,57	3,01	14,52	4,04	2,76	0,81	0,20	1,02	100,29
M3-7	25,55	2,69	7,78	0,22	3,36	6,34	24,62	3,41	16,37	4,11	2,73	1,01	0,16	0,79	99,12
M3-8	25,69	3,28	8,00	0,31	2,97	7,06	24,95	3,25	15,46	3,75	2,38	1,03	0,32	0,73	99,15
M3-9	21,03	5,82	21,89	0,37	2,86	4,11	17,71	2,94	14,95	4,17	2,79	0,74	0,20	0,91	100,49
M3-10	21,88	7,13	20,67	0,37	3,15	3,77	17,31	2,67	14,03	3,98	2,71	1,00	0,19	1,10	99,94

quando dele faziam parte e estavam próximos entre si o Cratão São Francisco-Congo, o Cratão Amazônico e o Cratão do Norte da China (Chaves e Rezende, 2019). A enorme quantidade de calor produzido pela pluma mantélica responsável pela criação da LIP Avanavero-Xiong'er teria influenciado termalmente o corindo investigado e produzido nas suas monazites o registo deste evento de 1750 ± 78 Ma.

Soleiras e diques máficos foram identificados em Angola (Humpata) e no Brasil (norte do CSF), exatamente na região correspondente ao Cratão São Francisco-Congo, cuja datação indica idades de 1502 Ma a 1508 Ma (Ernst *et al.*, 2013).

Possivelmente, estes litótipos são remanescentes de uma LIP que teria influenciado termalmente o corindo investigado e produzido nas suas monazites o registo destes eventos com média de idade de 1495 ± 40 Ma.

Outra possível LIP marcada por intrusões gabróicas no Cratão do Congo (complexo intrusivo Kunene), datada em 1380 Ma e também descrita por Ernst *et al.* (2013), teria impresso nas monazites o seu registo térmico com média de idade de 1415 ± 41 Ma. A partir desse momento, o corindo portador dos cristais de monazite possivelmente esteve situado em níveis crustais

Ponto de análise	U (ppm)	Erro U (ppm)	Th (ppm)	Erro Th (ppm)	Pb (ppm)	Erro Pb (ppm)	MPb	Idade (Ma)	Erro da idade (Ma)
M1-1	2139	150	174908	3498	8912	178	207,9	1074	45
M1-2	2382	150	163176	3264	8995	180	207,9	1150	48
M1-3	2058	150	99076	1982	8150	163	207,8	1655	72
M1-4	2206	150	97986	1960	8884	178	207,8	1805	78
M1-5	3044	150	78433	1569	7009	150	207,7	1693	75
M1-6	3270	150	126117	2522	8958	179	207,8	1416	59
M1-7	3165	150	159177	3184	8540	171	207,9	1102	46
M1-8	2554	150	198380	3968	9896	198	207,9	1050	44
M1-9	3445	150	83363	1667	7723	154	207,7	1738	74
M1-10	2898	150	176296	3526	9032	181	207,9	1065	44
M2-1	2164	150	179372	3587	7649	153	207,9	904	38
M2-2	1646	150	59969	1199	4419	150	207,8	1460	87
M2-3	1181	150	55435	1109	3973	150	207,8	1449	93
M2-4	1292	150	49063	981	3815	150	207,8	1542	103
M2-5	1242	150	55540	1111	4317	150	207,8	1561	96
M2-6	1929	150	65251	1305	4929	150	207,8	1485	82
M2-7	2749	150	147014	2940	8921	178	207,9	1246	52
M2-8	2278	150	189135	3783	8633	173	207,9	965	40
M3-1	1921	150	180172	3603	9524	190	207,9	1118	47
M3-2	1723	150	162850	3257	10973	219	207,9	1414	60
M3-3	1751	150	169459	3389	9877	198	207,9	1231	52
M3-4	2537	150	75085	1502	7055	150	207,8	1802	81
M3-5	2018	150	180101	3602	8902	178	207,9	1046	44
M3-6	2057	150	190612	3812	9432	189	207,9	1048	44
M3-7	1469	150	68406	1368	7361	150	207,8	2126	97
M3-8	2285	150	70304	1406	6777	150	207,8	1852	86
M3-9	2010	150	192404	3848	8410	168	207,9	930	39
M3-10	2062	150	181613	3632	10193	204	207,9	1182	49

Tabela 3. Concentrações de U, Th e Pb e idades químicas U-Th-Pb obtidas.

