



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Geologia

Mariana Bessa Fagundes

**Caracterização Petrográfica e Geoquímica do Complexo Alcalino do Morro
de São João, Casimiro de Abreu-RJ**

Rio de Janeiro

2020

Mariana Bessa Fagundes

**Caracterização Petrográfica e Geoquímica do Complexo Alcalino do Morro de São
João, Casimiro de Abreu-RJ**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Geociências, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Tectônica, Petrologia e Recursos Minerais.

Orientadora: Prof.^a Dra. Eliane Guedes

Coorientador: Prof. Dr. Anderson Costa dos Santos

Rio de Janeiro

2020

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/C

F156 Fagundes, Mariana Bessa.
Caracterização petrográfica e geoquímica do Complexo Alcalino do Morro de São João, Casimiro de Abreu-RJ / Mariana Bessa Fagundes. – 2020.
105 f.: il.

Orientadora: Eliane Guedes.
Coorientador: Anderson Costa dos Santos.
Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Geologia.

1. Magmatismo – Barra de São João (Casimiro de Abreu, RJ) – Teses. 2. Petrologia – Barra de São João (Casimiro de Abreu, RJ) – Teses. 3. Geoquímica – Barra de São João (Casimiro de Abreu, RJ) – Teses. I. Guedes, Eliane. II. Santos, Anderson Costa dos. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Geologia. IV. Título.

CDU 552.3(815.3)

Bibliotecária responsável: Taciane Ferreira da Silva / CRB-7: 6337

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Mariana Bessa Fagundes

**Caracterização Petrográfica e Geoquímica do Complexo Alcalino do Morro de São
João, Casimiro de Abreu-RJ**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Análise de Bacias e Faixas Móveis, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Tectônica, Petrologia e Recursos Minerais.

Aprovada em 20 de março de 2020.

Orientadora: Prof.^a Dra. Eliane Guedes

Museu Nacional/UFRJ

Coorientador: Prof. Dr. Anderson Costa dos Santos

Faculdade de Geologia – UERJ

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Sérgio de Castro Valente

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Mauro Cesar Geraldos

Faculdade de Geologia – UERJ

Rio de Janeiro

2020

DEDICATÓRIA

Dedico essa dissertação à minha mãe, Marilza, e ao meu pai, Jorge (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Meu primeiro agradecimento vai à minha mãe, Marilza, que sempre me incentivou, direta e indiretamente, a ter autoconfiança de buscar o que eu quero. Ao meu pai e minha avó que me guardam, onde quer que eles estejam. A mulher que sou hoje é infinitamente grata por tudo.

Aos meus parceiros diários da sala 4017, mais conhecida como “A Sala da Pós”: Milhouse, Aris, Jaaaaay, Carolzinha (Rural), Edu, Isabella, Nath Cota. Com certeza tudo ficou mais leve com vocês. Obrigada pela troca nesses dois anos.

Às minhas *roomies* pela parceria nessa jornada louca de morar juntas: Larissa, Laís, Karina e Luane. Vocês merecem um prêmio, eu sei que não sou fácil! Obrigada por entender meu silêncio, minha falta de humor, falta de paciência ou, nas poucas vezes, minha euforia.

Às minhas irmãs: Rose, Larissa, Cássia e Amanda. Parte da minha conquista eu dedico a vocês pelo simples fato de fazerem parte dessa jornada. Obrigada por serem meu suporte.

À minha terapeuta Aline e a todo o grupo terapêutico das Terapretas. Sinceramente, sem vocês eu não conseguiria.

Aos meus amigos/parceiros de campo/parceiros de projeto da UFRRJ: Clauz, Alan, Julinho, Graciano, Amanda e, meu querido Valente. Não sei como agradeço por toda ajuda. Só sei falar: muito, muito obrigada!

Ao corpo técnico do Laboratório de Estudos Tectônicos - LET com a ajuda no geoprocessamento. Obrigada também ao professor Júlio Almeida pela ajuda e orientação na escrita dessa dissertação.

Ao meu principal incentivador a fazer o processo seletivo da UERJ, Henrique, e ao Felipe, meu parceiro de campo, meu “*hammerman*”. Obrigada pela ajuda!

Aos órgãos financiadores, principalmente à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro – FAPERJ.

E por último, mas não menos importante, agradeço aos meus queridos orientadores Eliane e Anderson. Obrigada pela paciência, crescimento pessoal e, principalmente, intelectual. Obrigada pela soma!

Quando a mulher negra se movimenta, toda a estrutura da sociedade se movimenta com ela.

Angela Davis - Professora, Filósofa, Ativista e ex integrante do Partido Comunista dos
Panteras Negras dos Estados Unidos.

RESUMO

FAGUNDES, Mariana Bessa. *Caracterização Petrográfica e Geoquímica do Complexo Alcalino do Morro de São João, Casimiro de Abreu-RJ*. 2020. 105 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

O Complexo Alcalino do Morro de São João, situado no distrito de Barra de São João, Casimiro de Abreu-RJ, porção leste do estado do Rio de Janeiro é composto por rochas alcalinas, sendo o único no estado que possui ocorrência de rochas félsicas, máficas e ultramáficas relacionando-se entre si exibindo texturas que evidenciam interação entre líquidos magmáticos félsicos e máficos. No presente trabalho são apresentados dados petrográficos incluindo estudo de texturas de mistura magmática e assimilação observadas ao longo do maciço e dados litogeoquímicos com intuito de gerar uma análise detalhada dos processos petrogenéticos e evolução magmática que geraram esse corpo rochoso. As tipificações petrográficas basearam-se nas descrições detalhadas nas escalas macro e microscópica somadas à química mineral elementar com análises de microsonda eletrônica em cristais de feldspato, anfibólio, piroxênio e granada. Para este método analítico foi utilizado o micro-analisador de sonda eletrônica JEOL JXA-8230. A litogeoquímica baseou-se nas análises dos elementos maiores e traços a níveis classificatórios e discriminatórios somadas à modelagem geoquímica de elementos traços para determinação do percentual de cristalização fracionada e mistura magmática. A análise de rocha total dos elementos maiores deu-se pelo método ICP-AES e para os elementos-traço ICP-MS. Os litotipos principais mapeados foram classificados como hornblenda gabro, hornblenda sienito com nefelina, sienito, sienito com nefelina, nefelina sienito e fonolito. A partir dessas classificações, foram definidas três fácies segundo características petrográficas similares dos litotipos mapeados. São elas: Fácies Melanocrática, representada pelo hornblenda gabro, Fácies Mesocrática, hornblenda sienito com nefelina e Fácies Leucocrática, representada principalmente, pelo nefelina sienito. A mineralogia principal encontrada nessas rochas consiste em nefelina, feldspato alcalino (albita), plagioclásio (bytownita), anfibólios (Fe-kaersutita, Fe-pargasita e sadanagaíta), clinopiroxênio, titanita, magnetita, ocorrência de granada (grossulária), apatita e zircão. Com exceção do fonolito afaníticos, as rochas em questão são faneríticas, equigranulares e de granulometria média. São rochas potássicas, metaluminosas e foram duas séries geoquímicas distintas. Uma saturada em sílica com hiperstênio + olivina normativos e uma segunda moderada a fortemente a insaturada em sílica com nefelina + diopsídio (por vezes olivina) normativos. As razões $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$, $(\text{La}/\text{Zr})_N$ e $(\text{Ti}/\text{Eu})_N$ corroboram com a hipótese de que as rochas máficas e ultramáficas do Morro de São João serem produtos de uma fusão parcial de um manto peridotítico metassomatizado com fluidos ricos em CO_2 . Já as rochas félsicas são interpretadas como um pulso de um líquido mais evoluído. Com os cálculos de modelagem geoquímica de elementos-traço, chegou-se a hipótese principal de que o Complexo Alcalino do Morro de São João é o resultado de uma interação entre duas câmaras magmáticas com histórias evolutivas distintas. Tanto as rochas máficas e félsicas, incluindo os fonolitos, contém indícios de assimilação, tanto da encaixante silicática, quanto de uma outra rocha alcalina com um caráter geoquímico distinto.

Palavras-Chave: Magmatismo Alcalino. Assimilação Crustal. Mistura Magmática.

ABSTRACT

FAGUNDES, Mariana Bessa. *Petrographic and Geochemical Characterization of Morro de São João Alkaline Complex, Casimiro de Abreu-RJ*. 2020. 105 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

The Morro de São João Alkaline Complex is located at Barra de São João, district of Casimiro de Abreu-RJ, eastern portion of the Rio de Janeiro state. It is composed of alkaline rocks, being the only one in the state where occurs the interaction of felsic, mafic and ultramafic rocks relating each other and exhibiting textures that results of interaction between felsic and mafic magmatic magmas. This work presents petrographic data including studies of textures of magmatic mixture and assimilation that are observed throughout the massif and litho-geochemical data to generate a detailed analysis of the petrogenetic processes and magmatic evolution that generated this massif. Petrographic characterization was based on detailed descriptions, in the macro and microscopic scales, added to elementary mineral chemistry with electron probe analysis on feldspar, amphibole, pyroxene and garnet crystals. The JEOL JXA-8230 electronic probe micro-analyzer was used for this analytical method. The litho-geochemistry was based on the analysis of the major and trace elements in a classificatory and discriminatory levels added to the geochemical modeling of trace elements to determine the percentage of fractional crystallization and magmatic mixture. The whole rock analysis of the major elements was done by the ICP-AES method and for the trace elements ICP-MS method. The main lithotypes mapped were classified as gabbro hornblende, syenite hornblende with nepheline, syenite, syenite with nepheline, nepheline syenite and phonolite. From these classifications, three facies were defined according to similar petrographic characteristics of the mapped lithotypes: Melanocratic Facies, represented by gabbro hornblende, Mesocratic Facies, syenite hornblende with nepheline and Leucocratic Facies, represented mainly by syenite nepheline. The main mineralogy consists in nepheline, alkaline feldspar (albite), plagioclase (bytownite), amphiboles (Fe-kaersutite, Fe-pargasite and sadanagaite), clinopyroxene, titanite, magnetite, garnet (grossular), apatite and zircon. With the exception of the aphanitic phonolites, all rocks in question are phaneritic, equigranular and medium granulometry. They are potassic, metaluminous and form two distinct geochemical series: the first one is silica-saturated with normative hypersthene + olivine and the second one is moderate to strongly silica-unsaturated with nepheline + diopside (sometimes olivine). The ratios $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$, $(\text{La}/\text{Zr})_N$ and $(\text{Ti}/\text{Eu})_N$ corroborate with the hypothesis that the mafic and ultramafic rocks of Morro de São João are products of a partial fusion of a metasomatized peridotitic mantle with CO_2 rich fluids. Felsic rocks are interpreted as a pulse of a more evolved liquid. By means of the calculations of geochemical modeling of trace elements, the main hypothesis is that the Morro de São João Alkaline Complex is a result of an interaction between two magmatic chambers with different evolutionary histories. Both mafic and felsic rocks, including phonolites, contain signs of assimilation of the siliceous basement and of another alkaline rock with a distinct geochemical character.

Keywords: Alkaline Magmatism. Crustal Assimilation. Magmatic Mixture.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de localização dos principais maciços alcalinos no Estado do Rio de Janeiro.....	16
Figura 2 – Mapa de localização do Morro de São João no município de Casimiro de Abreu-RJ.....	18
Figura 3 – Foto panorâmica do Morro de São João.....	19
Figura 4 – Mapa simplificado dos compartimentos tectônicos da Faixa Ribeira.....	21
Figura 5 – Fotomontagem com os mapas geológicos do Morro de São João.....	28
Figura 6 – Demonstração do quarteamento manual feito na amostra de pseudoleucita para, em seguida, ser pulverizada no moinho de bolas.....	32
Figura 7 – Foto do equipamento utilizado para pulverizar as amostras.....	32
Figura 8 – Equipamento utilizado para gerar as fotomicrografias.....	33
Figura 9 – Aparelho Jee-420 <i>Vacuum Evaporator</i> (a) e aparelho Jeol JXA-8230 <i>Electron Probe Microanalyzer</i> utilizado para a obtenção e leitura de dados (b).....	34
Figura 10 – Exemplos de exposição dos litotipos do Morro de São João.....	39
Figura 11 – Fotomontagem do contato de gnaiss com o dique de traquito.....	39
Figura 12 – Tipos de relações estruturais dos litotipos encontrados no Morro de São João	40
Figura 13 – Evidência de assimilação dentro da “Zona de Assimilação” no Morro de São João.....	41
Figura 14 – Traçados dos perfis usando a técnica de perfis topográficos (<i>swath profiles</i>) por meio de dados do modelo SRTM (<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>) e da ferramenta “ <i>SwathProfiler</i> ”, um <i>add-in</i> desenvolvido por Pérez-Peña et al., (2017).....	43
Figura 15 – Perfis traçados pelo modelo SRTM (<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>) e da ferramenta “ <i>SwathProfiler</i> ”, <i>add-in</i> desenvolvido por Pérez-Peña et al., (2017).....	44
Figura 16 – Lineamento WNW-ESSE observado pelas imagens aéreas e o sistema de drenagem radial centrífugo e centrípeto característico do Morro de São João.	45
Figura 17 – Principais litotipos encontrados no Morro de São João	47

Figura 18 – Fotomicrografia das principais feições das rochas do Morro de São João.....	49
Figura 19 – Gráfico de dispersão demonstrando a variação da composição dos anfibólios nas amostras de hornblenda gabro, hornblenda sienito com nefelina e nefelina sienito.....	50
Figura 20 – Diagrama ternário demonstrando a variação da composição dos plagioclásios nas amostras de hornblenda gabro e nefelina sienito.....	51
Figura 21 – Diagrama ternário demonstrando a variação da composição dos piroxênios nas amostras de hornblenda gabro e nefelina sienito.....	52
Figura 22 – Diagrama demonstrando a composição das granadas nas amostras de nefelina sienito.....	52
Figura 23 – Classificação geoquímica das rochas do Morro de São João segundo critério de saturação em sílica. Cada família possui um campo específico representada pelas cores segundo legenda abaixo.....	54
Figura 24 – Diagrama Total Álcali vs. Sílica (COX et al 1979) para as rochas do Morro de São João.....	57
Figura 25 – Rochas do Morro de São João classificadas em diagrama que utiliza o índice de Shand (1943).....	58
Figura 26 – Gráfico Na ₂ O vs. K ₂ O proposto por Middelmost (1975) para as rochas do Morro de São João demonstrando a tendência predominantemente potássica...	58
Figura 27 – Diagramas de variação para elementos maiores das amostras do Morro de São João, Tanguá, Ilha de Cabo Frio e Itatiaia.....	60
Figura 28 – Diagramas de variação para elementos traços das amostras do Morro de São João, Tanguá, Ilha de Cabo Frio e Itatiaia.....	62
Figura 29 – Diagrama classificatório Nb/Y vs. Zr/Ti proposto por Winchester & Floyd (1977), modificado por Pearce (1993) para as rochas do Morro de São João, Tanguá, Ilha de Cabo Frio e Itatiaia.....	63
Figura 30 – Diagramas multielementares de Elementos Terras Raras normalizados para o Condrito segundo Boynton (1984) do Morro de São João comparando todos os grupos.....	65

