



**Ilmenitas Manganésíferas e suas Implicações para Kimberlitos Diamantíferos:  
Estudo de Caso no Dique Kimberlítico de Aroeira, Província Kimberlítica Nordestina, Bahia**  
Manganoan Ilmenite and Implications for Diamond Bearing Kimberlites:  
A Case Study at the Aroeira Kimberlitic Dyke, Nordestina Kimberlitic Province, Bahia

Matheus Andrade Nascimento<sup>1</sup>; Débora Correia Rios<sup>1</sup>;  
Ivanara Pereira Lopes dos Santos<sup>1,2</sup> & Herbet Conceição<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geologia. Laboratório de Petrologia Aplicada à Pesquisa Mineral. Rua Barão de Jeremoabo, s/n, Campus Universitário de Ondina, 40.170-290 Salvador, Bahia

<sup>2</sup> Serviço Geológico do Brasil - CPRM, Av. Ulisses Guimarães, 2868. 41.213-000 Salvador, Bahia

<sup>3</sup> Universidade Federal de Sergipe – UFS. Programa de Pós-Graduação em Geociências e Análise de Bacias, Complexo Laboratorial Multiusuários da UFS. Galpão das Geociências, 49.100-000 São Cristóvão, Sergipe  
E-mails: matheus1822@hotmail.com; dcrios@ufba.br; ivanarapereira@gmail.com; herbet@ufs.br

Recebido em: 16/07/2018 Aprovado em: 10/10/2018

DOI: [http://dx.doi.org/10.11137/2018\\_3\\_658\\_671](http://dx.doi.org/10.11137/2018_3_658_671)

## Resumo

As ilmenitas avaliadas neste estudo ocorrem no dique Orangeítico/Lamproítico Aroeira, até então a única ocorrência de kimberlito em situação *off-craton* na Província Kimberlítica Nordestina, Núcleo Arqueano Serrinha, Cráton do São Francisco. Estudo de difratometria de raios-X permitiram identificar duas fases cristalográficas de ilmenita no corpo Aroeira: (i) uma no polo Fe-Ti, e (ii) outra no polo Ti- Mn. Análises por microscópio eletrônico acoplado a um analisador de energia dispersiva (EDS) demonstram que estes cristais formam uma solução sólida contínua, que apresenta baixos teores de MgO e riqueza em V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, com núcleos mais ricos em MnO e bordas enriquecidas em FeO. Mn-ilmenita é uma fase mineral primária que se cristaliza em condições estáveis no manto inferior e/ou zona de transição manto-núcleo, um importante mineral indicador da presença de diamantes em kimberlitos. Os cristais de Mn-ilmenita do kimberlito Aroeira são quimicamente correlacionáveis às inclusões de ilmenita em diamantes do Kimberlito Pandrea, Campo de Juína, Mato Grosso, para os quais se advoga uma fonte mantélica super-profunda (>660km), na transição manto-núcleo. Estas similaridades sugerem que as condições do manto para a geração da ilmenita Aroeira são similares àquelas do manto parental da ilmenita Juína. Os trabalhos prospectivos preliminares realizados em Aroeira reforçam esta interpretação, comprovando o potencial para diamantes de Aroeira.

**Palavras-chave:** Dique Kimberlítico Aroeira; Ilmenita; Minerais Indicadores de Kimberlitos

## Abstract

The ilmenite analyzed in this study occurs in the Orangeite / Lamproite Aroeira dyke, which is the only occurrence of kimberlite in an off-craton location in the Northeast Kimberlite Province, in the Archaean Serrinha Nucleus, São Francisco Craton. X-ray diffraction study allows to identify two crystallographic phases of ilmenite in the Aroeira dyke: (i) in the Fe-Ti pole, and (ii) in the Ti- Mn pole. Scanning electron microscope coupled to an EDS analyses demonstrate that these crystals form a solid solution, which presents low MgO contents and enrichment of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, with core enriched in MnO contrasting with rims enriched in FeO. Mn-ilmenite is a primary mineral phase that crystallizes under stable conditions in the lower mantle and / or mantle-core transition zone. It is an important mineral to infer the presence of diamonds in kimberlites. The Mn-ilmenite crystals of the Aroeira dyke are chemically correlated with ilmenite inclusions found in diamonds of the Pandrea kimberlito, Juína field, Mato Grosso. This ilmenite are from super-deep mantle source (> 660km) in the mantle-core transition . These similarities suggest that mantle conditions for the generation of the Aroeira ilmenite are similar to those of the parental mantle of the ilmenite Juína. Preliminary prospective work carried out at Aroeira dyke reinforces this interpretation, proving its potential for diamonds.

**Keywords:** Aroeira Kimberlitic Dyke; Ilmenite; Kimberlite Indicator Minerals

## 1 Introdução

O estudo de kimberlitos no mundo teve início no século 19, com descobertas na África do Sul, que posteriormente se tornaram minas de diamantes. Já no Brasil, os primeiros kimberlitos foram identificados no início da década de sessenta, em regiões de potencial reconhecido para diamantes a partir de fontes aluviais, e que resultou na descoberta de vários alvos promissores no país, inclusive no Cráton do São Francisco, a partir da geofísica aérea e posterior caracterização de minerais indicadores (Pereira *et al.*, 2007).

O magma kimberlítico resulta em rochas mantélicas ultramáficas alcalinas, ricas em fases hidratadas e carbonatadas, facilmente intemperizadas e alteradas em condições de superfície, em especial em áreas de clima úmido, onde um solo areno-argiloso característico é formado. Outro importante avanço nessas pesquisas é o estudo sobre minerais que se encontram em equilíbrio com o diamante – os minerais indicadores de kimberlitos (KIMs).

Os KIMs são minerais encontrados como inclusões em diamantes, logo a sua ocorrência no manto está em equilíbrio com a existência de diamantes, e por isso são considerados como a paragênese mineral na qual o diamante ocorre (Kaminsky & Belosouva, 2009). Os KIMs geralmente mais procurados são a granada – do tipo piropo –, cromo-espinélio, ilmenita manganésifera, e olivina magnésiana. Estudos geoquímicos de *follow-up* têm sido o principal método prospectivo para localização e identificação de novos corpos de kimberlitos (Pereira *et al.*, 2008), já que durante o intemperismo e erosão os KIMs são dispostos sobre o dique e carregados a alguma distância pelo sistema de drenagem.

Na prospecção de kimberlitos, o estudo do mineral indicador ilmenita é essencial, pois é resistente ao intemperismo, tende a se depositar em áreas próximas ao dique, e ainda permite associar sua composição química com a região fonte e/ou presença de diamantes. Assim, estudar a composição química deste mineral é etapa fundamental na avaliação de rochas kimberlíticas e no potencial destas para mineralizações de diamantes (Wyatt *et al.*, 2004).

Mitchell *et al.* (1986), descreveram a ilmenita de kimberlitos como cristais subédricos de composição magnésiana, que podem ocorrer

como megacristais arredondados, macrocristais, ou na matriz. Posteriormente, Wyatt *et al.* (2004) utilizaram diagramas geoquímicos binários para individualizar ilmenita kimberlítica das não-kimberlíticas, utilizando para isto um extenso banco de dados mineraloquímicos de ilmenita proveniente de vários kimberlitos do mundo, em diversos contextos geográficos, geotectônicos e geocronológicos, e com isto estabelecendo uma curva limítrofe que traduz a relação  $TiO_2 \times MgO$  na composição das ilmenitas em kimberlitos. Estes autores ressaltaram que a presença de um enriquecimento em MnO (< 1% em peso) estaria ligado a um processo de zoneamento e/ou alteração. Isto deu início a diversos outros estudos com ilmenitas em kimberlitos, os quais passaram a focar também a presença, abundância e distribuição de elementos menores e traços, especialmente o conteúdo de manganês na sua composição.

Meyer & Svisero (1975) estudaram ilmenita do campo kimberlítico de Juína, Brasil – um conjunto de rochas provenientes de grandes profundidades no manto – comparando-as à ilmenita de outras províncias kimberlíticas, e perceberam que as composições da ilmenita de Juína diferia daquelas descritas por Mitchell *et al.* (1986) e Wyatt *et al.* (2004). A ilmenita em Juína tem como característica comum teores de MnO variando de 0,64 a 0,75 %. Posteriormente, Kaminsky & Belosouva (2009) descreveram para este mesmo campo de Juína, ilmenita caracterizada por baixos teores de MgO (<0,04 – 0,81 %) e elevados teores de MnO (0,42 – 11,46%), algumas inclusas em diamantes, e associadas a uma assembléia mineral que também incluía ferro-periclásio, granada e CaTi-perovskita, típica das zonas de transição e do manto inferior.