Table 3. Concentrations of U, Th and Pb and U-Th-Pb chemical ages obtained.

menos profundos em função da exumação crustal ao longo do tempo, e os eventos termiais subsequentes teriam produzido menores variações composicionais no interior dos cristais de monazite (Figs. 6 e 7).

A idade de  $1200 \pm 70$  Ma em certos domínios da monazite aparentemente está relacionada ao episódio termial correspondente ao evento magmático máfico-ultramáfico de 1223 Ma a 1211 Ma no Cratão do Congo (Burundi) descrito por Meert *et al.* (1994). Adicionalmente, foram encontrados zircões detríticos de 1176 Ma em bacias no interior da faixa móvel Araçuaí (Fonte-Boa *et al.*, 2017), possivelmente associados a este evento. Fonte-Boa *et al.* (2017) encontraram ainda zircões detríticos de 1530 Ma e 1370 Ma na mesma faixa móvel Araçuaí, idades correspondentes às mencionadas anteriormente.

Em cerca de 1110 Ma ocorreu a formação de um enorme enxame de diques gabro-noríticos no Cratão do Congo em Angola (Ernst *et al.*, 2013) possivelmente correspondente ao evento magmático máfico da LIP Umkondo em África. Desta forma, sugere-se que a idade de  $1071 \pm 26$  Ma registrada nos cristais de monazite aqui estudados esteja associada a este evento termial vinculado à referida LIP.

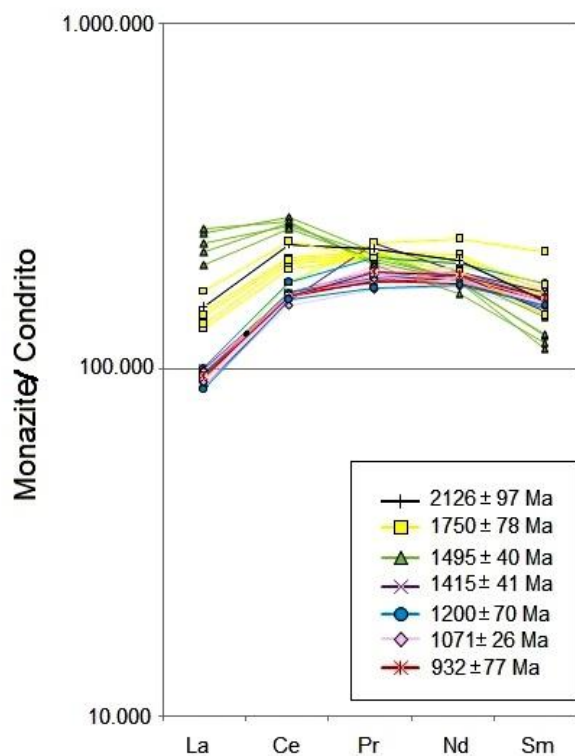


Figura 7. Padrões de ETR leves normalizados ao condrito (Evensen *et al.* 1978) das porções internas dos cristais de monazite, agrupados de acordo com as idades médias.

Figure 7. Chondrite-normalized light rare earth element patterns of the internal portions of the monazite crystals, grouped according to the average ages (normalization after Evensen *et al.* 1978).

Diques máficos e metabasaltos foram encontrados no Cratão São Francisco-Congo, de idades 900 a 925 Ma, os quais foram reconhecidos como pertencentes à LIP Bahia-Gangila por Chaves *et al.* (2019b), da qual o enxame de diques máficos Formiga (Fig. 2b) faz parte. A este evento estaria associada à idade de  $932 \pm 77$  Ma obtida pela datação das monazites.