Figura 31 – Diagramas multielementares de Elementos Terras Raras normalizados para o Condrito segundo Boynton (1984) para o Morro de São João.....	65
Figura 32 – Diagramas multielementares de Elementos Traços normalizados para o Manto Primitivo segundo McDonough & Sun (1995) para o Morro de São João.....	67
Figura 33 – Gráfico SiO ₂ vs. CaO/Al ₂ O ₃ comparando as razões de CaO/Al ₂ O ₃ entre as rochas do Morro de São João sob possível influência de fluidos metassomatizados ricos em CO ₂ representado pela faixa cinza.....	68
Figura 34 – Dados das amostras do maciço da Ilha de Cabo Frio (Figura 34a e Figura 34b) de Oliveira (2019), Itatiaia (Figura 34c e Figura 34d) de Rosa (2017), e Tanguá (Figura 34e e Figura 34f) de Motoki (2015).....	69
Figura 35 – Diagrama K ₂ O/Na ₂ O vs. SiO ₂ e Ba/Sr vs. Rb/Sr para as rochas do Morro de São João.....	77
Figura 36 – Diagramas multielementares de Elementos Terras Raras normalizados para o Condrito segundo Boynton (1984) do Morro de São João com apenas amostras da autora: CAMSJ30, CAMSJ05, CAMSJ11, CAMSJ01, CAMSJ37 e CAMSJ29.....	78
Figura 37 – Gráfico com os resultados do modelo de cristalização fracionada mostrados na Tabela 8.....	79
Figura 38 – Modelo geoquímico de formação de um magma híbrido calculado (ou modelo) comparado a um magma híbrido real representado por amostra de sienito CAMSJ01 do Morro de São João.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Divisão e classificação das principais fácies encontradas no Morro de São João.....	31
Tabela 2 – Dados litogeoquímicos dos elementos maiores do Morro de São João.....	33
Tabela 3 – Resultado do cálculo da norma CIPW para as rochas do Morro de São João.....	34
Tabela 4 – Esquema de classificação dos grupos estabelecidos neste trabalho para as rochas do Morro de São João.....	34
Tabela 5 – Valores do cálculo do Índice Agpaítico (IA) das rochas do Morro de São João com resultado para miaskíticas para todas as amostras.....	35
Tabela 6 – Tabela com valores das razões dos elementos terras raras do Morro de São João normalizadas para o condrito segundo Boynton (1984).....	66
Tabela 7 – Tabela com valores das razões dos elementos traços do Morro de São João normalizados para o Manto Primitivo segundo McDonough & Sun (1995)...	68
Tabela 8 – Tabela com os cálculos de modelagem geoquímica para testar a hipótese de cristalização fracionada.....	72
Tabela 9 – Tabela com os cálculos de modelagem geoquímica para testar a hipótese de hibridização.....	74
Tabela 10 – Valores dos cálculos da quantidade de mistura e covariância corroborando com a hipótese de hibridização.....	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Acm	Actinolita
ACTLABS	<i>Activation Laboratories Ltda</i>
AFC	<i>Assimilation Fractional Crystallization</i>
ALS	<i>Australian Laboratory Services</i>
Ap	Apatita
BSE	<i>Backscattering Electrons</i>
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral Laboratório
CIPW	Sigla dos sobrenomes dos autores formuladores desta norma: Cross, Iddings, Pirrson e Washington
Crn	Corindum
Cro	Cromita
Dio	Diopsídio
DRM	Departamento de Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro - Serviço Geológico do Estado do Rio de Janeiro
EDS	<i>Energy Dispersive System</i>
ETRL	Elementos Terras Raras Leves
ETRP	Elementos Terras Raras Pesados
ETRS	Elementos Terras Raras
Ga	Bilhões de Anos
HFSE	<i>Hight Field Strenght Elements</i>
Hy	Hiperstênio
IA	Índice Agpaítico
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICP-AES	<i>Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectrometry</i>
ICP - MS	<i>Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry</i>
Ilm	Ilmenita
IUGS	<i>International Union of Geological Sciences</i>
kV	Quilovolt
LABSONDA	Laboratório de Difração de Raios X e Microsonda Eletrônica

Lar	Larnita
LET	Laboratórios de Estudos Tectônicos
LGPA	Laboratório Geológico de Processamento de Amostras
LILE	<i>Large Ion Lithophile Elements</i>
LOI	<i>Loss on Ignition</i>
Ltda	Limitada
Ma	Milhões de Anos
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
Mg	Magnetita
mm	Milímetros
MSJ	Morro de São João
Ne	Nefelina
N-MORB	<i>(Normal) Middle Ocean Ridge Basalt</i>
OIB	<i>Ocean Island Basalts</i>
OI	Olivina
Or	Ortoclásio
PASM	Província Alcalina da Serra do Mar
Plg	Plagioclásio
Qtz	Quartzo
RPPN	Reserva Particular do Patrimônio Natural
SE	<i>Secondary Electrons</i>
TAS	Total Álcali vs.Sílica
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
UNESP	Universidade Estadual Paulista
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UFRRJ	Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
UTM	Universal Transversa de Mercator
% peso	Porcentagem em peso
Wo	Wollastonita
Zr	Zircão
μA	Microampère

SUMÁRIO

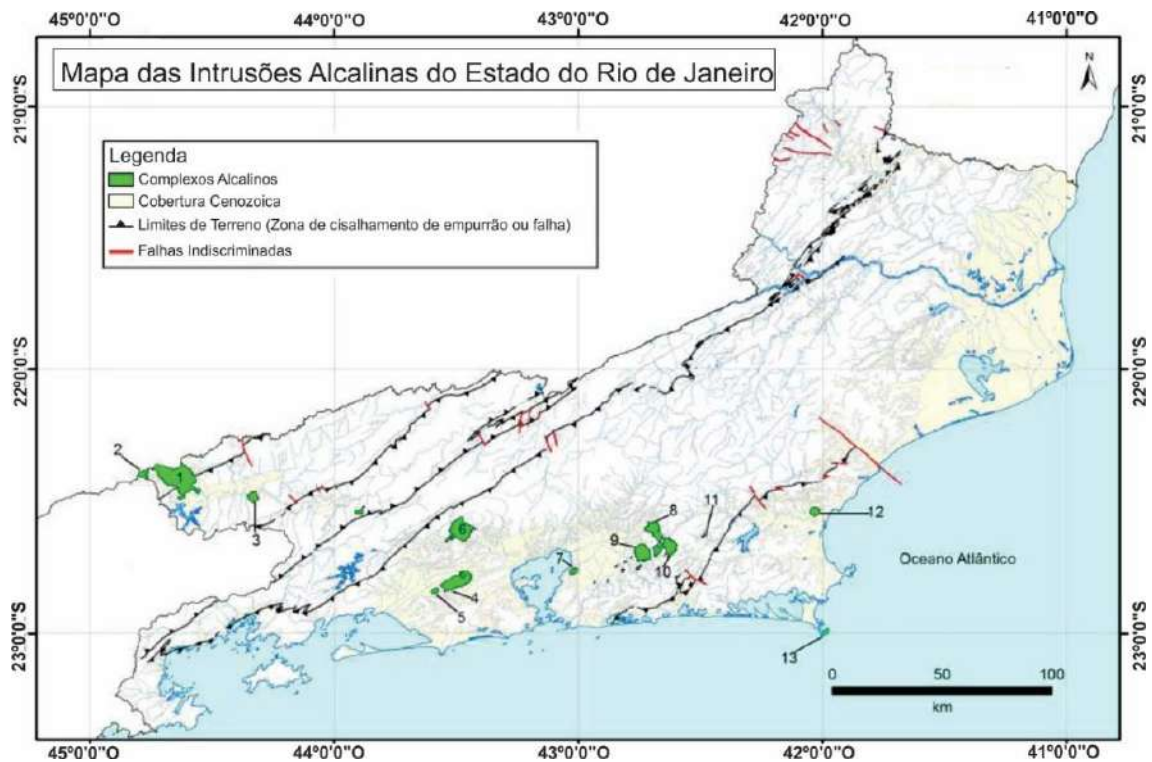
	INTRODUÇÃO	16
1	CONTEXTO GEOLÓGICO E MAGMATISMO	20
1.1	A Faixa Ribeira e o Terreno Cabo frio	20
1.2	O Magmatismo Alcalino do Sudeste Brasileiro	21
1.3	Classificação Química e Mineralógica do Magmatismo Alcalino	23
2	METODOLOGIA	26
2.1	Atividades e Procedimentos	26
2.1.1	<u>Revisão Bibliográfica</u>	26
2.1.2	<u>Trabalho de Campo</u>	29
2.1.2.1	Técnica de Mapeamento.....	29
2.1.3	<u>Preparação de Amostras</u>	30
2.1.3.1	Análise de Rocha Total.....	32
2.3.3	<u>Análise Petrográficas</u>	30
2.3.3.1	Análise Macroscópica.....	30
2.2	Materiais e Métodos	33
2.2.1	<u>Microscopia Óptica</u>	33
2.2.2	<u>Microsonda Eletrônica</u>	34
2.3	Tratamento de Dados	35
2.3.1	<u>Análises Geomorfológicas</u>	35
2.3.2	<u>Análise de Química Mineral</u>	35
2.3.3	<u>Análise Petrográficas</u>	36
2.3.3.1	Análise Macroscópica.....	36
2.3.3.2	Análise Microscópica.....	36
2.3.4	<u>Análise Litogeoquímica</u>	37
2.3.5	<u>Cálculos de Modelagem Geoquímica</u>	37
3	RESULTADOS	38
3.1	Interpretação de Campo	38
3.2	Geomorfologia	42
3.3	Petrografia	45
3.3.1	<u>Descrição Macroscópica</u>	46

3.3.1.1	Rochas das Fácies Leucocráticas.....	46
3.3.1.2	Rochas das Fácies Mesocráticas.....	46
3.3.1.3	Rochas das Fácies Melanocrática.....	47
3.3.2	<u>Descrição Microscópica</u>	48
3.4	Química Mineral	50
3.5	Litogeoquímica	53
3.5.1	<u>Classificação Analítica</u>	53
3.5.2	<u>Disgramas de Variação</u>	59
3.5.3	<u>Elementos Terras Raras</u>	64
3.5.4	<u>Elementos Traços</u>	66
3.6	Modelagem Geoquímica	70
4	DISCUSSÕES	75
4.1	Interpretação dos Processos Petrogenéticos	75
4.1.1	<u>Arquitetura e Concentricidade do Maciço</u>	75
4.1.2	<u>Interpretação a partir dos Dados Petrográficos e Litogeoquímicos</u>	76
4.1.3	<u>Indícios da Fonte Geradora</u>	81
4.1.4	<u>Análise do Modelo Evolutivo</u>	82
	CONCLUSÕES	84
	REFERÊNCIAS	87
	APÊNDICE A – Tabela de Pontos	97
	APÊNDICE B – Tabelas Microsonda Eletrônica	100
	APÊNDICE C – Tabela Elementos Traço	103
	APÊNDICE D – Mapa de Pontos do Morro de São João	104
	APÊNDICE E – Mapa Geológico do Morro de São João	105

INTRODUÇÃO

No Estado do Rio de Janeiro afloram corpos alcalinos que fazem parte da Província Alcalina da Serra do Mar (PASM) e que datam desde o Cretáceo até o Paleógeno (ULBRICH & GOMES, 1981). Em PASM, as rochas alcalinas de caráter félsico mapeadas (Figura 1), incluindo aquelas do Morro de São João, são geralmente insaturadas em sílica, sendo classificadas como sienito, alcalisienitos, monzonitos, sienito com nefelina, nefelina sienito e fonolito (MOTA, 2012; OLIVEIRA, 2019).

Figura 1 – Mapa de localização dos principais maciços alcalinos no Estado do Rio de Janeiro.



Legenda: 1 – Itatiaia; 2 – Passa Quatro; 3 – Morro Redondo; 4 – Mendanha; 5 – Marapicu; 6 – Tinguá; 7 – Itaúna; 8 – Soarinho; 9 – Tanguá; 10 – Rio Bonito; 11 – Morro dos Gatos; 12 – Morro de São João; 13 – Ilha de Cabo Frio.

Fonte: Modificado de Heilbron et al., (2016).

A hipótese mais aceita para a gênese do líquido máfico precursor dos magmas geradores das rochas félsicas supracitadas é a de fusão de materiais metassomatizados do manto litosférico atrelada ou não à presença de plumas mantélicas (NIU et al., 2012) ou a pouca quantidade de fusão parcial de litosfera oceânica metassomatizada por CO₂ (PILET, 2005). A evolução para os componentes intermediários alcalinos do Complexo Alcalino do Morro de São João é

decorrente da diferenciação do magma máfico que ocorre por duas formas diferentes: cristalização fracionada, sem assimilação concomitante, e assimilação, sem cristalização fracionada concomitante, da rocha encaixante da crosta continental (SICHEL, 2008). Motoki (2014) afirma que a evolução geoquímica dos magmas alcalinos dos maciços do Estado do Rio de Janeiro pode ocorrer em três estágios: 1) cristalização de leucita no campo de leucita normativa; 2) cristalização de feldspato alcalino na linha cotética; 3) assimilação da crosta continental e a consequente transformação da composição de insaturada em supersaturada, cruzando a barreira térmica.

Esta dissertação discute a hipótese de geração dos líquidos félsicos por processos de mistura magmática com *mingling* e *mixing*. Este modelo evolutivo é proposto para o maciço alcalino de Ditrău (*Ditrău Alkaline Massif* [DAM]) localizado em Cárpatos, leste Europeu (KIRI et al., 2018).