A pesquisa de kimberlitos/diamantes no Cráton do São Francisco (CSF), Bahia, só ganhou impulso nos últimos anos. Ainda assim ela é dificultada pela complexidade geológica da região, somada ao elevado nível erosivo de exposição de suas rochas. Nestas condições, a análise de minerais indicadores em amostras de solo/saprólito e em cursos de rios e drenagens são os primeiros passos para o reconhecimento dos novos alvos exploratórios.

A Província Kimberlítica Nordestina (Santos *et al.*, 2016) representa o maior e mais expressivo conjunto de kimberlitos do CSF na Bahia. Inclui o Campo

Kimberlítico de Braúna, de idade Neoproterozoica (Rios *et al.*, 2011, Donatti-Filho *et al.*, 2013), e onde se localiza a única mina de diamantes em kimberlitos da América Latina. Recentemente diversos outros corpos foram investigados e passaram a compor esta província, incluindo *pipes* e/ou diques *on-craton* e *off-craton* tais como Aroeira, Umbú, Icó e Asa Branca (Santos *et al.*, 2016, Nannini *et al.*, 2017).

O objetivo deste artigo é apresentar e discutir as composições de ilmenita no saprólito do *dique* kimberlítico de Aroeira, nordeste da Bahia, e suas implicações para o potencial diamantífero destas rochas.

## 2 Aspectos Geológicos

A área de estudo está localizada no nordeste do Estado da Bahia, em uma zona de clima semiárido e relevo plano a suavemente ondulado. Encontra-se sobre a macro unidade geotectônica do Cráton do São Francisco (CSF), sendo esta a mais exposta e bem estudada unidade tectônica do embasamento da plataforma sul-americana (Barbosa *et al.*, 2003). Está inserida na zona de sutura (Silveira *et al.*, 2015) entre o Cinturão Móvel Salvador – Curaçá (CMSC) e o Núcleo Serrinha na parte Norte.

O CMSC foi descrito e mapeado por Delgado & Souza (1975), quando buscavam melhor entender as ocorrências de cobre que ocorriam na Suíte São José do Jacuípe. A principal unidade geológica é o Complexo Caraíba, composto por ortognaisses tonalíticos, granodioríticos, trondhjemiticos, quartzomonzoníticos. Nos locais onde ocorreu fusão parcial, existem estruturas migmatíticas *schlieren*, nebulítica e *schollen*. Além do Complexo Caraíba são encontrados corpos ígneos pós tectônicos, dentre estes o Batólito Sienítico de Itiúba (2095±5Ma Pb/Pb<sub>Zr</sub>; Conceição, 1990; Conceição *et al.*, 2003), que forma uma serra proeminente, alongada por mais de 180km, destacando-se no relevo da região. Por fim, há coberturas quaternárias areno-argilosas, de coloração bege, que recobrem boa parte das rochas do Complexo Caraíba.

A sul do Batólito Itiúba, e em contato por falhas com este, ocorre a intrusão de Pedra Solta (Otero, 2005; Figura 1). Suas rochas incluem granitos, monzonitos, sienitos e dioritos, de natureza alcalina, shoshoníticas, onde são observadas feições de mistura entre magma

máfico (lamprofirico ???) e félsico (sienítico ???). Nas rochas sienítica máficas deste maciço Otero (2005) descreve a presença de óxidos de Fe-Ti e diopsídio pobre em Ti, feições estas que são características de magmas mantélicos profundos. O maciço Pedra Solta é considerado uma expressão tardia (2088±9Ma Pb/Pb<sub>Zr</sub>; Otero, 2005) do magmatismo Paleoproterozoico no CMSC, com idade e características geoquímicas similares ao magmatismo alcalino descrito por Rios *et al.* (2007, 2009) em associação a lamprófiros/lamproítos no Núcleo Serrinha.

A Província Kimberlítica Nordestina (PKN), localizada no nordeste da Bahia, estende-se pelos municípios de Nordestina, Queimadas, Itiúba, Cansanção, Monte Santo e Uauá. São vários pequenos corpos, diques e pipes, descobertos pela De Beers durante a década de 90 (Pereira *et al.*, 2007). Os corpos mais conhecidos pela comunidade científica são os que formam o Campo Kimberlítico de Braúna (Pereira *et al.*, 2007, Donatti-Filho, 2013), onde se localiza a única mina de diamantes em kimberlitos da América Latina (Nannini *et al.*, 2017).

Recentemente outras intrusões kimberlíticas nesta região, abrangendo uma área geográfica mais extensa, vem sendo descritas na literatura (Santos *et al.*, 2016; Nascimento *et al.*, 2018; Nannini *et al.*, 2017), tais como os corpos kimberlíticos de Umbu, Asa Branca, Icó, Alecrim e Aroeira, sendo este último o corpo estudado nesta pesquisa.

O dique kimberlítico Aroeira está localizado no município de Queimadas, intrudindo as rochas do Maciço Pedra Solta (Figura 1). Em campo, reflete um relevo arrasado, de solo areno-argiloso, quase sem vegetação (Figura 2A). Suas rochas possuem orientação NNW-SSE, matriz composta basicamente por flogopita e serpentina, são ricas em macrocristais de granada e espinélio (Figura 2B), e nelas já foram encontrados cristais de diamante (Nannini *et al.*, 2017).

## 3 Metodologia

O objeto deste estudo foi a fração intemperizada/saprolitizada do fácies hipoabissal do *dique* Aroeira. Um poço com 1,0 m x 1,0 m de abertura e cerca de 3m de profundidade em sua totalidade foi aberto para a coleta de amostra (Figura 2C). Cerca de 40 kg de amostra do saprólito do *dique* Aroeira foi coletada

**Ilmenitas Manganíferas e suas Implicações para Kimberlitos Diamantíferos:  
Estudo de Caso no Dique Kimberlítico de Aroeira, Província Kimberlítica Nordestina, Bahia**  
Matheus Andrade Nascimento; Débora Correia Rios; Ivanara Pereira Lopes dos Santos & Herbet Conceição