É interessante notar que quatro dos eventos termiais aqui registrados pela monazite de  $1750 \pm 78$  Ma,  $1495 \pm 40$  Ma,  $1071 \pm 26$  Ma e  $932 \pm 77$  Ma são aproximadamente coincidentes com

idades de mobilizações múltiplas de urânio e chumbo promovidas por, pelo menos, quatro de cinco eventos hidrotermais (1,7 Ga, 1,5 Ga a 1,3 Ga, 1,1 Ga e 1,0 Ga) datados nos albitos uraníferos de Lagoa Real no interior do CSF (Bahia) pelo método U-Th-Pb por microsonda em minerais portadores de urânio (Chaves *et al.*, 2009), os quais devem ter sido disparados pela atividade das plumas mantélicas contemporâneas anteriormente mencionadas.

Uma grande LIP conhecida como Paraná-Etendeka (Renne *et al.* 1992) esteve em atividade na área estudada durante o Cretáceo Inferior, com idade de aproximadamente 130 Ma (Renne *et al.* 1992; Coelho e Chaves, 2017), aproximadamente à época em que se separaram os Cratões São Francisco e Congo. Como tal idade não se encontra registrada pelos cristais de monazite, estima-se que o corindo já estivesse em porção crustal próxima à superfície no Cretáceo e, portanto, os cristais de monazite nele incluídos não estariam expostos à quantidade suficiente de energia térmica necessária para o registo deste evento.

## 6. Conclusões

As idades encontradas de  $1750 \pm 78$  Ma,  $1495 \pm 40$  Ma,  $1415 \pm 41$  Ma,  $1200 \pm 70$  Ma,  $1071 \pm 26$  Ma e  $932 \pm 77$  Ma na datação dos domínios dos cristais de monazite incluídos no corindo são, de modo geral, coincidentes com idades de atividades de distintas plumas mantélicas/ LIP paleoproterozoicas descritas na literatura para o Cratão São Francisco-Congo, de onde a amostra de corindo (mineral de baixa condutividade térmica, localmente formado há  $2126 \pm 97$  Ma) foi retirada. Sugere-se aqui que o evento colisional gerador do corindo (e dos próprios cristais de monazite nele incluídos) e os eventos térmicos associados a essas plumas mantélicas ficaram registrados nos distintos domínios composicionais dos cristais de monazite investigados.

## Agradecimentos

Agradecemos ao Luis Emanuel Alexandre Goulart pelo apoio no trabalho de campo. O primeiro autor agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de produtividade em pesquisa concedida.

## Referências

- Aguilar C., Alkmim F. F., Lana C., Farina F., 2017. Paleoproterozoic assembly of the São Francisco craton, SE Brazil: New insights from U-Pb titanite and monazite dating. *Precambrian Research*, **289**: 95-11.
- Alkmim, F. F., Teixeira, W., 2017. The Paleoproterozoic Mineiro Belt and the Quadrilátero Ferrífero. In: M. Heilbron et al. (Eds.), *São Francisco craton, eastern Brazil*. Regional Geology Reviews. Springer, 71-94.
- Almeida, F. F. M., Hasui, Y., Brito Neves, B. B., Fuck, R. A., 1981. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth Science Reviews*, **17**: 1-29.
- Baltazar, O. F., Zucchetti, M., 2007. Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: a review of the setting of gold deposits. *Ore Geology Reviews*, **32**: 471-499.
- Catlos, E. J., 2013. Generalizations about monazite: Implications for geochronologic studies. *American Mineralogist*, **98**: 819-832.
- Cederberg, J., Söderlund, U., Oliveira, E. P., Ernst, R. E., Pisarevsky, S. A., 2016. U-Pb baddeleyite dating of the Proterozoic Pará de Minas dyke swarm in the São Francisco craton (Brazil) – implications for tectonic correlation with the Siberian, Congo and North China cratons. *GFF*, **138**: 219-240.
- Chaves, A. O., 2001. *Enxames de diques máficos no setor sul do cráton do São Francisco-MG*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo. 153.
- Chaves, A. O., Goulart, L. E. A., Coelho, R. M., Miranda, D. A., Aranda, R. O., Ramos, S. L. L. M., 2019a. High-pressure eclogite facies metamorphism and decompression melting recorded in paleoproterozoic accretionary wedge adjacent to probable ophiolite