O Complexo Alcalino do Morro de São João (MSJ) está localizado no distrito de Barra de São João, município de Casimiro de Abreu, Região dos Lagos no estado do Rio de Janeiro. Este corpo rochoso intrude no Terreno Cabo Frio, composto por gnaisses e migmatitos e inserido no contexto da Faixa Ribeira (HEILBRON et al., 2016; HEILBRON et al., 2004; OLIVEIRA et al., 1952). O Complexo Alcalino do Morro de São João apresenta variedades faciológicas de sienitos, além da ocorrência de pseudoleucita, rochas hipabissais (MOTA, 2009 e 2012) e uma variedade de rochas máficas e ultramáficas sem olivina, algumas delas com texturas cumuláticas (BROTZU et al., 2007).

O Projeto Estudo dos Corpos Alcalinos da Região Sudeste desenvolvido pelo Setor de Petrografia do Museu Nacional-UFRJ, em colaboração com o Programa de Pós-graduação de Geociências da Universidade do Estado do Rio de Janeiro e do Programa de Pós-graduação em Modelagem e Evolução Geológica da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, tem como objetivo gerar bases cartográficas detalhadas dos maciços, além de expandir o entendimento da gênese desses corpos e, por conseguinte, entender a evolução do magmatismo alcalino no sudeste brasileiro.

As rochas do Morro de São João são de caráter potássico, metaluminosas e miaskíticas que formam duas séries geoquímicas distintas: saturada e moderadamente a fortemente insaturada em sílica. A partir das características geoquímicas, grupos foram subdivididos para uma análise petrogenética e evolutiva do magmatismo alcalino. As relações vistas foram interpretadas como interação entre duas câmaras magmáticas onde o material félsico com temperaturas elevadas intrudiu um material máfico caracterizando um magmatismo bimodal

com assimilação, hipótese corroborada por dados de campo e razões de elementos maiores e traços normalizados para o manto primitivo.

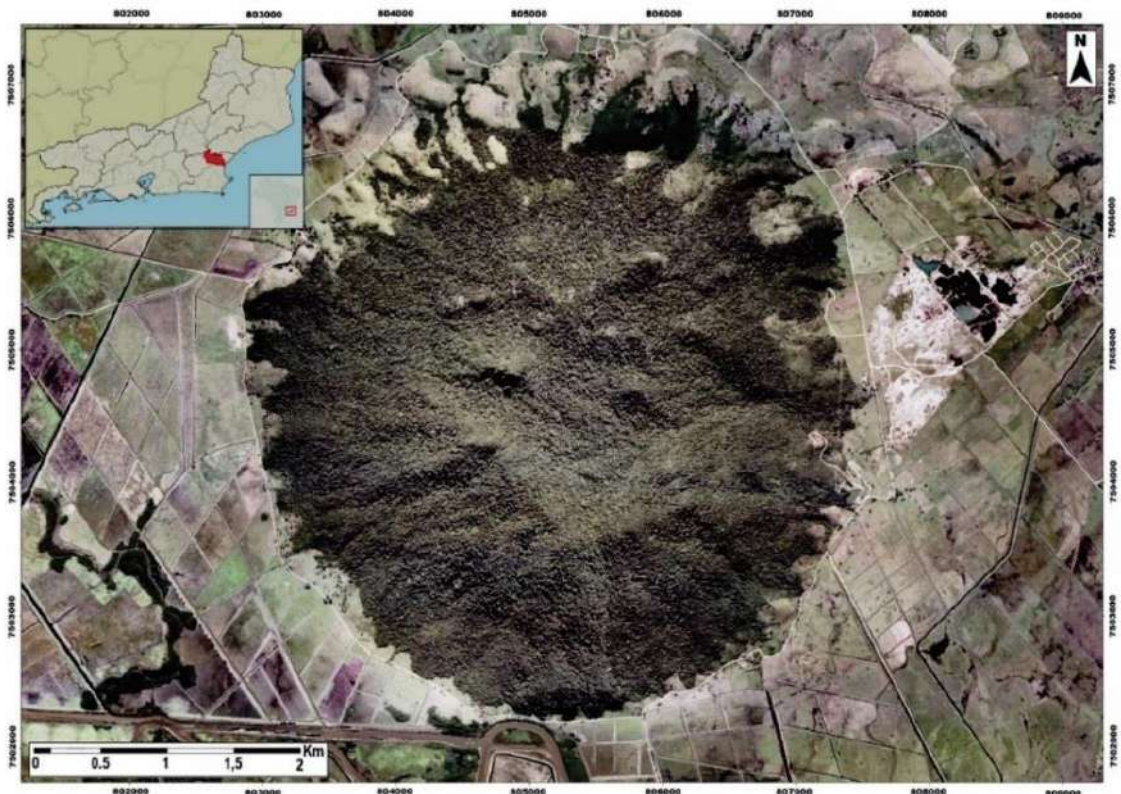
Localização

O Morro de São João está localizado no distrito Barra de São João, município de Casimiro de Abreu (Figura 2), Estado do Rio de Janeiro. O principal acesso é pelo bairro Palmital do município de Rio das Ostras. Chega-se em Rio das Ostras, a partir da cidade do Rio de Janeiro, percorrendo aproximadamente 166 km da rodovia federal BR 101, sentido leste.

O maciço corresponde a um corpo circular de aproximadamente 13 km² e 730 m de altura. É uma área de unidade de conservação (RPPN - Reserva Particular do Patrimônio Natural) circundado por propriedades particulares onde há predomínio de atividade agropecuária.

A área é banhada pelo Rio São João de onde partem canais de irrigação que fornecem água para toda a região circundante do maciço. Há pontos de extração de areia nos depósitos recentes ao redor do maciço.

Figura 2 – Mapa de localização do Morro de São João no município de Casimiro de Abreu-RJ.



Fonte: Projeto RJ-25 do IBGE e Google (acessado dia 13 de agosto de 2019).

Fisiografia

A área estudada situa-se mesorregião das Baixadas Litorâneas que se subdivide na microrregião Bacia de São João (IBGE, 2019).

O relevo pode ser dividido em quatro domínios morfológicos (DRM, 1998): um formado pelos tabuleiros e falésias, onde aparece a Formação Barreiras, cujas altitudes variam desde o nível do mar até aproximadamente 80m. O segundo formado por colinas baixas e arredondadas, esculpidas sobre os gnaisses do Pré-Cambriano, onde as altitudes variam entre 10m e 100m. Um terceiro representado pelas restingas e planícies aluvionares dos rios São João e Una e seus principais afluentes, com altitudes variando desde o nível do mar até 10m. Um quarto tipo é representado pelo Morro de São João, que tem sua base no nível das restingas e planícies aluvionares, atingindo altitude de aproximadamente 730 metros. Trata-se de uma elevação cônica com um topo íngreme e uma depressão entre o topo e as bordas (Figura 3).

A hidrografia no Morro de São João pode ser descrita como Radial Centrífuga (DRM, 1998), tratando-se de cursos d'água onde há um ponto de origem, irradiando-se da área central e mais altas do morro até a sua base.

Figura 3 – Foto panorâmica do Morro de São João.



Fonte: A autora, 2019.

Objetivo

Este trabalho tem como objetivo geral caracterizar petrográfica e geoquímicamente, de forma detalhada, as litologias afim de elucidar os principais processos magmáticos responsáveis pela formação do Morro de São João.

1 CONTEXTO GEOLÓGICO E MAGMATISMO

1.1 A Faixa Ribeira e o Terreno Cabo Frio

No sudeste brasileiro, o Cráton do São Francisco é limitado por uma província estrutural desenvolvida durante o Ciclo Brasileiro (ALMEIDA et al., 1976) que é conhecida como Província Mantiqueira, onde se estabelecem as Faixas Araçuaí e Ribeira (HEILBRON et al., 2004).

A Faixa Ribeira (ou Orógeno Ribeira) é uma faixa de dobramentos com granitogênese e metamorfismo brasileiros que afetam sedimentos mesoproterozoicos a neoproterozoicos e o embasamento Paleoproterozoico (ALMEIDA et al., 1976). Sua compartimentação tectônica compreende quatro terrenos tectono-estratigráficos: Ocidental, Oriental, Paraíba do Sul/Embu e Cabo Frio. (TUPINAMBÁ, 2007).

A área de estudada está inserida no Terreno Cabo Frio (Figura 4), cuja etapa de colisão foi datada em 520 Ma (535-510 Ma). O Terreno Cabo Frio compreende ortognaisses de composição tonalítica a granodiorítica, com estrutura variada, com lentes e enclaves de rochas dioríticas e anfibolíticas (HEILBRON et al., 2016). O terreno aflora no extremo leste do Estado do Rio de Janeiro.

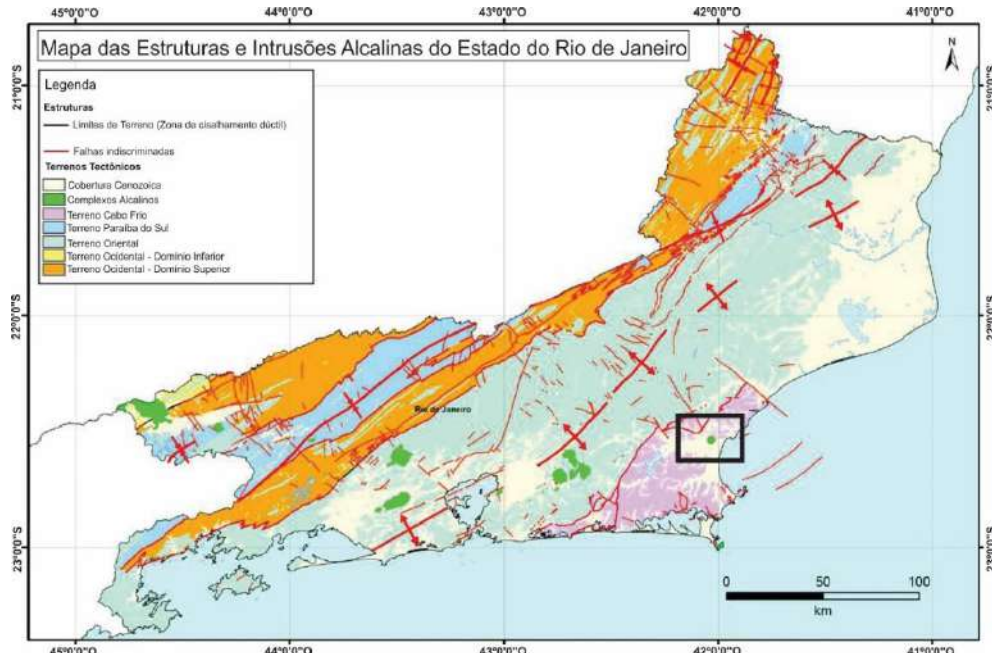
O Terreno Cabo Frio é constituído por embasamento transamazônico e duas unidades metassedimentares; as unidades Búzios e Palmital. Seu embasamento é composto por ortognaisses de idade paleoproterozóica (2,03-1,96 Ga) de composição granítica a granodiorítica, cortados por corpos tabulares de ortoanfibolitos do tipo N-MORB de idade não definida. Uma unidade composta por granada-anfibolitos, que também possui afinidade geoquímica do tipo N-MORB (SCHMITT et al., 2004; 2001) está sobreposta tectonicamente ao embasamento.

A sequência supracrustal do terreno é constituída por cianita-silimanita-gnaisses, granada-diopsídio-anfibolitos e ortoanfibolitos, além de rochas calciossilicáticas e silimanita gnaisses com camadas alternadas de metapelitos interpretados como metaturbiditos, que correspondem às sucessões Búzios e Palmital (SCHMITT, 2001; FONSECA, 1984).

O Terreno Cabo Frio apresenta foliação predominantemente subhorizontal, lineações que variam no quadrante NW-SE, mergulhos de baixo ângulo para SSE da foliação com lineação

down dip, distinguindo-se de outros compartimentos da Faixa Ribeira sob o ponto de vista estrutural e tectônico (HEILBRON et al., 2016).

Figura 4 – Mapa simplificado dos compartimentos tectônicos da Faixa Ribeira.



Legenda: No mapa estão suas principais estruturas e localização dos principais maciços alcalinos do Estado do Rio de Janeiro, com destaque para o Morro de São João.

Fonte: Modificado de Heilbron et al., (2016).

1.2 O Magmatismo Alcalino do Sudeste Brasileiro

Atividades magmáticas alcalinas na Terra são datadas desde o pré-Cambriano até os dias de hoje e estão associadas a vários ambientes tectônicos tais como intraplaca oceânico (ilhas oceânicas), continentais (lineamentos e riftes); zonas de colisão (tanto margens continentais como oceânicas) e, mais raramente, às dorsais oceânicas (SCHMINCKE, 1998).

Boa parte do magmatismo alcalino no Brasil é mapeado como diques e corpos como *plugs* e *stocks*, e, mais raramente, como derrames (VALENÇA, 1975; RICCOMINI et al., 1983; AMARAL et al., 1967; ALMEIDA, 1986, 1996; THOMAZ FILHO et al., 2005). As idades variam, principalmente, entre o Mesozoico e o Cenozoico, após a estabilização Cambro-Ordoviciano ocorrida na Plataforma Sul Americana. As intrusões alcalinas tabulares estão sempre associadas às falhas normais que, por vezes, também estão preenchidas por brechas

silicificadas, estando normalmente posicionadas nas bordas de grábens cenozoicos (HEILBRON et al., 2016).

No Jurássico Superior a região sul-atlântica foi sujeita à denominada Reativação Wealdeniana (ALMEIDA, 1967), também chamada de Ativação Mesozoica (ALMEIDA, 1976) ou Evento Sul-Atlântico, responsável pela evolução sucessiva da ruptura continental e abertura do Oceano Atlântico Sul (SCHOBENHAUS, 1984). O seu início é marcado no Eocretáceo com a Formação Serra Geral, predominantemente subalcalina toleítica. Já as manifestações alcalinas se distribuíram em três pulsos principais: Eocretáceo, Neocretáceo a Paleoceno e Eoceno (AMARAL et al., 1967; ALMEIDA, 1983; RICCOMINI et al., 2004).