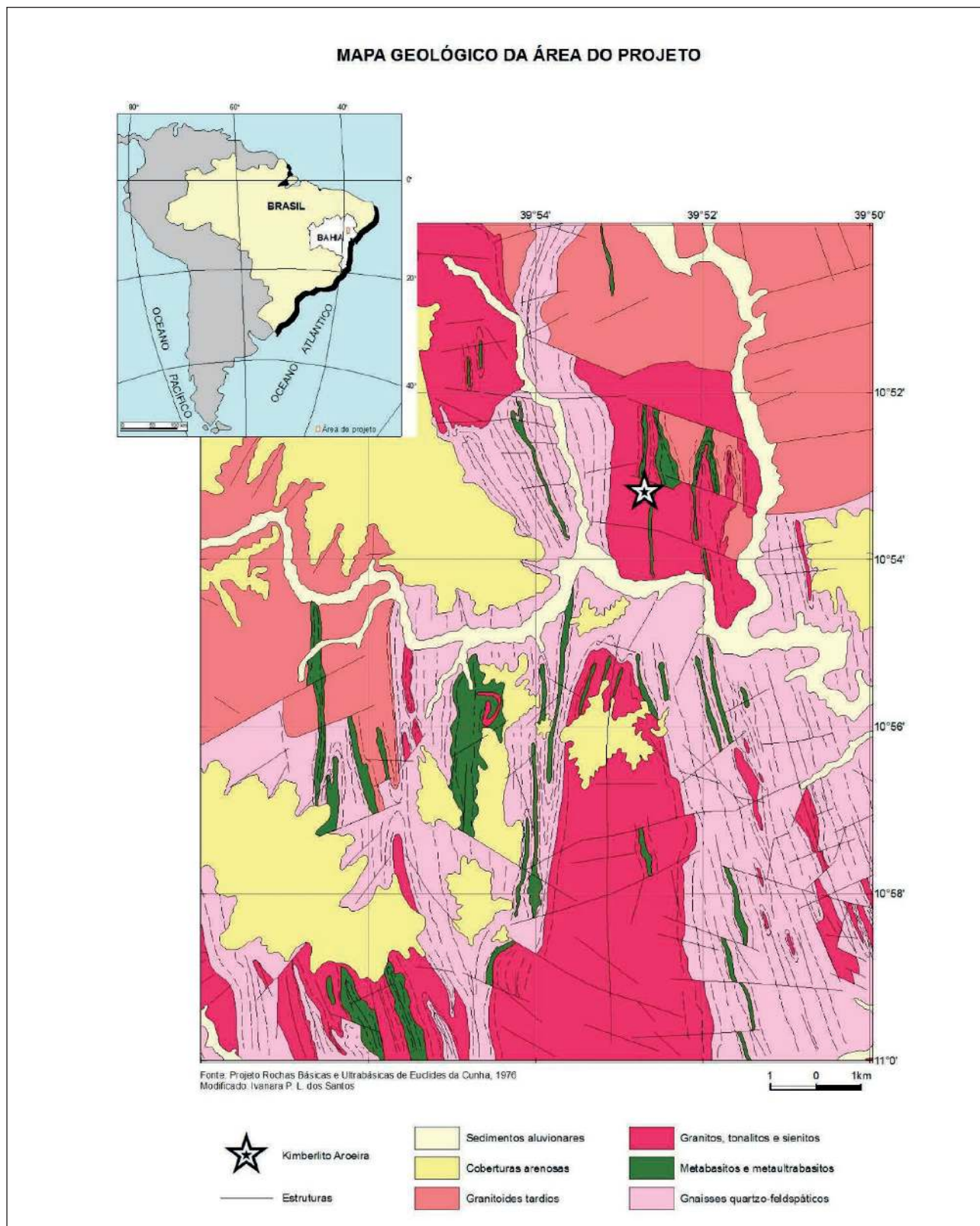


Figura 1 Mapa geológico simplificado do área de estudo, apresentando a localização do dique kimberlítico Aroeira.

– entre 0,5 e 1,5m de profundidade (Figura 2D) – sendo esta fração equivalente ao horizonte ‘C’ do solo (Figura 2E).

Os métodos utilizados neste trabalho para a concentração da ilmenita são baseados na metodologia descrita por Towie *et al.* (1995, Figura 3), adaptada à estrutura laboratorial e analítica disponível na UFBA.

Inicialmente a amostra foi peneirada a 8# e a parte retida foi desagregada com auxílio de água. Toda a amostra foi então separada com o auxílio de uma bateia de mesa onde se procedeu a desagregação e classificação granulométrica através de um aparato de peneiras. Detalhes desta metodologia estão descritos por Nascimento (2018).

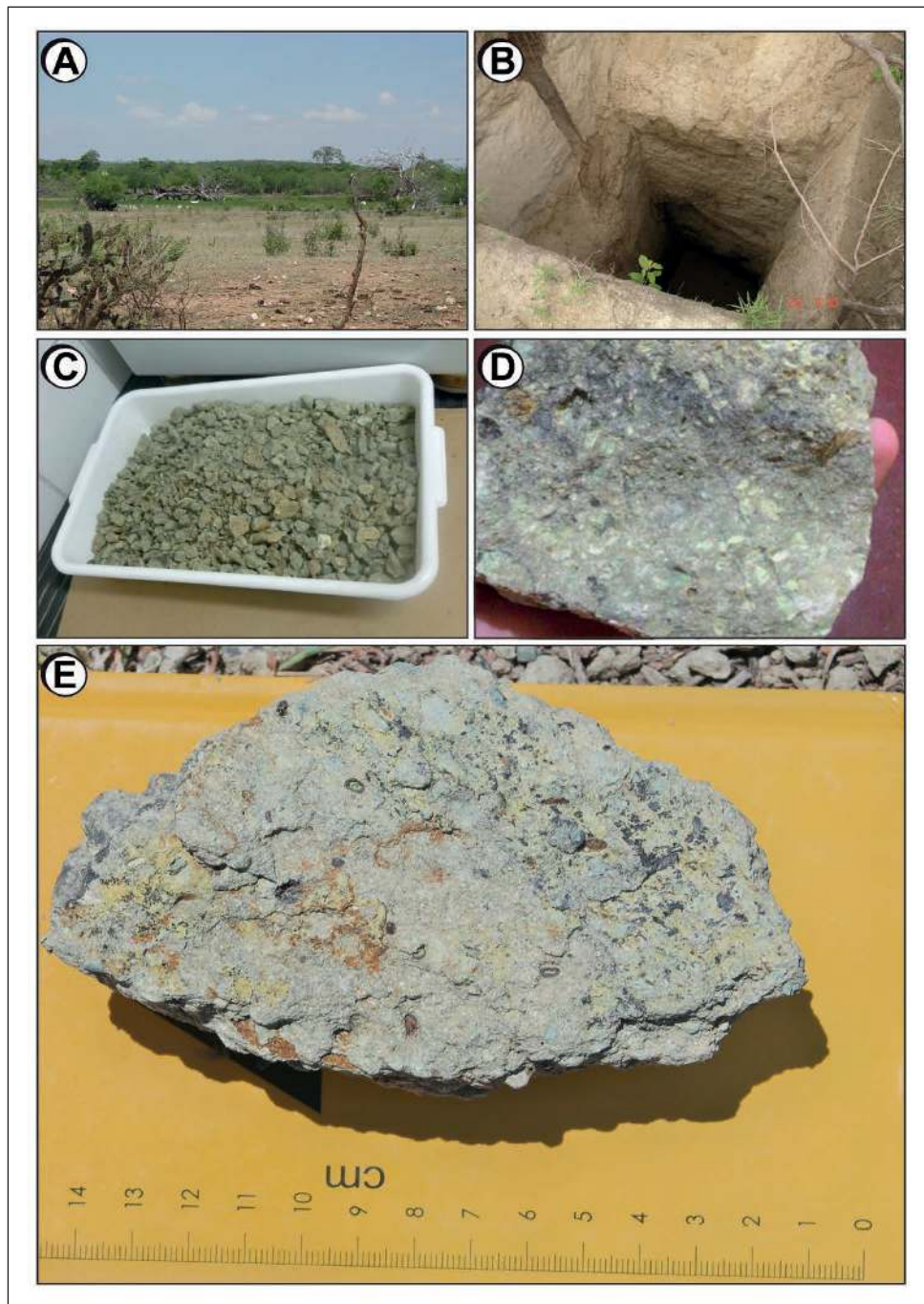


Figura 2 Imagens de campo e laboratório. A. Visão geral do dique kimberlítico Aroeira; B. poço feito para coleta do saprólito; C. Saprólito antes de ser concentrado; D. Rocha preservada; E. Fragmento de rocha alterada