- from Itaguara (southern São Francisco Craton – Brazil). *Journal of South American Earth Sciences*, **94**: 102226.
- Chaves, A. O., Ernst, R. E., Söderlund, U., Wang, X., Naeraa, T., 2019b. The 920–900 Ma Bahia-Gangila LIP of the São Francisco and Congo cratons and link with Dashigou-Chulan LIP of North China craton: New insights from U-Pb geochronology and geochemistry. *Precambrian Research*. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.precamres.2018.08.023>>. Acesso em: 21 de maio de 2019.
- Chaves, A. O., Oliveira, E. K., Garcia, L. R. A., 2013. Desenvolvimento do método de datação química U-Th-Pb de monazita por microsonda eletrônica na UFMG. *Geonomos*, **21**(2): 13-18.
- Chaves, A. O., Porcher, C. C., 2020. Petrology, geochemistry and Sm-Nd systematics of the Paleoproterozoic Itaguara retroeclogite from São Francisco/Congo Craton: One of the oldest records of the modern-style plate tectonics. *Gondwana Research*, **87**: 224-237.
- Chaves, A. O., Rezende, C. R., 2019. Fragments of 1.79-1.75 Ga Large Igneous Provinces in reconstructing Columbia (Nuna): a Statherian supercontinent-superplume coupling? *Episodes*, **42**(1): 55-67.
- Chaves, A. O., Tubrett, M., Avelar, S. C. P., Rios, F. J., Sgarbi, G. N. C., Neves, J. M. C., Alves, J. V., Fuzikawa, K., Matos, E. C., Prates, S. P., 2009. Electron microprobe chemical U-Th-Pb and LA-ICP-MS U-Pb dating of multiple hydrothermal and metamorphic events recorded in minerals of the Lagoa Real uraniumiferous albitites (Brazil). *Pesquisas em Geociências*, **36**: 181-201.
- Coelho, R. M., Chaves, A. O., 2017. Diques máficos de Minas Gerais do Cretáceo inferior: idades Ar-Ar e correlação com a província ígnea Paraná-Etendeka. *Geociências*, **36**: 613-622.
- Ernst, R. E., 2014. *Large Igneous Provinces*. Cambridge University Press, 653.
- Ernst, R. E., Pereira, E., Hamilton, M. A., Pisarevsky, S. A., Rodrigues, J., Tassinari, C. C. G., Teixeira, W., Van-Dunemi, V., 2013. Mesoproterozoic intraplate magmatic 'barcode' record of the Angola portion of the Congo Craton: Newly dated magmatic events at 1505 and 1110 Ma and implications for Nuna (Columbia) supercontinent reconstructions. *Precambrian Research*, **230**: 103-118.
- Evensen, N. M., Hamilton, P. J., O'Nions, R. K., 1978. Rare-earth abundances in chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **42**: 1199-1212.
- Fonte-Boa, T. M. R., Novo, T. A., Pedrosa-Soares, A. C., Dussin, I., 2017. Records of Mesoproterozoic taphrogenic events in the eastern basement of the Araçuaí Orogen, southeast Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, **47**(3): 447-466.
- Gardés, E., Jaoul, O., Montel, J., Seydoux-Guillaume, A. M., Wirth, R., 2006. Pb diffusion in monazite: an experimental study of  $Pb^{2+} + Th^{4+} \leftrightarrow 2Nd^{3+}$  interdiffusion. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **70**: 2325-2336.
- Goulart, L. E. A., Carneiro, M. A., 2008. General characteristics and litho-geochemistry of the Itaguara layered (ultramafic-mafic) sequence, southern São Francisco Craton. *Geochimica Brasiliensis*, **22**: 045-072.