Ao final do Turoniano uma nova fase de magmatismo é registrada nas bacias marginais e na região continental. Esse magmatismo é associado a maciços vulcânicos centrais, com basaltos marcadamente alcalinos. Entre o Neocretáceo e o Paleoceno-Eoceno Médio ocorreu novo período de magmatismo alcalino, notadamente na região mais proximal da Bacia de Campos, como é o caso do Morro de São João (MOHRIAK et al., 1990). As principais intrusões no continente correspondem, na região sudeste, aos maciços de Poços de Caldas, Itatiaia, Itaguaí, Mendanha, Rio Bonito e, na região próxima ao litoral, ao Morro de São João, em Casimiro de Abreu, com uma variação de idade entre 74,6 Ma e cerca de 52,3 Ma, que alguns autores interpretam como resultado de um fenômeno do tipo *hotspot* (SZATMARI et al., 2000).

O magmatismo alcalino máfico e ultramáfico, básico a ultrabásico, é descrito por Sonoki & Garda (1988) e Ulbrich & Gomes (1981) como de idade de 130Ma a 75Ma, com ocorrências próximas à Bacia do Paraná, se concentrando no arco de Ponta Grossa. Os litotipos consistem em dunitos, wehrlitos, cabonatitos, clinopiroxenitos e gabros alcalinos (AZZONE et al., 2013). As ocorrências constituem séries predominantemente potássicas, desde fracamente a fortemente insaturadas em SiO₂, tendo como processos evolutivos característicos a cristalização fracionada que gera líquidos mais evoluídos como fonolitos e sienitos (AZZONE et al., 2016, CHMYZ et al., 2017). Segundo Barbosa (2012) e Azzone (2013), os líquidos parentais teriam sido gerados a partir de fontes ultramáficas metassomatizadas por fluidos carbonatados localizadas no manto litosférico subcontinental.

Já o magmatismo alcalino félsico, como mencionado anteriormente, é representado por *stocks*, diques e soleiras (VALENÇA, 1975; RICCOMINI et al., 1983; AMARAL et al., 1967; ALMEIDA, 1986, 1996; THOMAZ FILHO et al., 2005). Estes corpos são caracterizados por diferentes fácies de sienito, alcalifeldspato sienito, pseudoleucita, nefelina sienito, traquito e fonolito (GERALDES et al., 2013; ROSA, 2017; MOTOKI et al., 2008 e 2010; BROTZU et

al., 2007; MOTA 2012). Valença (1980) pontua que essas rochas são potássicas com altas razões de álcalis (K_2O/Na_2O) que decrescem com o progresso da diferenciação magmática. O mesmo autor afirma que, no caso do Morro de São João, o teor de K_2O diminui e o de Na_2O aumenta de fora para dentro do maciço.

Estas rochas félsicas dos maciços alcalinos do Estado do Rio de Janeiro são comumente associadas a produtos de cristalização fracionada de um magma parental máfico de alto potássio derivado do manto, com contribuição crustal por assimilação que é evidenciada pelos dados isotópicos de $^{87}Sr/^{86}Sr$ com valores entre 0,705 a 0,709 (VALENÇA, 1980; VALENTE, 1997; SICHEL et al., 2012). Já as rochas máficas e ultramáficas mapeadas no Morro de São João são caracterizadas por Brotzu et al. (2007) como resultado de um processo de fracionamento de cristal *in situ* de um magma precursor (produzindo tanto o espectro de intrusão rochas alcalinas e camadas cumuláticas), com posterior remoção dessa camada cumulática por pulsos de magma frescos, particionando as ultramáficas e as fácies melanocráticas intrusivas resultando em várias composições intermediárias resultado de processos de mistura.

1.3 Classificação Química e Mineralógica do Magmatismo Alcalino

No que tange à constituição química de rocha total, Smythe (1913) e Shand (1922) evidenciam que os magmas alcalinos são enriquecidos por voláteis e demonstram uma grande concentração de lítio, berílio, elementos terras-raras e de halogêneos, além de álcalis. Bowen (1915) ressaltou que o magma alcalino residual é enriquecido em sódio e alumínio, ratificando a albitização encontrada em diversos plútons félsicos. Após a cristalização, a rocha é invadida por emanções fluidas ricas em álcalis, gerando mineralizações pobres em sílica como cancrinita, riebeckita, aegerina, nefelina e outros.

Em termos classificatórios, Shand (1922) definiu rochas alcalinas com base na composição mineralógica, isto é, como as rochas ígneas que contêm feldspatóides modais e/ou minerais peralcalinos modais. As rochas alcalinas dessa definição são fáceis de serem identificadas por meio da petrografia óptica. Entretanto, que os minerais acima citados sejam formados, as rochas devem ser fortemente insaturadas em sílica e/ou peralcalinas.

Em relação ao teor de saturação álcali-alumina, as rochas ígneas alcalinas contém, segundo Le Maitre (2002), (1) feldspatóides modais ou anfibólios ou piroxênios alcalinos ou

(2) feldspatóides normativos ou actima baseado nas razões molares relativas de $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ em relação Al_2O_3 . Estas razões molares podem ser divididas em metaluminoso [$(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) < \text{Al}_2\text{O}_3 < (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$], peralcalina [$(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) > \text{Al}_2\text{O}_3$] e mais raros, peraluminoso [$\text{Al}_2\text{O}_3 > (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$] - FROST & FROST (2008)].

O termo peralcalino, apesar de divergências (Le Maitre, 2002), pode ser utilizado como sinônimo de agpaíticas. O Índice Agpaítico (SØRENSEN, 1974) consiste numa classificação mineralógica de rochas ígneas alcalinas (nefelina sienito e fonolito) e granitos peralcalinos mediante teor de saturação álcali-alumina.

Sendo assim, uma rocha ígnea alcalina tem teores de $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} / \text{Al}_2\text{O}_3$ (em proporção molecular) < 1 é considerada miaskíticas (para nefelinas sienito e fonolitos) e/ou metaluminosas e > 1 agpaítica e/ou peralcalina.

Os minerais formados na transição miaskítica–agpaítica são a razão para a diversidade de rochas sieníticas. É sabido que as rochas alcalinas são ricas em LILE, como Na, K e Li e com alto teor de HFSE, como Ti, Zr, Hf, Nb, Ta, elementos terras raras, U e Th. Os principais portadores de HFSE em rochas ígneas alcalinas são os óxidos de zircão e titanita. O enriquecimento em HFSE (Ti, Zr, Hf, Nb, Ta, ETRS, U e Th) nessas rochas é associado à mineralogia acessória. Para rochas miaskítica: zircão, titanita e óxidos de Fe-Ti e para rochas agpaítica: minerais miaskíticos e/ou minerais de Na-K-Ca-Fe ricos em Ti ou Zr (MARKS, 2011).

A formação dessas fases minerais é dependente da fugacidade de oxigênio, da espécie volátil e das atividades de CaO, K_2O e Na_2O nos magmas alcalinos insaturados e saturados em sílica. (MARKS, 2011).

Já em termos classificatório segundo teor de saturação de álcali -sílica e segundo diagrama classificatório de Hamilton & MacKenzie (1965), um líquido magmático pode evoluir para um sistema alcalino ou granítico gerando rochas insaturadas e supersaturadas, respectivamente. Esta característica provém da existência de uma barreira termal entre esses dois sistemas que impede uma evolução para ambos (SØRENSEN, 1974; FOLAND et al., 1993; NEKVASIL et al., 2004; GUPTA et al., 2010).

Contudo, é possível que províncias alcalinas com essas características coexistam em diversos contextos tectônicos. Tipicamente são complexos anelares e ocorrem da seguinte forma:

- a) Na região central do maciço é constituída por rochas insaturadas com as zonas de borda formadas por rochas supersaturadas. Isso se dá pelo aumento gradativo nos teores de sílica ou pelos contatos bruscos de unidades distintas,

como é observado em Ilímaussaq e Kangerlussuaq, Groelândia (MARKS & MARKL, 2001);

- b) Em rochas supersaturadas ocorrendo apenas na porção central sendo ‘blindadas’ do contato com as encaixantes por rochas insaturadas, como Itatiaia, Brasil (RIBEIRO FILHO, 1967; BROTZU et al., 1997); e
- c) Em maciços com rochas exclusivamente, ou predominantemente, compostos por supersaturadas associados a uma província com outros corpos com presença de rochas insaturadas, como em Paresis, Província Cretácea de Damaraland, Namíbia (MINGRAM et al., 2000).

Riishuus (2008) pontua que a maioria das ocorrências possuem em comum assinaturas isotópicas que sugerem forte influência crustal para as rochas supersaturadas, com aumento dos valores de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e diminuição de ϵNd e $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ relacionados ao aumento dos teores de sílica em proximidade com a encaixante. Em contrapartida, as rochas insaturadas e/ou mais primitivas apresentam componentes tipicamente mantélicos.

As explicações para esse tipo de associação seguem duas vertentes, que não são excludentes entre si:

- a) Existência de processos que ultrapassem ou mudem a barreira termal, como efeitos da presença de voláteis (KOGARKO, 1974) ou outros componentes, mudanças nas pressões de água (PANKHURST et al., 1976), ou fracionamento complexo de minerais (FOLAND & HENDERSON, 1976; GIRET et al., 1980); e
- b) Existência de processos que abram o sistema, como interação com a crosta por hidrotermalismo, assimilação de encaixantes com cristalização fracionada ou mistura com líquidos anatéticos crustais ricos em sílica (FOLAND et al., 1993).

Em todas as ocorrências citadas acima, as interpretações levam em consideração diferentes graus de assimilação de crosta, tanto das regiões basais, onde o magma teria um tempo de residência (JUNG et al., 2004), quanto das porções mais superficiais, envolvendo processos de ascensão do magma (MARKS & MARKL, 2001), sendo geralmente assumido modelos conjunto de cristalização fracionada.

2 METODOLOGIA

2.1 Atividades e Procedimentos

As etapas laboratoriais foram realizadas nas dependências da UERJ, no Maracanã, Museu Nacional-UFRJ, na Quinta da Boa Vista, UFRJ, na Cidade Universitária e UFRRJ, no município de Seropédica, bem como em empresas contratadas.

2.1.1 Revisão Bibliográfica

A compilação dos dados teve início no início do projeto com pesquisas em artigos de revistas científicas nacionais e internacionais, principalmente. Periódicos e publicações acadêmicas (dissertações e teses) e relatórios de projetos de mapeamento também foram utilizados.

Os primeiros registros de ocorrência de rochas alcalinas no Brasil foram publicados por Lasaulx (1885) e por Derby (1887). O primeiro fez uma breve caracterização petrológica descrevendo duas variedades de rochas: um nefelina sienito de granulação fina e aspecto granítico, com ortoclásio, plagioclásio, augita com bordas de hornblenda, nefelina idiomórfica, titanita abundante e alguma biotita, e um nefelina sienito pórfiro com ortoclásio e nefelina intercrescidos, nefelina idiomórfica, augita, hornblenda e titanita.

Na década de 50, Oliveira (1952) cita o Morro de São João, denominando de Morro Grande de São João, atribuindo-lhe rochas de composição sienítico-nefelínicas. Citou ainda a presença de aluviões quaternários, "Barreiras" e "Zonas Arqueanas" nos arredores.

Amaral et al., (1967) apresentam dados geocronológicos de duas amostras do Morro de São João, com idades de 58,7 Ma(malignito) e 60 Ma (nefelina sienito), atribuindo, portanto, uma idade média para o maciço de, aproximadamente, 59 Ma.

Em 1998, o DRM-RJ lança o mapa geológico do Estado do Rio de Janeiro em escala 1:400.000, baseado em imagens de satélite, delimitando o Morro de São João e colocando as rochas metamórficas no que foi chamado de "Maciço do Litoral Fluminense".

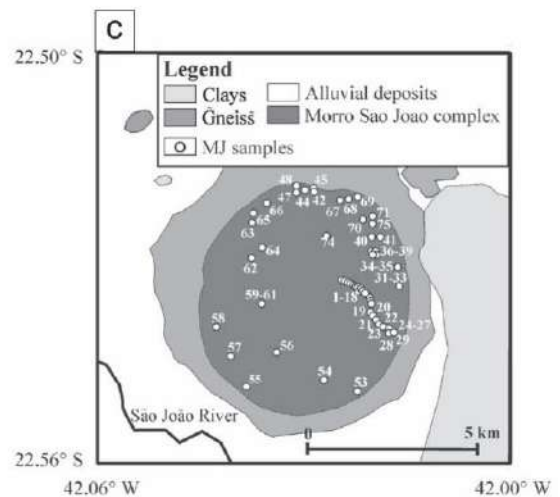
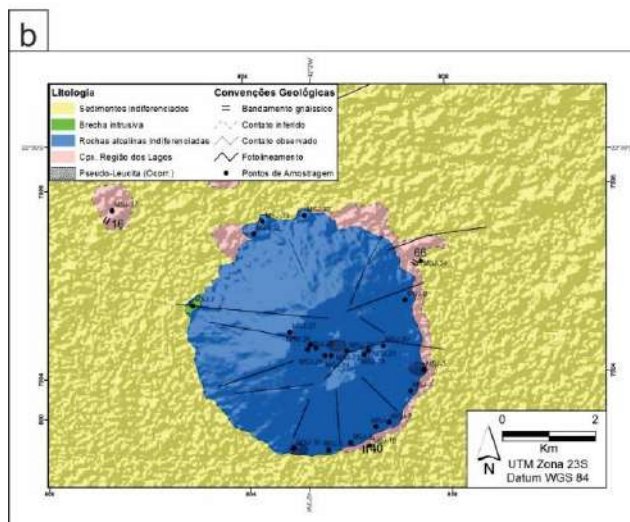
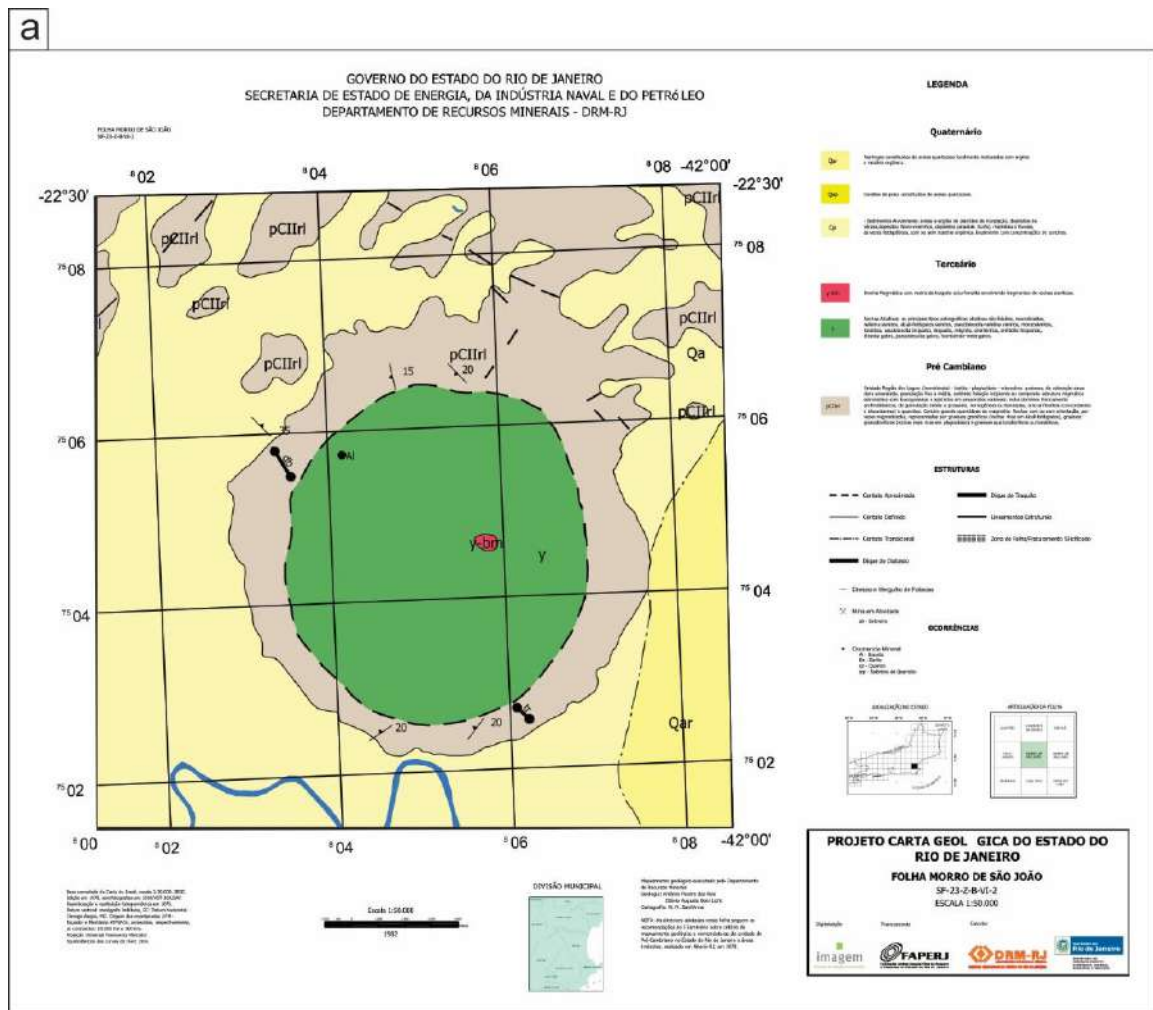
Motoki, 2001) e Motoki et al., 2008) fizeram estudos de caracterização petrográfica, processos de formação e descrição de processos eruptivos relacionados à rochas alcalinas em esfera global, fazendo analogias com as ocorrências que afloram no Estado do Rio de Janeiro.