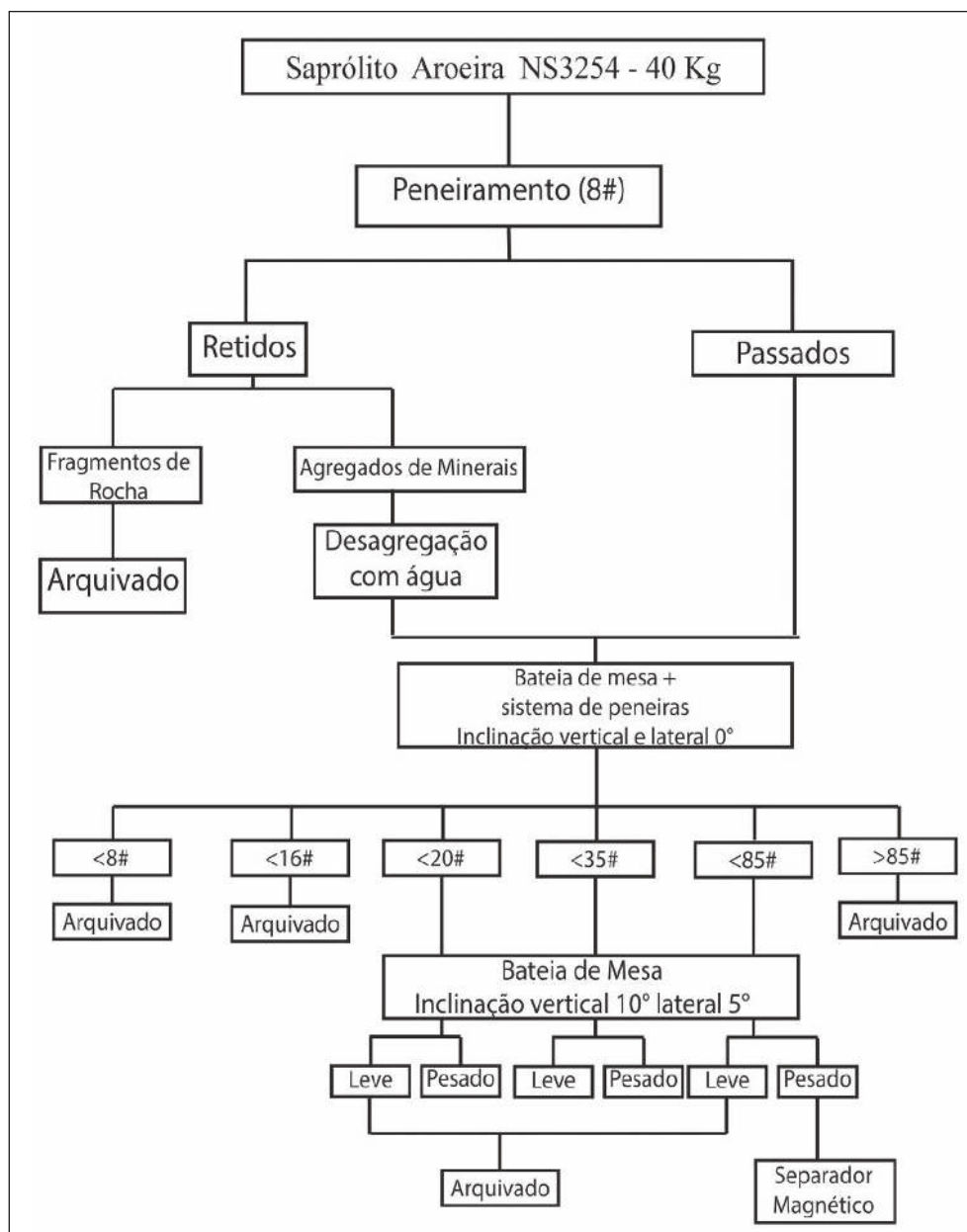


Figura 3 Fluxograma metodológico para estudos nos cristais de ilmenita do Dique Kimberlítico Aroeira.

Após a avaliação em lupa binocular, a fração pesada a 85# foi selecionada para continuidade dos trabalhos com a ilmenita, pois as frações de granulometria mais grossa ainda possuíam muitos minerais associados e agregados, não favorecendo a separação dos minerais indicadores de kimberlitos. Procedeu-se então a separação eletromagnética com o Frantz ajustado ao modo “free fall”, posicionando-se o eletro-ímã a 90° de inclinação vertical e 0° de inclinação lateral.

A lupa binocular foi utilizada para a descrição dos cristais de ilmenita retidos na fração magnética do “free fall”, selecionados com base em critérios morfológicos, permitindo a individualização de três populações distintas de cristais: (i) euédricos, (ii) fragmentados, e (iii) arredondados. Estes cristais de ilmenita foram selecionados para a caracterização mineralógica utilizando-se Difratometria de Raios-X (DRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

Parte do concentrado de ilmenita foi enviado para análise na empresa Bruker Brasil, São Paulo, onde foram analisados utilizando-se um difratômetro de raios-X Bruker modelo D2 phaser. A amostra enviada para o DRX estava na forma de pequenos grãos metálicos e foi levemente moída em gral de ágata até obter uma granulometria adequada (<200#). Devido à quantidade mínima de amostra disponível, cerca de 1g, o material moído foi então acondicionado em porta-amostra do tipo *Low-Background*, específico para uso quando é necessário analisar pequenas quantidades de material. As condições analíticas estão descritas na Tabela 1.

O difratograma obtido foi analisado com o auxílio do software DIFFRAC.EVA da Bruker. Após esta análise qualitativa, e de posse dos códigos de Power Diffraction Files (banco de dados PDF-4) de cada uma delas, a quantificação foi realizada pelo método de Rietveld utilizando o software DIFFRAC.TOPAS, versão 5.0.

Goniômetro	D2 PHASER Theta/Theta
Medida do Círculo	280 mm
Tubo	2.2 kW Cu – Foco Fino Longo
Potência do Tubo	30 kV / 10 mA
Óptica Primária	AAS Fixa 2mm sobre a amostra Soller Slit 4° Divergence Slit 0.6mm
Estágio	Estágio Padrão de Rotação (15 rpm)
Óptica Secundária	Soller Slit 4° Filtro de Ni
Detector	LYNXEYE SSD160 , 4,86° abertura
Intervalo de Varredura	10 a 90°, 2Theta
Step Time	0,4 s
Step Size	0.014°

Tabela 1 Condições Analíticas do D2 Phaser, Bruker Brasil Labs.

Utilizou-se o MEV acoplado a um espectrômetro de energia dispersiva (EDS) para realizar imageamentos de grãos individuais, mapas químicos de varredura e análises semi-quantitativas pontuais. Para isto, trinta (30) cristais de ilmenita das diferentes populações identificadas no concentrado de pesados-magnéticos foram colados em fita dupla-face, considerando-se a proporção de 10 cristais para cada população: (i) grãos euédricos, (ii) grãos arredondados, e (iii) fragmentos de grãos. Além destes, foram colados

nesta montagem grãos de zircão, flogopita e quartzo, também identificados neste concentrado. Após esta etapa, os cristais foram descritos individualmente, fotografados em lupa binocular e confeccionado um *mount* utilizando resina epóxi e endurecedor nos Laboratórios de Preparação de Amostras da CPRM-Sureg Salvador.

Em seguida ao endurecimento foi realizado polimento visando a exposição das partes internas dos cristais. Devido a diferenças de tamanhos entre os cristais presentes nesta população, vários foram removidos do *mount* durante a etapa de polimento, e apenas 10 cristais de ilmenita puderam ser analisados. As análises foram realizadas nos laboratórios multi-usuários do Instituto Federal de Educação da Bahia e da Universidade Federal de Sergipe. O equipamento utilizado foi um MEV de marca Tescan, modelo Vega3, acoplado a um analisador EDS e detectores de elétrons secundários (SE) e elétrons retro-espalhados (BSE).

### Características Cristalográficas e Mineraloquímicas da Ilmenita Aroeira

A análise quali-quantitativa por DRX permitiu a identificação de duas fases cristalinas de ilmenita no concentrado analisado: (i) a ilmenita de  $FeTiO_3$ , típica de rochas em geral; e, (ii) a fase rica em  $MnTiO_3$  – pirofanita – uma ilmenita típica de zonas mantélicas de alta profundidade (Figura 4 A).

Na figura 4, a curva azul corresponde à ilmenita e a curva vermelha representa a pirofanita (Mn-ilmenita). O valor calculado para a diferença entre as duas curvas está representado pela linha cinza, a partir da qual é feita a quantificação das fases presentes utilizando o software Difffrac-TOPAS.

A quantificação utilizou o método Rietveld e demonstra uma distribuição percentual relativamente equilibrada destas duas fases na amostra estudada, correspondendo a 59,75% – para a fase de  $FeTiO_3$  – e 40,25% para a pirofanita ( $MnTiO_3$ ) no concentrado de ilmenita estudado.

Conhecendo-se a existência de duas fases distintas de ilmenita nesta amostra, foram realizadas as análises pontuais por MEV/EDS, buscando-se quantificar os teores de Mn. Estas análise demonstraram que os cristais de ilmenita analisados não apresentam qualquer tipo de zoneamento ou substituição química observável (Figura 5).