- Linhout, K., 2007. Tripartite division of the system  $2REEPO_4 - CaTh(PO_4)_2 - 2ThSiO_4$ , discreditation of brabantite, and recognition of cheralite as the name for members dominated by  $CaTh(PO_4)_2$ . *The Canadian Mineralogist*, **45**(1): 503-508.
- Ludwig, K. R., 2003. *Isoplot/Ex 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley Geochronology Center, Special Publication, 4: 70.
- Machado, N., Noce, C. M., 1993. A evolução do setor sul do Craton do São Francisco entre 3,1 e 0,5 Ga baseada em geocronologia U-Pb. In: SBG/BA Simpósio sobre o Craton São Francisco, 2, Salvador. Anais. **1**: 100-102.
- Machado, N., Schrank, A., Noce, C. M., Gauthier, G., 1996. Ages of detrital zircon from Archean-Paleoproterozoic sequences: implications for Greenstone Belt setting and evolution of a Transamazonian foreland basin in Quadrilátero Ferrífero, southeast Brazil. *Earth and Planetary Science Letters*, **141**: 259-276.
- Meert, J. G., Hargraves, R. B., Van der Voo, R., Hall, C. M., Halliday, A. N., 1994. Paleomagnetic and  $^{40}Ar/^{39}Ar$  Studies of Late Kibaran Intrusives in Burundi, East Africa: Implications for Late Proterozoic Supercontinents. *The Journal of Geology*, **102**: 621-637.
- Mogilevsky, P., 2007. On the miscibility gap in monazite-xenotime systems. *Physics and Chemistry of Minerals*, **34**(3): 201-214.
- Parrish, R. R., 1990. U-Pb dating of monazite and its applications to geological problems. *Canadian Journal of Earth Science*, **27**(11): 1431-1450.
- Pommier, A., Cocherie, A., Legendre, O., 2004. *EPMA dating user' manual, v.1.01: age calculation from electron probe microanalyser measurements of U-Th-Pb*. BRGM, Orleans, 9.
- Reis, N. J., Teixeira, W., Hamilton, M. A., Bispo-Santos, F., 2013. Avanço mafic magmatism, a late Paleoproterozoic LIP in the Guiana Shield, Amazonian Craton: U-Pb ID-TIMS baddeleyite, geochemical and paleomagnetic evidence. *Lithos*, **174**: 175-195.
- Renne, P. R., Ernesto, M., Pacca, I. G., Coe, R. S., Glen, J. M., Prevot, M., Perrin, M., 1992. The age of Paraná flood volcanism, rifting of Gondwanaland, and the Jurassic-Cretaceous boundary. *Science*, **258**: 975-979.
- Scherer, N. C., Eng, M., Gnos, E., Jakob, V., Liechti, A., 2000. Monazite analysis; from sample preparation to microprobe age dating and REE quantification. *Schweizer Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, **80**: 93-105.
- Shakhtin, D. M., Pechenezhskii, V. I., Karaulov, A. G., Kvasman, N. M., Kravchenko, V. P., Kabakova, I. I., Ustichenko, V. A., Kalita, G. E., Shcherbenko, G. N., Yakobchuk, L. M., 1982. Thermal conductivity of corundum high-alumina, magnesia, zirconium and chromate refractories in the 400-1800 °C range. *Refractories*, **23**(5): 223-227.
- Simonet, C., Fritsch, E., Lasnier, B., 2008. A classification of gem corundum deposits aimed towards gem exploration. *Ore Geology Reviews*, **34**: 127-133.
- Stern, R. J., Tsujimori, T., Harlow, G. E., Groat, L. A., 2013. Plate tectonic gemstones. *Geology*, **41**: 723-726.
- Williams, M. L., Jercinovic, M. J., Hetherington, C. J., 2007. Microprobe Monazite Geochronology: Understanding Geologic Processes by Integrating Composition and Chronology. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **35**: 137-175.