As principais referências de estudos tipificando os corpos rochosos do Estado do Rio de Janeiro utilizadas neste trabalho são de Riccomini (1983), Almeida (1986 e 1991), Valença (1975 e 1980), Valente (1995 e 1997) e Brotzu et al., (1997, 2007). Estes autores caracterizaramas principais intrusões alcalinas, não só do Estado do Rio de Janeiro, mas também do Sudeste do Brasil. Tais materias apoiam-se em estudos de caracterização petrográfica e/ou petrogenética utilizando diversas metodologias como análises elementares (VALENTE, 1995) e modelagem geoquímica (VALENTE, 1997) da denominada Província Alcalina da Serra do Mar (PASM). Estudos mais recentes incluem os produtos de Mota (2009, 2012), Pillet (2015) e Azzone (2013, 2016 e 2018).

As pseudoleucitas estudadas por Valença (1980) têm seus trabalhos mais populares publicados por Knight (1906), Fudali (1963), Hussak (1890) e Hesselbo (1986). Neles existem estudos especificando os processos químicos que acontecem dentro da câmara magmática capazes de gerar esse tipo de intercrescimento mineral.

Os mapas geológicos mais importantes publicados são do DRM (1998), Brotzu et al., (2007) e Mota (2012), Figura 5. Eles não fazem distinção das variedades faciológicas do Morro de São João. DRM (1998) agrupou todos os litotipos num grupo chamado “Rochas Alcalinas”. Já Mota (2012) nomeou como “Rochas Alcalinas Indiferenciadas” e seguramente, a escala utilizada pelos autores não permitiu que as feições vistas fossem plotadas nos mapas. Entretanto, estes autores descrevem ocorrência de brecha magmática, pseudoleucita e a variedade litológica de acordo com as características geoquímicas. Os mesmos autores reconhecem o Morro de São João como um maciço alcalino com rochas félsicas, máficas e ultramáficas sendo os principais representantessienitos, com ou sem nefelina, alcalisienito, monzonito, malignito, shonkinito, gabro e clinopiroxenito.

Figura 5 - Fotomontagem com os mapas geológicos do Morro de São João.



Legenda: Figura 5a por DRM (1998); Figura 5b por Brotzu et al., (2007); Figura 5c por Mota (2012).
Fonte: Modificado de DRM (1998), Brotzu et al., (2007) e Mota (2012).

2.1.2 Trabalho de Campo

Na etapa pré-campo, para a elaboração das cartas geológicas, as bases topográficas usadas foram retiradas do banco de dados do Projeto RJ-25 do IBGE, tratadas, ajustadas e editadas pelo corpo técnico do LET – Laboratórios de Estudos Tectônicos na UERJ a partir do *software* ArcGIS 10.6 e CorelDraw X8.

Após as compilações de trabalhos anteriores e elaboração da carta geológica preliminar, as campanhas de campo foram divididas em 3 etapas. A primeira etapa realizada no mês de outubro do ano de 2018 baseou-se em uma primeira interpretação quanto às características geomorfológicas e descrição da litologia local.

Nos três dias desta primeira etapa, amostras representativas de cada fácies coletadas dentro dos quarenta e três pontos mapeados, no setor leste e sudeste do maciço, foram subdivididas para futuras classificações. Na segunda etapa de campo realizada no mês de setembro de 2019, o setor sul, sudoeste e oeste mapeados contemplaram pontos concentrados ao longo da estrada que circunda o corpo. Foram feitos vinte pontos nos três dias de campo. Já na terceira etapa de campo, novembro de 2019, se deu exclusivamente para setorizar a predominância das fácies para assim traçar contatos e confeccionar o mapa geológico. Trinta e dois pontos foram feitos totalizando noventa e cinco pontos ao longo de toda área estudada.

A parte central do maciço necessita de uma logística e métodos de mapeamentos mais elaborada visto que, além de serem propriedades privadas, é formada por uma mata densa (Mata Atlântica), além de se tratar de uma RPPN - Reserva Particular do Patrimônio Natural, tendo, assim, várias limitações para a entrada, manejo e quaisquer intervenções humanas.

2.1.2.1 Técnica de mapeamento

Para realizar o mapeamento em detalhe do Morro de São João e, por conseguinte a confecção do mapa geológico, a análise geomorfológica, principalmente da rede de drenagem, fez-se de extrema necessidade e importância. A demarcação dos blocos e matacões com mesmas características faciológicas e sua disposição areal nos diversos setores do maciço foi a metodologia principal utilizada.

Ao longo do mapeamento, observou-se onde havia a predominância de determinado grupo faciológico. Em seguida, uma análise da rede de drenagem e morfologia do maciço para deduzir de onde seriam originários estes blocos e assim, estipular por meios interpretativos onde estariam os contatos.

Os depósitos de talus são restritos às cotas entre 50-100m. São depósitos bem espessos, principalmente no setor nordeste da área. Por vezes é possível observar talus se dispendo acima do regolito das rochas encaixantes. Nesta cota encontram-se blocos de todos os tipos de litotipos principalmente onde o relevo é dissecado pela drenagem. Entre as cotas 100 m e 250m há um predomínio da Fácies Leucocrática onde se pôde estabelecer um primeiro contato litológico interpretativo. As Fácies Mesocráticas estão limitadas entre as cotas 250-450m. Também neste setor são observadas as interações entre diversos litotipos onde foram caracterizadas estruturas de mistura magmática (*mingling* e *mixing*) e assimilação. Acima dos 450m o predomínio é da Fácies Melanocrática.

É importante observar e salientar que os contatos estabelecidos no mapa geológico apresentado são completamente interpretativos e baseados nas descrições e observações de campo, e não descritivos como se estabelece nos demais mapas geológicos. São interpretativos. A adoção de uma abordagem mais interpretativa na inferência de contatos geológicos resulta de um mapeamento em área sem afloramentos e caracterizada exclusivamente por campos de matacões e talus.

2.1.3 Preparação de Amostras

As lâminas delgadas confeccionadas a partir das amostras da primeira etapa de campo foram feitas no Laboratório de Laminação do Museu Nacional-UFRJ. As descrições petrográficas foram feitas no Laboratório de Petrografia da UERJ e a preparação de amostras para litogeoquímica no Laboratório Geológico de Processamento de Amostras – LGPA na UERJ.

As amostras coletadas na segunda e terceira etapas de campo foram confeccionadas na SOLINTEC - Serviços de Geologia Integrados. As descrições macroscópicas e microscópicas dessas etapas foram feitas no Laboratório de Petrografia da UERJ e nas dependências do Departamento de Geociências da UFRRJ.

No Laboratório Geológico de Processamento de Amostras – LGPA as amostras selecionadas da primeira etapa foram serradas para a confecção dos *slabs*. Os *slabs* tiveram uma primeira britagem na bigorna para depois serem reduzidos ao pó no moinho de bolas. O principal motivo para utilizar a bigorna é a separação da “parte félsica” da “parte máfica” do hornblenda gabro com pseudoleucita (Figura 6) e fenocristais e matriz do fonolito pórfito, considerando-se que a matriz das rochas porfíricas é a porção da amostra que melhor representa a composição do magma. Só a porção máfica do hornblenda gabro com pseudoleucita e a matriz do fonolito foram analisadas. Na serra, essa separação não foi tão satisfatória, preferindo-se a separação de forma manual com pinça. Foram feitas 4 sequências de fracionamento para a separação. A bigorna foi limpa com água e álcool, e seca com ar comprimido e as amostras envoltas numa sacola de plástico.

Posteriormente à britagem, as amostras foram postas no moinho de bolas (Figura 7a) modelo 80000 Mixer/Mill contendo dois recipientes cilíndricos com bases com tampas rosqueadas, quatro tampas, quatro roscas de vedação e 8 bolinhas de aproximadamente 1cm de diâmetro feitas de uma liga de tungstênio (Figura 7b). A mesa suporte foi forrada com papel e o manejo das amostras foi realizado com pinças e espátulas lavadas e higienizadas.

O primeiro par de amostras foi processado por 5 minutos e, posteriormente, descartado com o único objetivo de descontaminar o recipiente de tungstênio. Após descontaminação, cada par de amostras foi pulverizado por 15min, quarteado, inserido em recipientes e etiquetado. Os excessos de amostras foram guardados como alíquotas de reserva. Algumas amostras foram pulverizadas 15 minutos por duas vezes, ou seja, 30 min, devido à maior resistência à moagem na granulometria desejada.

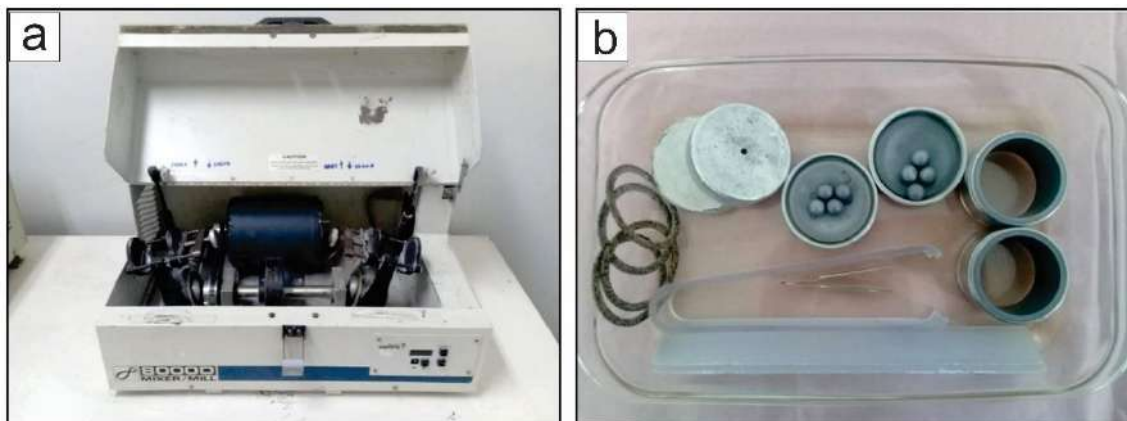
Para finalizar todo o processo, houve a descontaminação do moinho com areia de praia por 5min com posterior descarte. Todas as partes constituintes do moinho e acessórios foram lavados com água, sabão e álcool, secos com ar comprimido e levados para a estufa onde são guardados.

Figura 6 – Demonstração do quarteamento manual feito na amostra de pseudoleucita para, em seguida, ser pulverizada no moinho de bolas.



Fonte: A autora, 2019.

Figura 7 – Foto do equipamento utilizado para pulverizar as amostras.



Legenda: A Figura 8a consiste no moinho de bolas e a Figura 8b são as ferramentas utilizadas para manusear e acomodar as amostras.

Fonte: A autora, 2019.

2.1.3.1 Análise de Rocha Total

A análise de rocha total para obtenção das concentrações de elementos maiores e traços das amostras da primeira etapa de campo foi feita no laboratório *Australian Laboratory Services* (ALS) Brasil Ltda. utilizando o método de fusão e posterior dissolução para leitura em ICP-AES (*Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectrometry*) para elementos maiores e ICP-MS (*Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*) para elementos-traço.

Já para as amostras da segunda e terceira etapa de campo, as análises analíticas se deram no laboratório ACTLABS - *Activation Laboratories* Ltda. com a mesma metodologia citada acima.

2.2 Materiais e Métodos

2.2.1 Microscopia Óptica

As análises de microscopia óptica foram feitas no Laboratório de Petrografia da Faculdade de Geologia da UERJ. As fotomicrografias foram tiradas no laboratório Lagesed - Laboratório de Geologia Sedimentar nas dependências da UFRJ pelo programa *AxioVision Program* (Figura 8).