Ilmenitas Manganíferas e suas Implicações para Kimberlitos Diamantíferos:  
Estudo de Caso no Dique Kimberlítico de Aroeira, Província Kimberlítica Nordestina, Bahia  
Matheus Andrade Nascimento; Débora Correia Rios; Ivanara Pereira Lopes dos Santos & Herbet Conceição

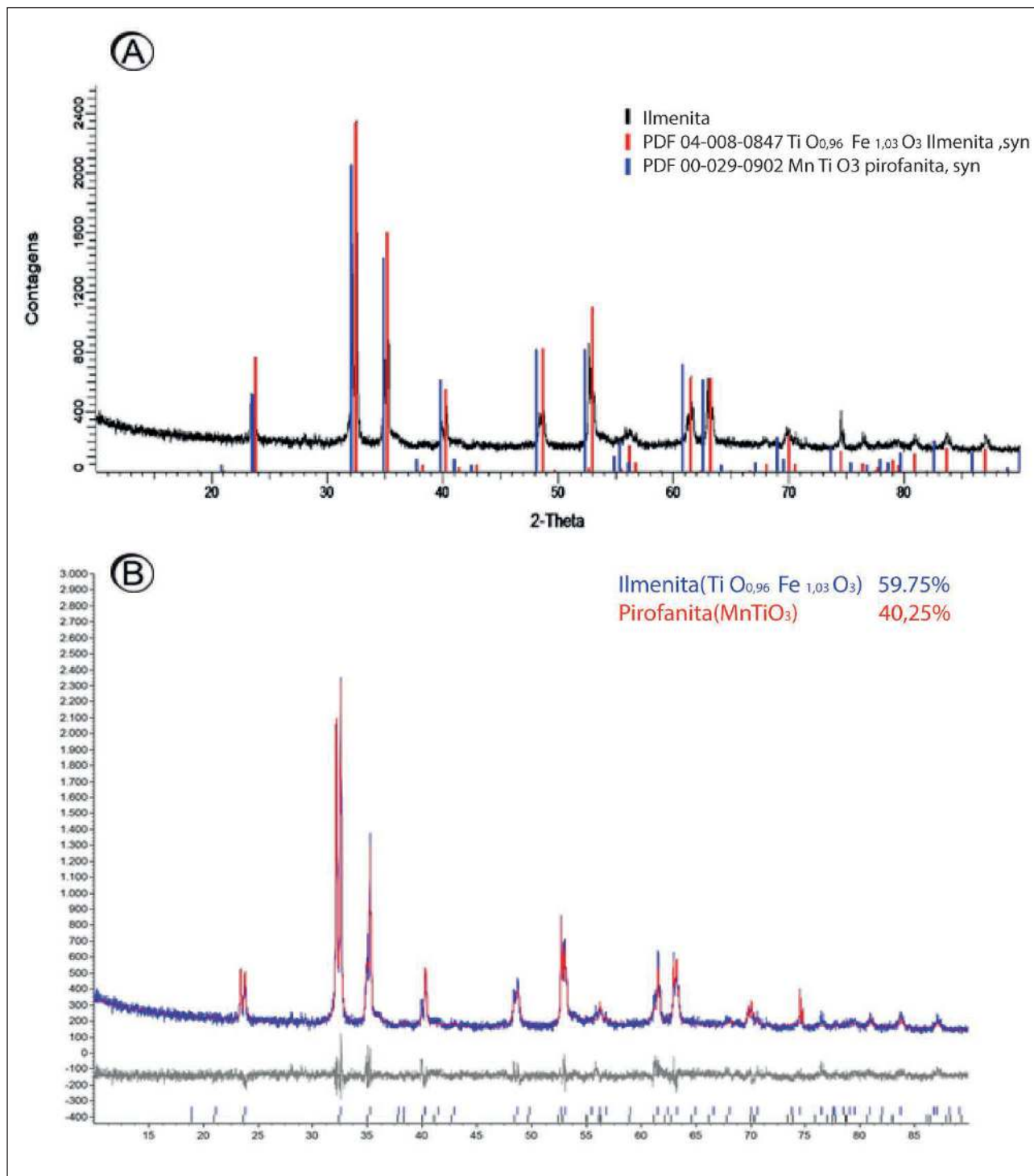


Figura 4 Difratomogramas no concentrado de ilmenita – pesados-magnéticos – da amostra NS3254. A. Difratomograma gerado pelo DIFRAC. EVA qualificando as fases minerais presentes; B. Difratomograma padrão gerado pelo DIFRAC.TOPPAS, após processamento.



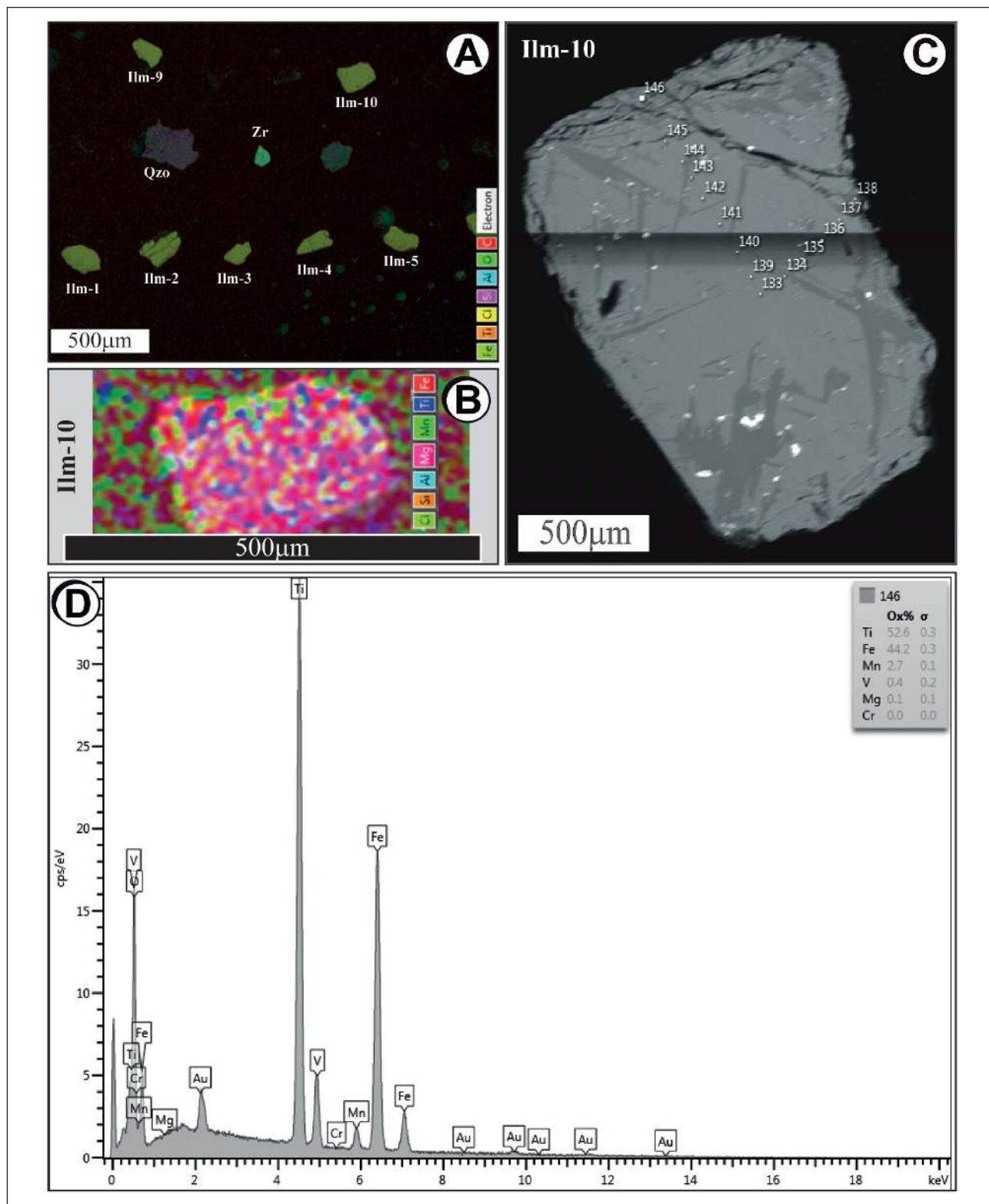


Figura 5 Análises por Microscopia Eletrônica de Varredura na ilmenita da amostra NS3254. A. Mapa químico nos cristais a serem analisados; B. Mapa químico de detalhe, demonstrando o teor de Mn nos grãos de ilmenita em análise; C. Linhas analíticas sequenciais centro-borda na ilmenita 10; D. Picos elementais na borda do cristal de ilmenita 10.