Figura 8 – Equipamento utilizado para gerar as fotomicrografias.



Fonte: A autora, 2019.

Após a segunda etapa de campo, as análises foram realizadas nas dependências do Departamento de Geociências da UFRRJ.

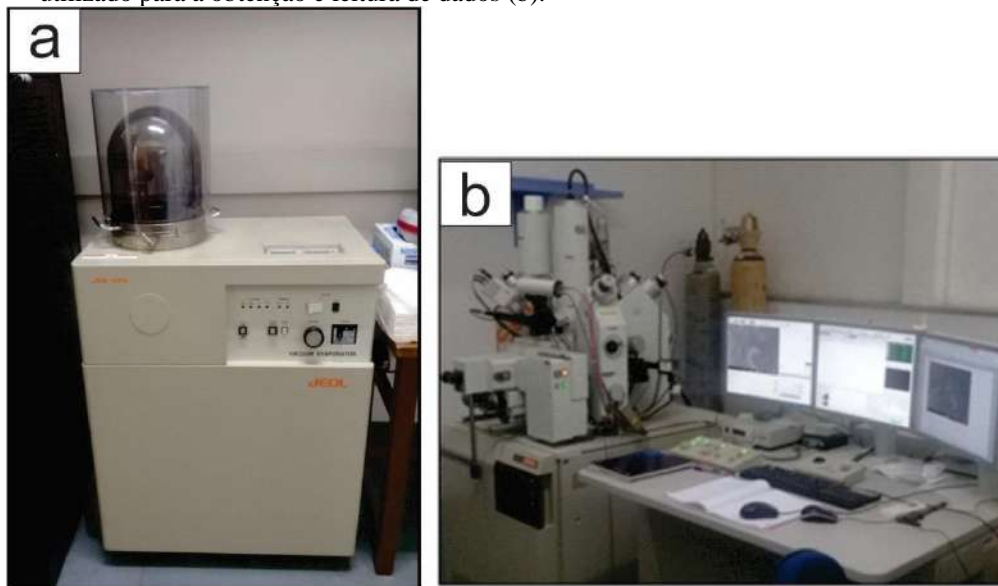
2.2.2 Microsonda Eletrônica

As análises (de ambas as etapas) foram feitas pelo corpo técnico no Laboratório de Difração de Raios X e Microsonda Eletrônica – LABSONDA nas dependências do Instituto de Geociências, UFRJ.

Para os procedimentos, as lâminas foram ajustadas para um tamanho previamente determinado (44mm x 25mm e espessura em torno de 2 mm), metalizadas e em seguida marcadas em pontos específicos onde as análises foram feitas.

O processo de metalização foi feito na máquina Jeol Jee-420 (Figura 9a) Vacuum Evaporator (Figura 9a) e as condições analíticas das análises na microsonda Jeol JXA-8230 (Figura 9b) foram as seguintes: voltagem de 20kV para os minerais opacos e 15 kV para os translúcidos, com corrente elétrica de 20 μ A. A partir das leituras do *software* são gerados mapas e tabelas em planilhas Excel® para serem tratados e interpretados.

Figura 9 – Aparelho Jee-420 Vacuum Evaporator (a) e aparelho Jeol JXA-8230 Electron Probe Microanalyzer utilizado para a obtenção e leitura de dados (b).



Fonte: A autora, 2019.

2.3 Tratamento de Dados

A seguir estão descritos os métodos, padrões, programas, *softwares* e planilhas utilizados para tratamento de dados.

2.3.1 Análises Geomorfológicas

Para visualizar as diferenças de altitudes do terreno e, por meio disso, traçar possíveis contatos entre litologias, a técnica de perfis topográficos *-swath profiles-* auxilia no reconhecimento de elementos gerais na paisagem que podem estar associados à contatos litológicos como a quebra nos níveis topográficos, por exemplo. Por meio de dados do modelo SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) e da ferramenta “*SwathProfiler*”, um *add-in* desenvolvido por Pérez-Peña et al., (2017), foram geradas faixas de perfis nas direções N-S, W-E, NE-SW e NW-SE. Este tipo de análise morfométrica constrói perfis topográficos espaçados igualmente dentro de faixas pré-estabelecidas.

2.3.2 Análises de Química Mineral

O *software* do equipamento Jeol JXA-8230 Electron Probe Microanalyzer gera uma tabela com porcentagem em peso dos principais óxidos e este valor é plotado em planilhas, fornecidas pelo site Gabbrosoft®, específicas para cada fase mineral. A partir dessa plotagem são feitos os cálculos dos *end-members* e por fim, parâmetros classificatórios segundo Deer et al., (1981) para plagioclásio, Leake et al., (1997) para os anfibólios, Morimoto et al., (1988) para piroxênios e Grew et al., (2013) para as granadas são utilizados para classificação mineral.

2.3.3 Análises Petrográficas

Para as análises macroscópica e microscópica foram utilizados os seguintes discriminados nos itens a seguir.

2.3.3.1 Análise Macroscópica

Os critérios classificatórios definidos pela Subcomissão da Sistemática de Rochas ígneas da IUGS (International Union of Geological Sciences, Le Maitre, 2002) foram utilizados para as descrições macroscópicas, sendo os seguintes:

- a) Granulometria:
 - Grossa ($1 < \phi < 10\text{mm}$);
 - Média ($0,2 < \phi < 1\text{mm}$);
 - Fina ($< 0,2\text{mm}$).
- b) Índice de cor (considerando “M” a moda de minerais coloridos e opacos):
 - Félsica ($0 < \mathbf{M} < 20$);
 - Intermediária ($20 < \mathbf{M} < 40$);
 - Máfica ($40 < \mathbf{M} < 70$);
 - Ultramáfica ($70 < \mathbf{M} < 100$).

2.3.3.2 Análise Microscópica

As fontes de consulta para as classificações minerais se deram pelos livros *Atlas of the Rock-Forming Minerals in Thin Section* (MACKENZIE et al., 1980) e *Atlas of Igneous Rocks and Their Textures* (MACKENZIE et al., 1982) além de uma breve consulta no site do Museu de Minerais, Minérios e Rochas Heinz Ebert gerenciado pelo Departamento de Petrologia e Metalogenia - UNESP.

2.3.4 Análises de Litogeoquímica

O cálculo da Norma CIPW (CROSS, IDDINGS, PIRSSON & WASHINGTON, 1912) foi executado pela planilha Excel® elaborada segundo Hollocher (2004) e o *software* GCDKit e planilha Excel® para elaborar gráficos e diagramas classificatórios e discriminatórios. Os gráficos geoquímicos classificatórios e discriminatórios utilizados são de Cox et al (1979), Middelmost (1975) Winchester & Floyd (1977) modificado por Pearce (1993), De La Roche et al (1980) e modificado Batchelor & Bowden (1985), Yoder & Tilley (1962), Shand (1943), Boynton (1984) e McDonough & Sun (1995).

Os padrões de teor de SiO₂ adotadas são segundo Le Bas (1986), sendo:

- a) Ácida > 63 wt. % de SiO₂;
- b) Intermediária 52 – 63 wt. % SiO₂;
- c) Básica 45 – 52% wt. % SiO₂;
- d) Ultrabásica < 45 wt. % SiO₂.

2.3.5 Cálculos de Modelagem Geoquímica

Os cálculos de modelagem geoquímica foram feitos segundo as equações listadas em Wood & Fraser (1976) e Faure (1984) e os dados foram tratados em planilhas Excel®.

3 RESULTADOS

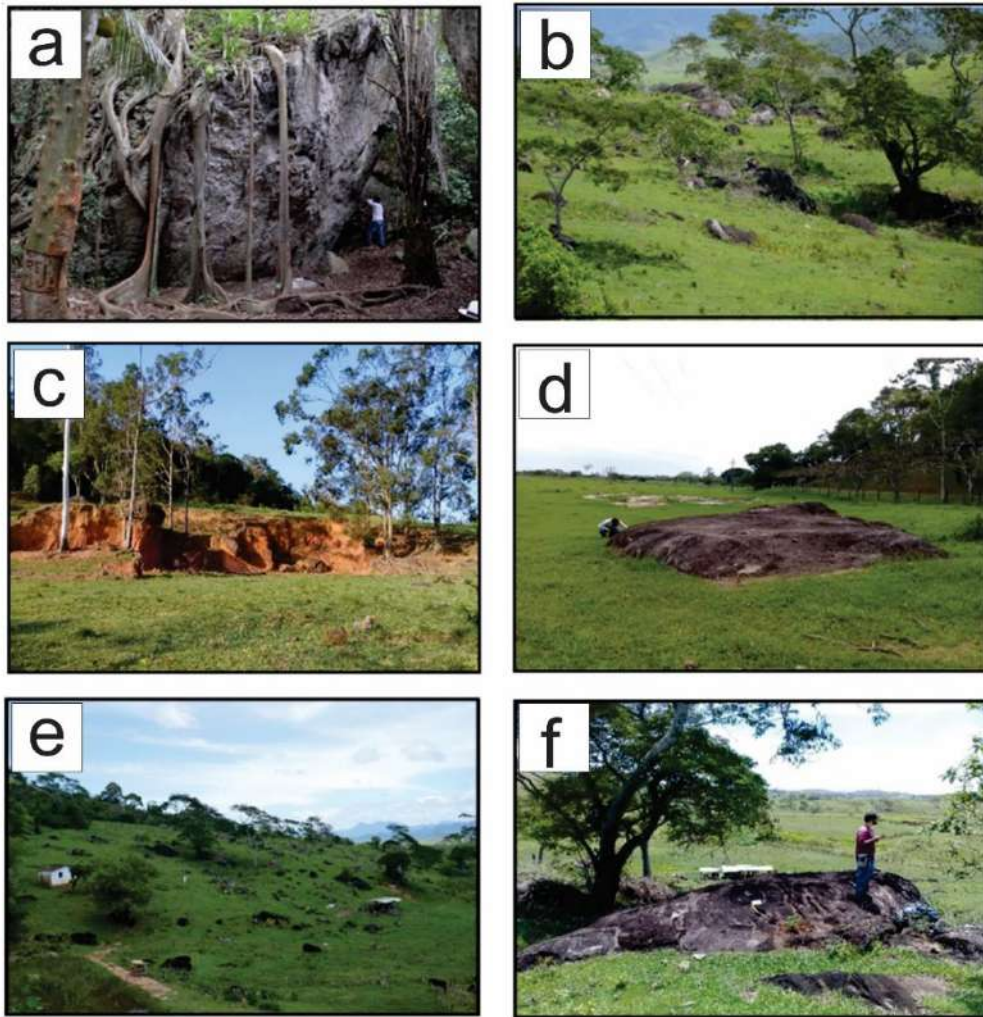
3.1 Interpretações de Campo

Nenhum afloramento com rochas alcalinas foi encontrado na área de estudo (Figura 10) e apenas um afloramento muito alterado de gnaisse foi mapeado (Figura 11). Os litotipos se revelam em forma de depósito de talus e/ou blocos pouco ou muito movimentados. Os depósitos de talus estão presentes por toda circunferência do corpo. O maciço do Morro de São João é composto predominantemente por variações texturais, estruturais e mineralógicas de sienitos.

Os litotipos têm relações de campo que remetem a processos de mistura magmática e/ou assimilação. As estruturas indicadoras destes processos são melhor observadas nas unidades anteriormente mapeadas como brechas magmáticas (MOTA, 2012) e enclaves máficos hospedados em nefelina sienito (BROTZU et al., 2007). Estruturas como diques, enclaves e veios com composições semelhantes ou diferentes dos hospedeiros também são observadas no campo (Figura 12).

O embasamento - Terreno Cabo Frio - aflora num corte de estrada com exposição de gnaisse muito alterado (Figura 11). Os contatos das rochas sieníticas do Morro de São João com o embasamento não é claramente delimitado e parecem estar cobertos pelos depósitos de talus.

Figura 10 – Exemplos de exposição dos litotipos do Morro de São João.



Legenda: Figura 10b, Figura 10c e Figura 10d e Figura 10e são exemplos dos depósitos de talus clássicos vistos no Morro de São João e Figura 10a e Figura 10d são exemplos de blocos movimentados.

Fonte: A autora, 2019.

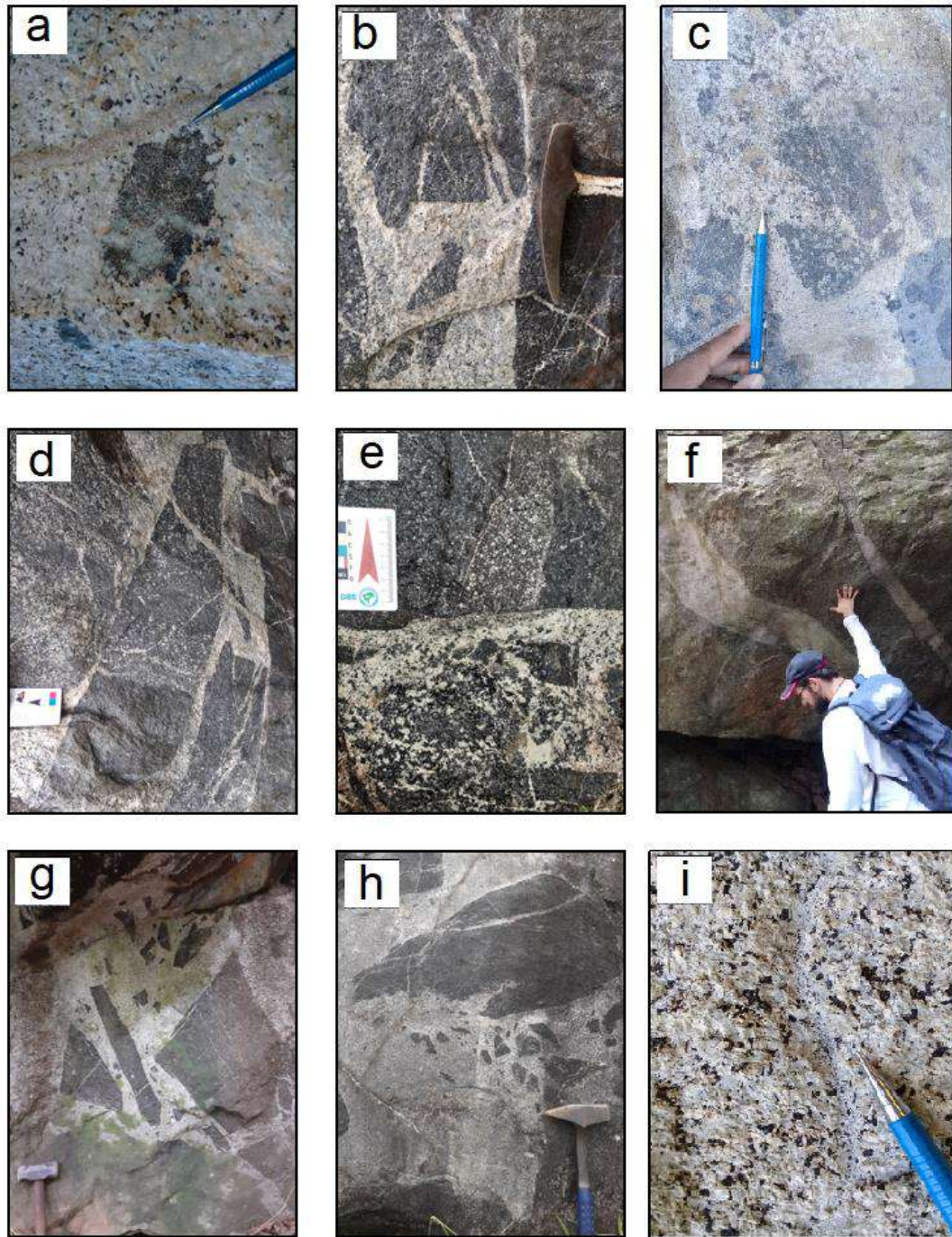
Figura 11 – Fotomontagem do contato de gnaiss com o dique de traquito.