**Ilmenitas Manganíferas e suas Implicações para Kimberlitos Diamantíferos:  
Estudo de Caso no Dique Kimberlítico de Aroeira, Província Kimberlítica Nordestina, Bahia**  
*Matheus Andrade Nascimento; Débora Correia Rios; Ivanara Pereira Lopes dos Santos & Herbet Conceição*

Cristal	Ilmenita 1 (#7)			Ilmenita 2 (#11)			Ilmenita 3 (#15)			Ilmenita 4 (#17)			Ilmenita 5 (#23)		
	Posição	C	B	Média	C	B	Média	C	B	Média	C	B	Média	C	B
TiO <sub>2</sub>	51,20	52,10	51,7	51,70	51,50	51,3	54,00	51,50	54,3	52,70	57,10	56,1	54,90	54,70	54,9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,10	0,00	0,0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0
FeO	47,40	46,00	46,8	47,20	47,10	47,4	44,80	47,10	44,2	45,50	40,80	42,2	43,70	43,30	43,6
MnO	0,90	1,90	1,2	0,60	0,90	0,7	0,80	0,90	0,9	1,20	1,50	1,3	1,10	1,50	1,2
NiO	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0
MgO	0,00	0,00	0,0	0,30	0,20	0,3	0,20	0,20	0,2	0,10	0,10	0,1	0,20	0,00	0,1
ZnO	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,50	0,00	0,3	0,20	0,20	0,3	0,20	0,20	0,3	0,50	0,50	0,4	0,30	0,50	0,3
<b>Total</b>	<b>100,10</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>99,90</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>99,90</b>	<b>99,90</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,10</b>	<b>100,20</b>	<b>100,00</b>	<b>100,10</b>
Cristal	Ilmenita 6 (#23)			Ilmenita 7 (#18)			Ilmenita 8 (#20)			Ilmenita 9 (#13)			Ilmenita 10 (#15)		
	Posição	C	B	Média	C	B	Média	C	B	Média	C	B	Média	C	B
TiO <sub>2</sub>	54,20	52,8	53,1	52,4	51,7	52,1	53	52,2	53,5	52,3	52,5	52,4	53,2	56,9	53,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FeO	43,10	44,2	44,3	46,5	46,9	46,7	45,7	45,9	45,1	45,6	44,8	45	45,7	41,4	45,4
MnO	2,20	2,4	2,1	0,6	0,9	0,7	0,6	1	0,7	2,1	2,4	2,2	0,8	1,1	0,9
NiO	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgO	0,20	0,1	0,2	0	0,1	0,1	0,1	0,3	0,3	0	0,1	0,1	0,1	0	0,1
ZnO	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,30	0,5	0,4	0,5	0,4	0,3	0,5	0,6	0,4	0	0,1	0,3	0,1	0,6	0,4
<b>Total</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,10</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>99,90</b>	<b>99,90</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>99,90</b>	<b>100,00</b>	<b>99,90</b>	<b>100,00</b>	<b>99,90</b>

Tabela 2 Resultados das análises por MEV dos cristais de ilmenita do concentrado magnéticos-pesados na amostra NS3254, Kimberlito Aroeira. (#) Número de pontos analisados por cristal. C = Centro, B = Borda.

## Discussões e Considerações Finais

Esta é a primeira vez que se reporta na literatura um estudo sistemático de ilmenita de kimberlitos por DRX. Os avanços atuais da técnica e a sua associação a *softwares* e bancos de dados mais completos – tais como o PDF-4 – associados à aplicação do método de Rietveld para quantificação das fases – Diffrac-TOPAS – utilizados neste trabalho, permitem observações importantes sobre a natureza e distribuição volumétrica destes cristais nas populações de minerais indicadores de kimberlitos.

A ilmenita manganésifera tem uma grande diferença composicional marcante em relação à ilmenita clássica. A pirofanita seria o polo puro, onde o Fe é totalmente substituído pelo Mn. A picroilmenita, representa as variações, com substituição progressiva do Fe pelo Mn na estrutura da ilmenita. Esta

diferenciação é importante nos estudos de kimberlitos, sendo descrita por Mitchel (1986) e Wyatt *et al.* (2004). A partir de estudos em amostras de kimberlitos do Campo de Juína, Mato Grosso, Brasil, Kaminsky *et al.* (2001) chamam a atenção para a existência de um tipo especial de ilmenita em kimberlitos, denominando esta fase específica, com teores de MnO variando entre 0.63–2.49 %, de Mn-ilmenita, uma fase mineral primária e que pode ser distinguida da “picroilmenita” com base em suas diferenças químicas. Ambas as fases minerais, picroilmenita e Mn-ilmenita, possuem enriquecimentos em Zr, Nb, Ta, Th e U mas a Mn-ilmenita distingue-se pelos teores mais baixos de Mg, Ni, Cr, Co, Ta e Nb (Kaminsky, 2017).

Posteriormente, Kaminsky & Belosouva (2009), a partir de concentrado de minerais pesados do Pipe Pandrea-7, demonstra que tais valores são característicos tanto dos cristais de ilmenita

inclusos em diamantes quanto os presentes na matriz kimberlítica. Os mesmos autores advertem que a composição de elementos traço nestas Mn-ilmenitas claramente difere daquelas de xenocristais de ilmenita presentes nestas mesmas rochas, sendo a Mn-ilmenita significativamente mais pobre em Cr, Ca, Ni, Nb e Ta (Castillo-Oliver *et al.*, 2017).

Kaminsky e Belosouva (2009) interpretam esta fase mineral como proveniente de zonas muito profundas (>660 km), em ambientes ricos em Ti. Os autores demonstraram que os cristais de picroilmenita dos carbonatitos de Jacupiranga, por exemplo, apresentam teores elevados de MnO (2,29-7,87%), mas também são ricos em Mg (MgO = 25,69-23,46%). Já os cristais de Mn-ilmenita dos kimberlitos e dos diamantes de Juína, têm conteúdos muito baixos de MgO (<0,3%), baixos teores de NiO (<0,12%), os quais ocorrem associados a elevadas concentrações de vanádio (0,21%<V<sub>2</sub>O<sub>3</sub><0,39%). Os cristais de picroilmenita normalmente observados em kimberlitos

apresentam teores mais elevados de MgO (3–9%), e o aumento de MnO ocorre por substituição do FeO, com valores entre 1 a 5% (Kaminsky & Belosouva, 2009). Ou seja, se comparadas às Mn-ilmenitas de Juína, haverá uma clara diferença.

No dique kimberlítico Aroeira, as análises semi-quantitativas demonstraram que os teores de Mn nas ilmenitas não variam significativamente do centro para a borda dos cristais (Figura 5D; Tabela 2), sendo observada uma variação máxima de apenas 0,3%. Os cristais estudados apresentam 0,7<MnO<2,2%, associados a altos teores de vanádio (0,3<V<sub>2</sub>O<sub>3</sub><0,4%), e baixos conteúdos de magnésio (0,0<MgO<0,3%). O níquel não aparece nas análises, sugerindo baixos valores. Estes teores são comparáveis aos reportados para as Mn-ilmenitas do Campo Juína (Kaminsky *et al.*, 2001; Kaminsky e Belosouva, 2009; Kaminsky, 2017), para os quais se advoga uma fonte mantélica super profunda (>660km), na transição manto-núcleo (Figura 6, Tabela 3).

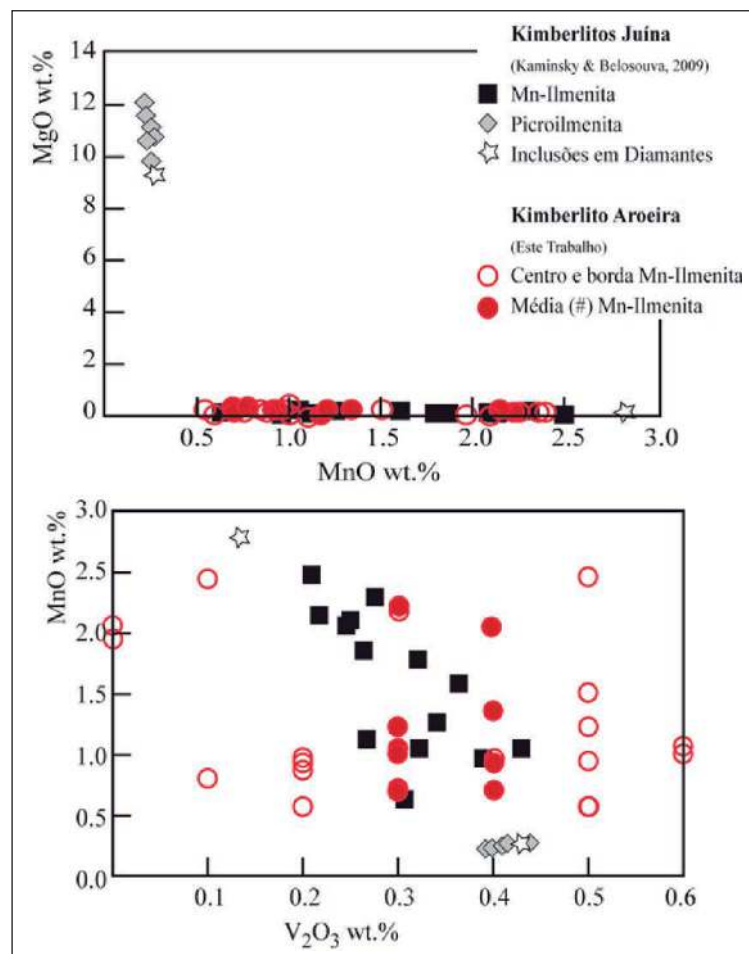


Figura 6 Gráfico de MnO vs MgO e MnO vs V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ilustrando as similaridades composicionais entre as Mn-ilmenitas dos kimberlitos Aroeira (Bahia) e Juína.