Legenda: Figura 11a é uma foto panorâmica do afloramento; as Figuras 11b e 11d são os detalhes do dique de traquito e a Figura 11c o detalhe do gnaiss.

Fonte: A autora, 2019.

Figura 12 – Tipos de relações estruturais dos litotipos encontrados no Morro de São João.



Legenda: Nas Figuras 12a, 12c, 12d e 12e tem-se feições de mistura magmática onde se tem litotipos máficos englobando e sendo englobados por litotipos félsicos. Figura 12b, g e h dão destaque a estruturas que remetem à assimilação. Figura 12i e Figura 12f são as feições tabulares encontradas, como diques e veios, respectivamente.

Fonte: A autora, 2019.

As melhores evidências de assimilação de rochas encaixantes foram vistas em campo numa área nomeada como “Zona de Assimilação” (vide Apêndice 5 - Mapa Geológico). Esta zona é caracterizada por xenólitos de gnaisses numa rocha sienítica. A estrutura observada (Figura 13) remete ao processo de *stopping*, que é um mecanismo de intrusão ígnea onde o

magma se desloca para níveis crustais mais superficiais às custas de remoção de blocos de rocha encaixante, os quais são assimilados pelo magma (RAMSAY et al., 1987).

Figura 13 – Evidência de assimilação dentro da “Zona de Assimilação” no Morro de São João.



Legenda: Na foto vê-se os xenólitos da encaixante gnáissica numa rocha sienítica.
Fonte: A autora, 2019.

Foram mapeadas e nomeadas três fácies, quais sejam: Fácies Leucocrática, Fácies Mesocrática e Fácies Melanocrática. Estas fácies ocorrem isoladamente, ou mais frequentemente, associadamente, tendo diferentes tipos de relações estruturais. As principais feições observadas em campo remetem a processos de mistura magmática (*mingling*) e assimilação. Em ambos os casos a feição geral mostrada pelos blocos é semelhante a uma brecha com fragmentos melanocráticos englobados por hospedeiros leucocráticos. No entanto, as relações temporais entre fácies leucocráticas e melanocráticas variam muito. Em alguns blocos, porções melanocráticas subarredondadas e porções leucocráticas englobam-se mutuamente, remetendo a uma coexistência. Em outros blocos, os fragmentos melanocráticos são predominantemente angulosos e o subarredondamento localizado remete à assimilação.

Horstpeter (2001) pontua a definição de fácies petrográfica plutônica e reitera que se baseia em uma unidade litoestratigráfica informal de menor hierarquia que pode ser reconhecida e descrita, na amostra de mão e no campo, pelas características mineralógicas, texturais e estruturais. A partir de todas as análises realizadas em campo, e com base nesta definição, as fácies mapeadas podem ser divididas da seguinte forma (Tabela 1):

Tabela 1 – Divisão e classificação das principais fácies encontradas no Morro de São João.

Fácies Melanocrática	Compreende a rocha máfica hornblenda gabro
Fácies Mesocrática	Compreende a rocha máfica hornblenda sienito com nefelina
Fácies Leucocrática	Compreende as rochas félsicas sienitos, sienitos com nefelina, nefelina sienitos e fonolitos

Fonte: A autora, 2019.

3.2 Geomorfologia

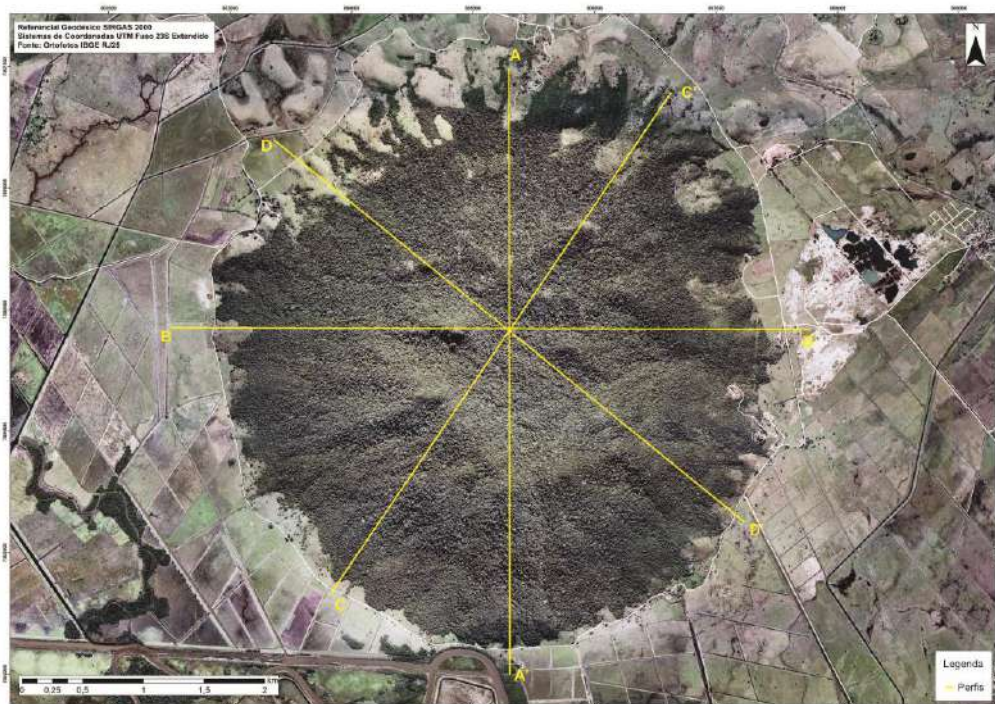
O Complexo Alcalino do Morro de São João é um corpo circular de aproximadamente 13km² cercado por sedimentos quaternários dispostos em aluviões e depósitos de talus com matações de dimensões métricas a decamétricas, sendo os maiores localizados nas partes centrais do maciço. Os perfis topográficos evidenciam uma linha de elevação topográfica que se ergue até a cota de 400m, aproximadamente. Acima dessa cota há uma quebra de relevo acentuada onde se estabelece uma área dissecada. Nesta área côncava se estabelecem quatro topos bem significativos com 635m (perfil A-A' - Figura 14a), 728m (perfil B-B' - Figura 14b), 707m (perfil C-C' - Figura 14c) e 509m (perfil D-D' - Figura 14d).

Nos perfis apresentados na Figura 15, as linhas de cor magenta representam a elevação máxima enquanto as linhas vermelhas a mínima. As demais cores são linhas topográficas intermediárias com uma distância aproximada de 733m entre elas.

É possível observar em imagens aéreas um lineamento significativo que atravessa o corpo com direção WNW-ESSE (Figura 16), muito embora o mesmo não se relacione diretamente com o padrão de drenagem, nem tampouco com o controle litológico.

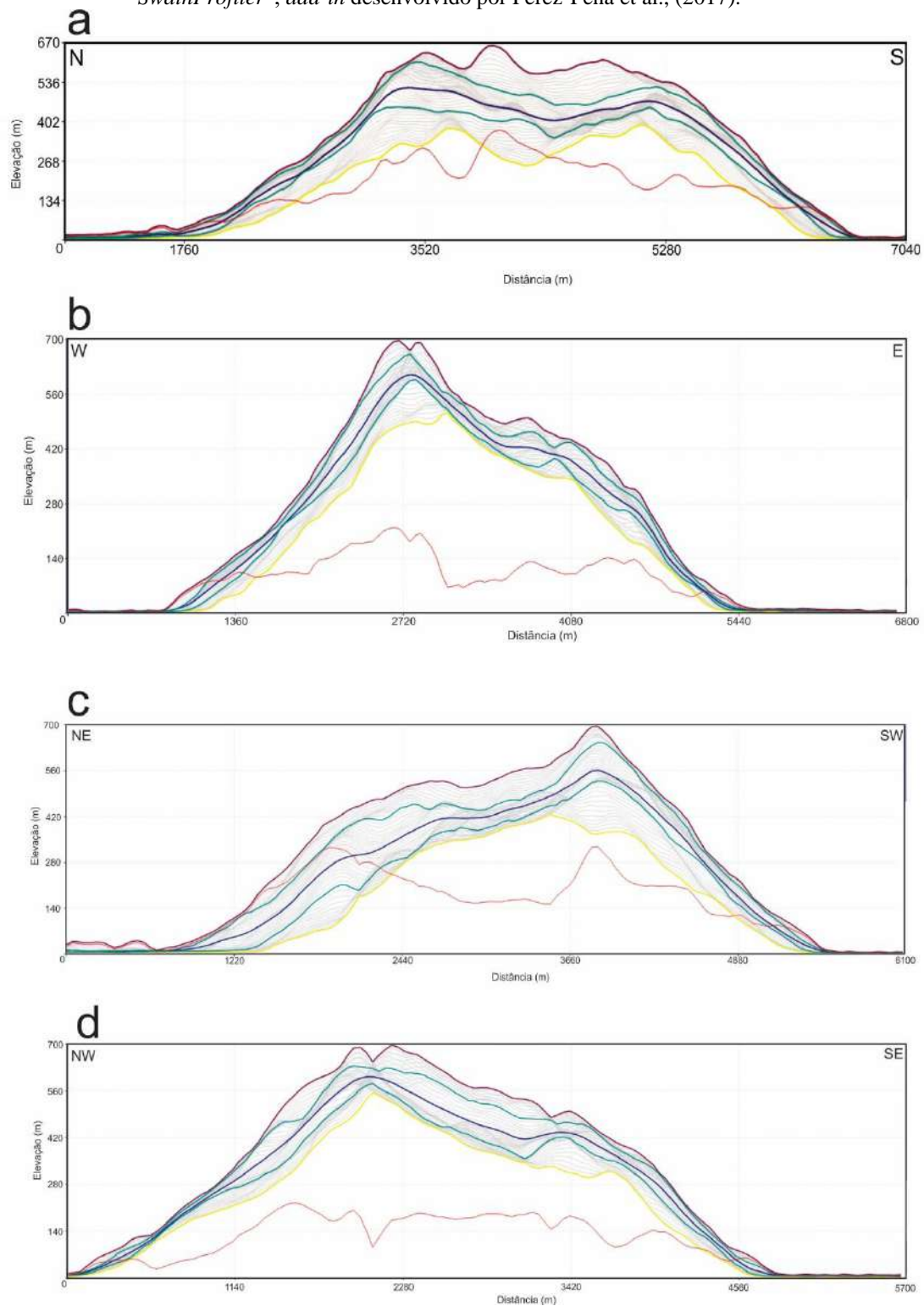
O sistema de drenagem é do tipo radial (Figura 16), que posteriormente classificou-se como centrípeta e/ou centrífuga (MORISAWA & SUMMERFIELD, 1991 modificado por LIMA (2006)). São rasas, curtas e íngremes, em média, 20m de profundidade, 1,1 km de comprimento e 22° de declividade (MOTOKI et al, 2014). Comumente são encontradas em estruturas vulcânicas, bacias, domos e estruturas circulares em geral (HOWARD, 1967). No padrão centrífugo os canais irradiam de uma área central para fora e as confluências são em ângulo reto. Já no padrão centrípeto os canais fluem para dentro em direção a depressões centrais fechadas ou nas suas proximidades.

Figura 14 – Traçados dos perfis usando a técnica de perfis topográficos (*swath profiles*) por meio de dados do modelo SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) e da ferramenta “*SwathProfiler*”, um *add-in* desenvolvido por Pérez-Peña et al., (2017).



Fonte: Fonte: IBGE e Google (acessado dia 13 de agosto de 2019).

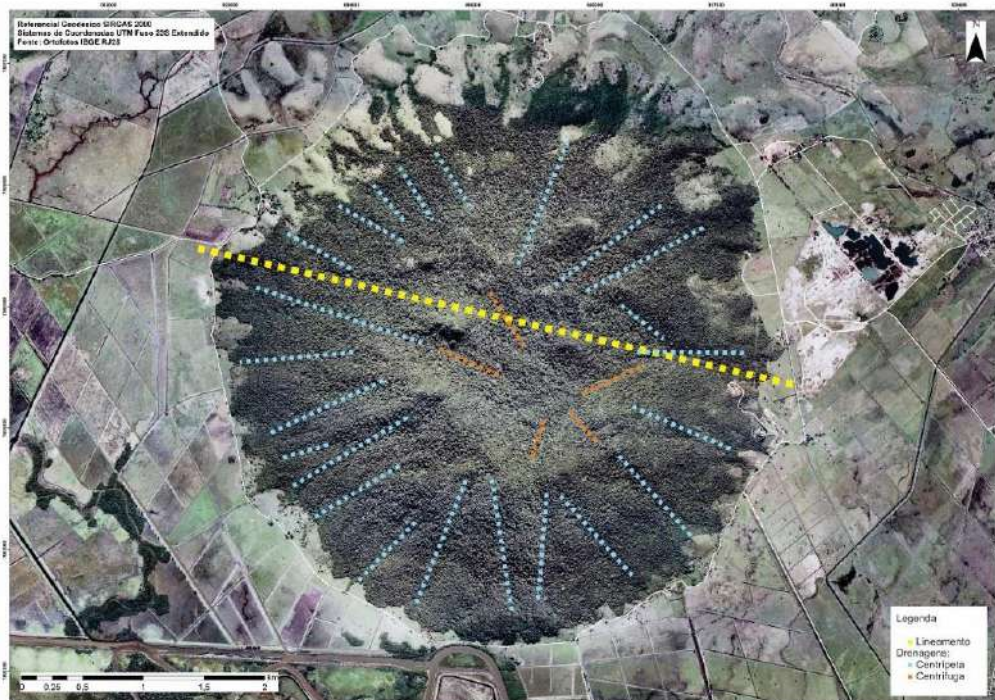
Figura 15 – Perfis traçados pelo modelo SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) e da ferramenta “*SwathProfiler*”, *add-in* desenvolvido por Pérez-Peña et al., (2017).