**Ilmenitas Manganíferas e suas Implicações para Kimberlitos Diamantíferos:  
Estudo de Caso no Dique Kimberlítico de Aroeira, Província Kimberlítica Nordestina, Bahia**  
*Matheus Andrade Nascimento; Débora Correia Rios; Ivanara Pereira Lopes dos Santos & Herbet Conceição*

Wt (%)	Aroeira (este trabalho)	Inclusões em Diamante (Juína)	Kimberlito Pandrea-7 (Juína)	Carbonatito Jacupiranga	Outras Rochas Ígneas	Rochas Máficas/ Ultramáficas Austrália
MnO	0,7 - 2,2	0,42 - 11,46	0,63 - 2,49	2,29 - 7,87	1,44 - 15,15	1,57 - 7,38
MgO	0,0 - 0,3	0,0 - 0,81	0,0 - 0,24	15,69 - 23,46	0,0 - 0,46	0,01 - 0,49
TiO <sub>2</sub>	51,3 - 56,1	50,13 - 56,15	55,49 - 57,79	55,83 - 59,24	46,23 - 52,02	42,80 - 52,66
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,3 - 0,4	0,13	0,21 - 0,39	-	0,06	0,01 - 0,43
NiO	-	0,0 - 0,12	0,0 - 0,2	4,56 - 6,80	-	-

Tabela 3 Composições de cristais de ilmenita associadas a rochas e minerais de origem mantélica, incluindo valores para o dique kimberlítico Aroeira. Modificado de Kaminsky, 2017.

Robles-Cruz *et al.* (2008), reportando análises de ilmenita dos kimberlitos de Lucapa (Angola), chamaram a atenção para a presença de ilmenita magnésiana como um mineral indicador de diamantes em kimberlitos. De acordo com estes autores, as ilmenitas primárias (ilmenita tipo I) em megacristais (xenocristais) caracterizam-se por enriquecimento em Cr e Fe, sendo comparável à composição das ilmenitas de xenólitos de peridotitos intercumulus associados a este mesmo kimberlito. Em contato com o magma kimberlítico, esta ilmenita tipo-I sofreria substituições difusas do Cr e do Fe por Mg, gerando uma ilmenita tipo II. Um terceiro tipo de ilmenita, de geração tardia e rica em Mn-Nb-Zr (tipo III), intercepta os dois primeiros tipos, reagindo com as primárias e secundárias. Contudo, na matriz destes kimberlitos, os autores reportam a presença de cristais euédricos de ilmenita, ricos em Mn-Nb-Zr e pobres em Mg-Fe, os quais não apresentam evidências de substituição química. Esta ilmenita (tipo IV) é similar às encontradas nos xenólitos de carbonatitos.

As Mn-ilmenitas aqui reportadas para o dique Aroeira seriam comparáveis às ilmenitas tipo-IV. A presença da ilmenita tipo-IV, rica em Mn e pobre em Mg, foi interpretada por Robles-Cruz *et al.* (2007) como indicadora de associações em kimberlitos onde os fluidos possuem baixa fugacidade de O<sub>2</sub>, uma condição necessária à preservação dos diamantes.

Considerando-se os teores de MnO, MgO e V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> aqui discutidos e observados nos cristais de ilmenita presentes em Aroeira, comparou-se estes resultados com ilmenitas dos kimberlitos Juína (Kaminsky & Belosouva, 2009), ou seja, o tipo IV de Robles-Cruz *et al.* (2008), uma fase típica de kimberlitos gerados em condições mantélicas profundas, associáveis

à presença e preservação de diamantes, e que não podem ser geradas por processos de substituição ou zoneamento químico.

Wyatt *et al.* (2004) compilou dados de ilmenitas de todo o mundo, incluindo os orangeítos (kimberlitos micáceos ou kimberlitos tipo II) de Serra Leoa e Liberia. Utilizando-se desta proposição de Wyatt *et al.* (2004; Figura 7), plotamos as análises de ilmenitas de Juína (Kaminsky *et al.*, 2001; Kaminsky & Belosouva, 2009), comparando-as com as do dique Aroeira. Novamente, as similaridades observadas sugerem que as condições do manto para a geração da ilmenita de Aroeira foram similares àquelas do manto parental da ilmenita Juína.

Os trabalhos prospectivos preliminares realizados em Aroeira e recentemente publicados pelo Projeto Diamante Brasil (Nanini *et al.*, 2017) corroboram esta associação genética com o ambiente típico de Juína, confirmado pela presença de diamantes neste dique, e reforçando seu potencial para a presença de diamantes de alta qualidade. Análises adicionais para elementos traços utilizando métodos mais robustos são sugeridos para o estabelecimento de uma conexão genética definitiva entre o manto gerador destes dois kimberlitos.

### Agradecimentos

Os autores expressam seus agradecimentos às equipes técnicas do Complexo Laboratorial Multiusuários, Galpão das Geociências, do Programa de Pós-Graduação em Geociências e Análise de Bacias, Universidade Federal de Sergipe e do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia da Bahia, em especial à

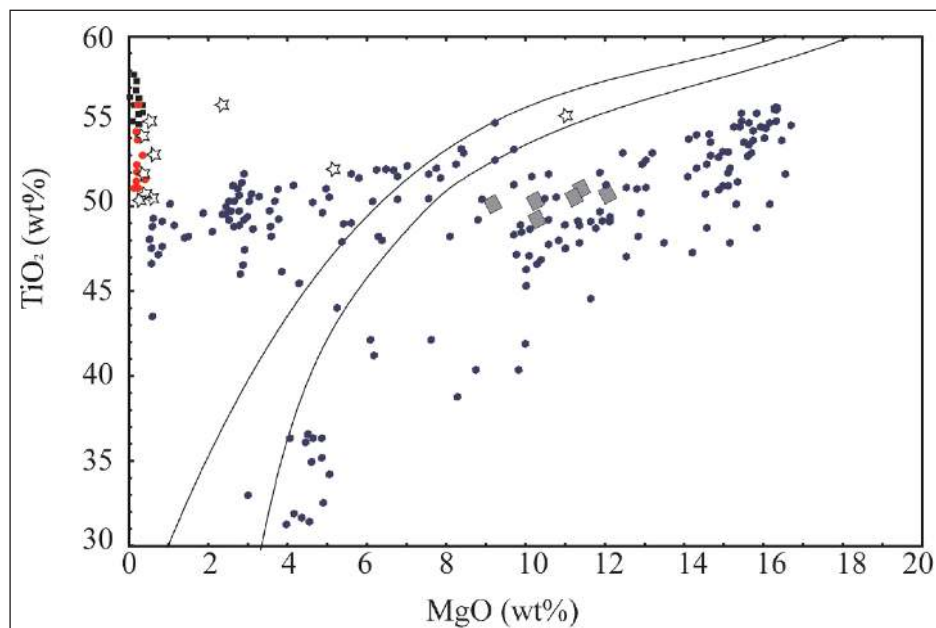


Figura 7 Dados das ilmenitas de Aroeira e Juína plotados no gráfico  $TiO_2$  vs  $MgO$ , segundo proposta de Wyatt *et al.* (2004). A curva delimita o campo de ilmenitas de kimberlitos tipo I das ilmenitas “não kimberlíticas”. Ilmenitas do Oeste da África – Serra Leoa e Libéria – estão plotadas em símbolos vazados.

técnica Carina Nascimento, onde foram realizadas as etapas analíticas de microscopia eletrônica. Ao Serviço Geológico do Brasil, pelo apoio às atividades de preparação de amostras e acesso à infraestrutura laboratorial, em especial à Dra Cristina Maria Burgos Gusmão de Carvalho. Ao Laboratório de Difractometria de Raios-X da Bruker do Brasil S/A. Este trabalho contou com recursos dos projetos GeoLogar: Ciências da Terra para a Sociedade (Processos 559013/2009-4 do CNPq e TO: PES 0056/2011 da FAPESB). Débora Rios (Processo 307554/2015-5) e Herbet Conceição (311008/2017-8) agradecem ao CNPq pelas bolsas de produtividade em pesquisa. Matheus Nascimento agradece ao CNPq/CAPES e FAPESB pelas bolsas de iniciação científica e do Programa Ciência sem Fronteiras. Este trabalho integra as atividades da monografia de conclusão de curso de Matheus A. Nascimento no Programa de Graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia.

## Referências

- Barbosa, J.S.F. 2003. O Cráton do São Francisco na Bahia: Uma Síntese. *Revista Brasileira de Geociências*, 33(1): 3-6.
- Conceição H. 1990. *Petrologie du Massif Syénitique d’Itiúba: contribution à l’étude minéralogique des roches alcalines dans l’État de Bahia (Brésil)*. Curso de Pós-Graduação em Geologia. Université Paris-Sud, Paris, Tese de Doutorado, 395p.
- Conceição H.; Rosa M.L.S.; Macambira M.J.B.; Marinho M.M.; Scheller T. & Rios D.C. 2003. 2,09 Ga - idade mínima da cristalização do Batólito Sienítico Itiúba: um problema para o posicionamento do clímax do metamorfismo granulítico (2,05-2,08 Ga) no Cinturão Móvel Salvador-Curaçá. *Revista Brasileira de Geociências*, 33(4):308-395.
- Delgado, I.M. & Souza, J.D. 1975. Projeto Cobre-Curaçá: relatório final: geologia econômica do distrito cuprífero do Rio Curaçá, Bahia, Brasil. Salvador: CPRM, 30: 15-17.
- Donatti Filho, J.P. 2013. *Petrogênese do campo kimberlítico Braúna, Cráton do São Francisco*. Programa de Pós-graduação em Geociências na Área de Geologia e Recursos Naturais. Universidade Estadual de Campinas, Tese de Doutorado, 79p.
- Donatti Filho, J.P.; Tappe, S.; Oliveira, E.P. & Heaman, L.M. 2013. Age and origin of the Neoproterozoic Braúna kimberlites: Melt generation within the metasomatized base of the São Francisco craton, Brazil. *Chemical Geology*, 353(1):19-35.
- Castillo-Oliver, M.; Melgarejo, J.C; Galí, S.; Pervov, V.; Gonçalves, A.O.; Griffin, W.L.; Pearson, N.J. & O’Reilly, S.Y. 2017. Use and misuse of Mg- and Mn-rich ilmenite in diamond exploration: A petrographic and trace element approach. *Lithos*, 292-293: 348-363.
- Kaminsky, F.; Zakharchenko, O.; Davies, R.; Griffin, W.; Khachatryan-Blinova, G. & Shiryaev, A. 2001. Superdeep diamonds from the Juína area, Mato Grosso State, Brazil. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 140:734-753.
- Kaminsky, F.V. & Belousova, E.A. 2009. Manganian ilmenite as kimberlite/diamond indicator mineral. *Russian Geology and Geophysics*, 50:1212-1220.
- Kaminsky, F.V. 2017. *The Earth’s Lower Mantle: Composition and Structure*. 1 Ed. West Vancouver, Springer, Canada: 330.
- Meyer, H.O.A. & Svisero, D.P. 1975. Mineral Inclusions in Brazilian Diamonds. *Physics and Chemistry of the Earth*, 9: 785-795.
- Mitchell, R.H. 1986. *Kimberlites: Mineralogy, Geochemistry and Petrology*. 1 Ed. Ontário, Plenum Press, Canada: 1 6-35.
- Nanini, F. I.; Silveira, F.V.; Cunha, L.M. & Oliveira, R.G. 2017. *Projeto Diamante Brasil: Áreas Kimberlíticas e Diamantíferas do Estado da Bahia*. Informe de Recursos Minerais, Série Pedras Preciosas, 13:15p.
- Nascimento, M.A. 2018. *Minerais indicadores de kimberlitos: Estudos sobre o Pipe Aroeira*. Monografia de Conclusão de Curso. Programa de Graduação em Geologia, Universidade Federal da Bahia, 75p.
- Otero, O.M.F. 2005. *Granitogênese paleoproterozoica e pós-transama-*

**Ilmenitas Manganíferas e suas Implicações para Kimberlitos Diamantíferos:  
Estudo de Caso no Dique Kimberlítico de Aroeira, Província Kimberlítica Nordestina, Bahia**  
*Matheus Andrade Nascimento; Débora Correia Rios; Ivanara Pereira Lopes dos Santos & Herbet Conceição*

- zônica no Cinturão móvel Salvador- Curaçá: Aspectos geológicos, petrográficos, geoquímicos e geocronológicos de corpos da Zona Axial.* Programa de Pós-Graduação em Geologia. Universidade Federal da Bahia, tese de doutorado, 161p.
- Pereira, R.S. 2007. *Cráton do São Francisco, Kimberlitos e Diamantes.* Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal de Brasília, Tese de Doutorado, 248p.
- Pereira, R.M. & Roza, T. 2008. Dispersão da Picroilmenita: Estudo de caso aplicado ao kimberlito Cancã, Ilhéua, Minas Gerais. *Revista de Geociências da UNESP*, 27(1):79-86.
- Rios, D.C.; Conceição, H.; Davis, D.W.; Plá Cid, J.; Rosa, M.L.S.; Macambira, M.J.B.; McReath, I.; Marinho, M.M. & Davis, W.J., 2007. Paleoproterozoic potassic ultrapotassic magmatism: Morro do Afonso Syenite Pluton, Bahia, Brazil. *Precambrian Research*, 154:1–30.
- Rios, D.C.; Davis, D.W.; Conceição, H.; Davis, W.J.; Rosa, M.L.S. & Dickin, A.P. 2009. Geologic evolution of the Serrinha nucleus granite–greenstone terrane (NE Bahia, Brazil) constrained by U–Pb single zircon geochronology. *Precambrian Research*, 170:175–201.
- Rios, D.C.; Davis, D.W.; Davis, W.J.; Conceição, H.; Rosa, M.L.S. & Dickin, A.P. 2011. Geochronology and tectonic evolution in the Serrinha Nucleus granite–greenstone terrane. *Anais GA-C-MAC*, Ottawa.
- Rios, D.C.; Davis, D.W.; Santos, I.P.L.; Huttner, M.B.; Davis, W.J.; Conceição, H. & Rosa, M.L.S. 2011. Proveniência de Zircão do Kimberlito Nélio, Núcleo Serrinha, Bahia. *In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE*, 24, Anais, 1: 357.
- Robles-Cruz, S.R.; Watangua .M. & Melgarejo.J.C. 2008. New Insights into the Concept of Ilmenite as an Indicator for Diamond Exploration, Based on Kimberlite Petrographic Analysis. *revista de La Sociedad española de mineralogía*, 9:205-206.
- Silva, R.F. 2017. Análise de amostras minerais com o difratômetro D2 Phaser. *Relatório Analítico 005/2017*, D.C. Rios/IGEO/UFBA. Bruker Brasil, 21p.
- Santos, I.P.L. & Rios, D.C. 2016. A Província Kimberlítica Nordestina, Bahia, Brasil. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOCIÊNCIAS*, 48, Rio Grande do Sul, 2016. Anais, Rio Grande do Sul, 1: 585.
- Santos, I.P.L.; Rios, D.C.; Silveira, F.V.; Fernandes, P.C.A. & Conceição, H. 2018. A Província Kimberlítica Nordestina, Bahia, Brasil: Aspectos Geológicos e Petrográficos. *Anuário de Geociências da Universidade Federal do Rio de Janeiro*, (submetido).
- Silveira, C.J.S.; Frantz, J.C.; Marques, J.C.; Queiroz, W.J.A.; Roos, S. & Peixoto, V.M. 2015. Geocronologia U-Pb em zircão de rochas intrusivas e de embasamento na região do Vale do Jacurici, Cráton do São Francisco, Bahia. *Brazilian Journal of Geology*, 45(3): 453-474.
- Towie, J.N. & Seet, L.H. 1995. Diamond laboratory techniques. *Journal of Geochemical Exploration*, 53: 205 – 2017.
- Wyatt, B.A.; Baumgartner, M.; Anckar, E. & Grutter, H.S. 2004. Compositional classification of “kimberlitic” and “non-kimberlitic” ilmenite. *Lithos*, 77: 819–840.