Legenda: Tem-se perfil A-A' (N-S, Figura 17a), perfil B-B' (E-W, Figura 17b), perfil C-C' (NE-SW, Figura 17c) e perfil D-D' (NW-SE, Figura 17d).

Fonte: A autora, 2019.

Figura 16 – Lineamento WNW-ESSE observado pelas imagens aéreas e o sistema de drenagem radial centrífugo e centrípeta característico do Morro de São João.



Fonte: Fonte: IBGE e Google (acessado dia 13 de agosto de 2019).

A morfologia cônica do Morro de São João não é de fato atribuído a um vulcão extinto, mas resultado de milhares de anos de denudação somados à erosão diferencial entre rochas com diferentes características geoquímicas (MOTOKI, 2014). As rochas félsicas (Fácies Leucocráticas) possuem forte resistência erosiva em relação às máficas (Fácies Melanocrática). Em detrimento dessa característica tem-se um centro, onde predominam a Fácies Melanocrática, num estágio elevado de erosão contrapondo uma borda contendo rochas da Fácies Leucocráticas que sustentem o relevo e uma elevação íngreme de aproximadamente 400m.

3.3 Petrografia

As rochas do maciço alcalino Morro de São João são constituídas por feldspatos alcalinos, nefelina, clinopiroxênios, anfibólios, titanita e minerais opacos. São rochas plutônicas faneríticas, maciças, holocristalinas, equigranulares, com grãos em sua maioria anédricos e granulometria média a grossa.

As rochas hipabissais são holocristalinas e de granulometria muito fina, por vezes apresentando trama porfírica (p.ex.: fonolito pórfiro).

3.3.1 Descrição Macroscópica

3.3.1.1 Rochas das Fácies Leucocrática

Sienito

Rocha hololeucocrática, equigranular, granulometria média e maciça (Figuras 17a, 17b e 17c). Aflora como blocos em depósito de talus ou como blocos rolados espalhados aleatoriamente. A mineralogia consiste em feldspatos alcalinos, anfibólios, clinopiroxênios, titanita, magnetita e nefelina em porcentagem inferior a 1%. Seus grãos são subeuédricos sendo os minerais máficos, tabulares.

Sienito com nefelina e Nefelina Sienito

Rochas leucocráticas, equigranulares, de granulometria variando de fina a grossa e maciças (Figuras 17a, 17b e 17c). Afloram como blocos em depósito de talus ou como blocos rolados. Mineralogia consiste em nefelina (em diferentes proporções – sienito com nefelina <10% de nefelina e nefelina sienito > 10% de nefelina), feldspato alcalino, anfibólio, clinopiroxênio, titanita e magnetita. Também é observado zircão, apatita e granada numa porcentagem de menos de 1% da rocha. Há ocorrência de pseudoleucita nessas unidades.

Fonolito

Rocha de coloração cinza, afanítica. Foram mapeadas três fácies diferentes de fonolito: pórfiro, maciço e com enclave de nefelina sienito (Figuras 17g, 17h, 17i, respectivamente). Os fenocristais são de feldspatos alcalinos de aproximadamente 1cm (Figura 19g) em meio a uma matriz afanítica.

3.3.1.2 Rochas da Fácies Mesocrática

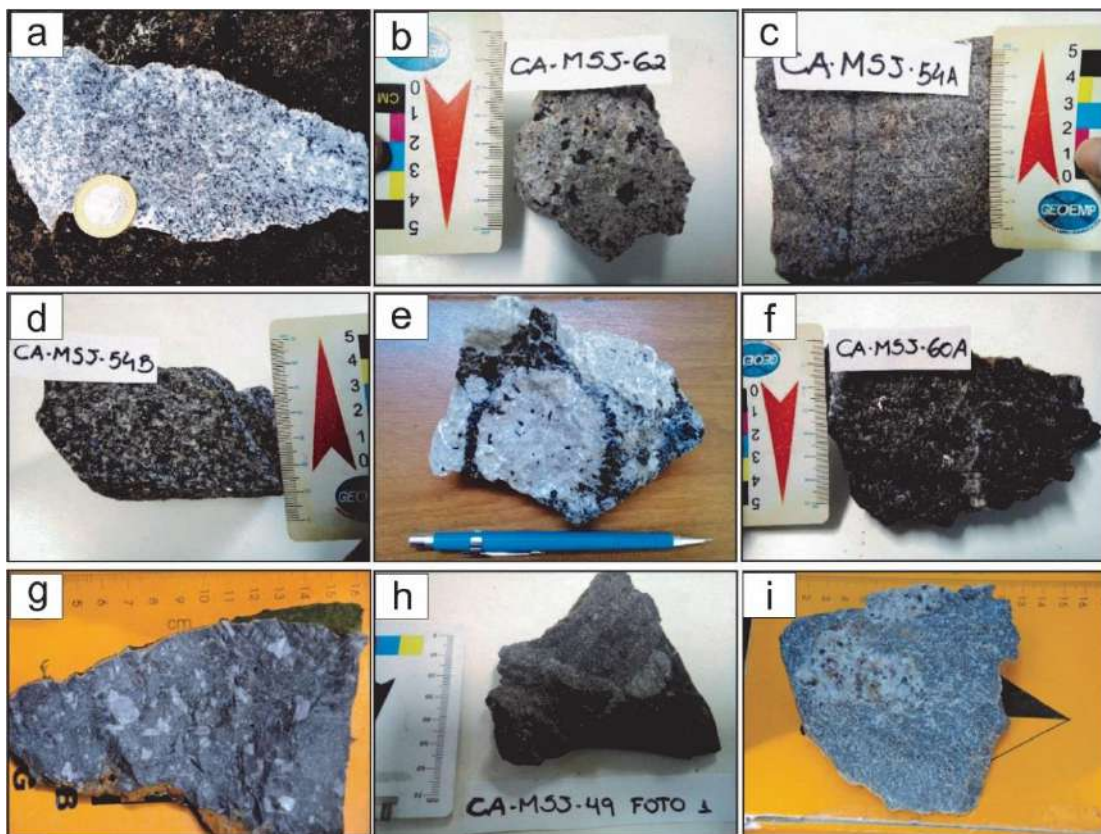
Rocha mesocrática, equigranular, granulometria média e maciça. Aflora como blocos em depósitos de talus ou como blocos rolados (Figura 17d e Figura 17e). Mineralogia consiste

em feldspato alcalino, nefelina, anfibólio, clinopiroxênio, titanita e magnetita. Essas rochas têm relações estruturais com todas as rochas das demais fácies.

3.3.1.3 Rochas da Fácies Melanocrática

Rochas de coloração preta, moderadamente alterada, holocristalina, equigranular e maciça (Figura 17f). Mineralogia consiste em anfibólio, clinopiroxênio, feldspato alcalino e minerais opacos. A biotita varia de quantidade de acordo com a área onde se dispõem esses blocos. A noroeste do maciço o valor modal da biotita pode chegar a aproximadamente 10-15% ao passo que mais ao sul a rocha possui valores abaixo de 5%.

Figura 17 – Principais litotipos encontrados no Morro de São João.



Legenda: Figuras 17a, 17b, 17c mostram as diferentes texturas do nefelina sienito e, principalmente, diferença granulométrica; Figura 17d sienito mesocrático; Figura 17e feições de pseudomorfo da leucita, descrita anteriormente por Mota (2012); Figura 17f sienito mesocrático; Figuras 17g, 17h, 17i são as variações dos fonolitos encontrados.

Fonte: A autora, 2019.

3.3.2 Descrição Microscópica

Nas análises microscópicas vê-se que as amostras possuem um grau de sericitização moderado. A geminação dos feldspatos alcalinos é incipiente, o que somado ao grau de alteração, fez necessária a identificação por figura de interferência para permitir a sua distinção da nefelina. A titanita ocorre em todas as fácies e possui hábito prismático com contorno losangular e está em uma porcentagem de mais de 5% do total da rocha.

Nas rochas da Fácies Leucocrática (Figura 18g e 18h), anfibólios possuem bordas de reação. Ora esse limite núcleo-borda é bem marcado, onde por vezes pode-se ver um núcleo de cor verde-oliva de clinopiroxênio e borda amarronzada de anfibólio, ora esse limite não é bem marcado onde núcleo-borda possuem coloração e tons de verde e/ou marrom. A geminação dos feldspatos alcalinos é pouco aparente e a cor de interferência destes minerais é amarelada. Os minerais acessórios são apatita, zircão, granada, titanita e magnetita, esta última por vezes bordejadas por cristais de anfibólio. A granada é marrom caramelada, de relevo baixo e subeuédrica. De uma forma geral, os minerais dessas rochas são subeuédricos, com minerais máficos de hábito tabular.

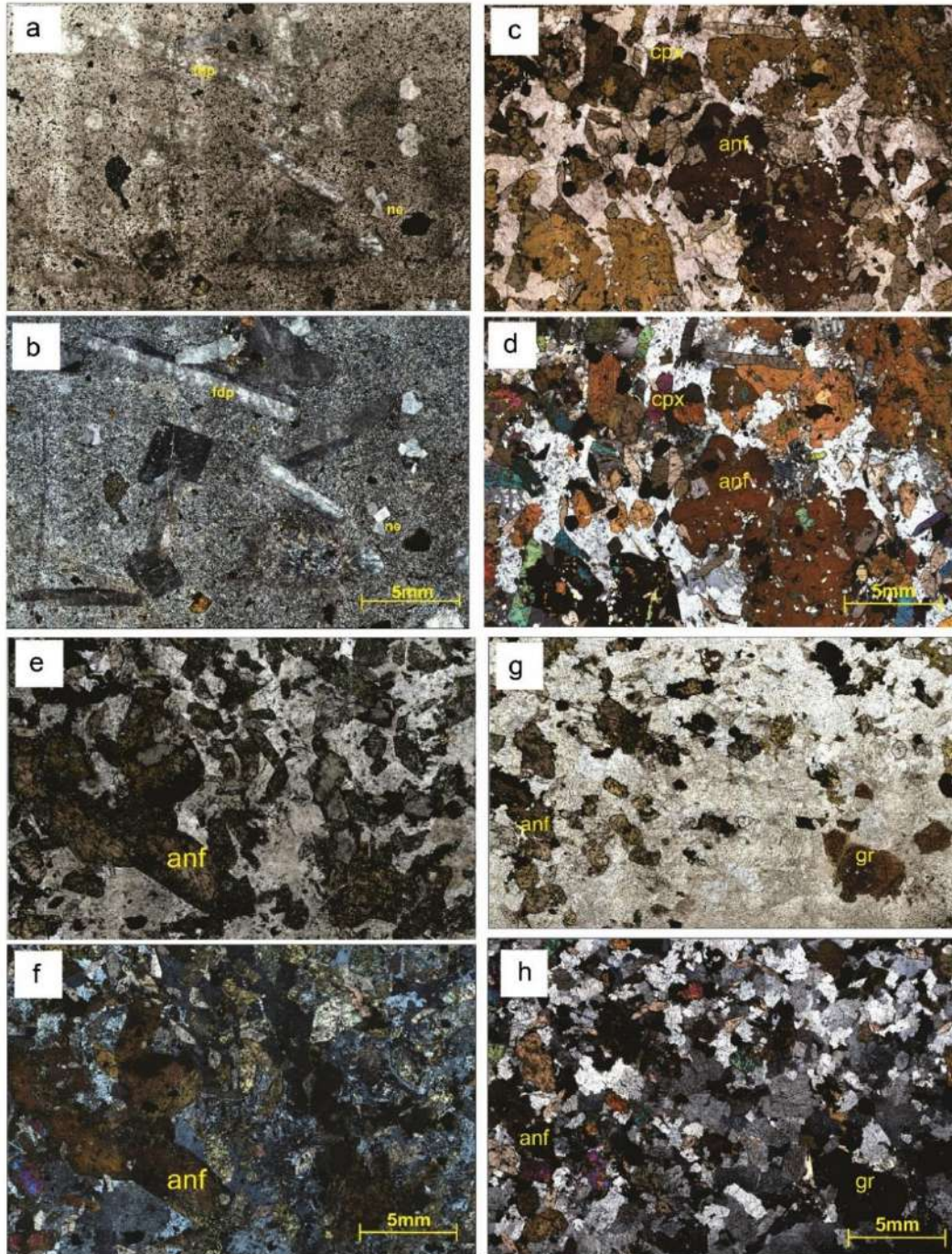
Nas rochas com mais nefelina (sienito com nefelina: <10% de nefelina e nefelina sienito: > 10% de nefelina) a quantidade de zircão e apatita diminui drasticamente, chegando a valores iguais ou abaixo de 1%.

O fonolito (Figura 18a e 18b) de textura glomeropofirítica possui fenocristais de feldspato alcalino em escala centimétrica e/ou grãos aglomerados de nefelina e clinopiroxênio, enquanto que a magnetita está disseminada na matriz. É possível observar a diminuição da granulação nos fonolitos em contato com outros litotipos, caracterizando uma margem resfriada. Também é possível observar texturas de assimilação e reação, onde minerais das rochas encaixantes são englobados por uma porção fina e recristalizada do fonolito. Alguns fenocristais prismáticos do fonolito se dispõem de forma subparalela, denotando uma estrutura de fluxo magmático.

As rochas melanocráticas estudadas têm piroxênio com hábito tabular (Figura 18c e 18d) que, juntamente com o anfibólio, correspondem a mais de 50% do total das amostras. Diferentemente das amostras das rochas félsicas, as rochas melanocráticas não apresentam bordas de reação no anfibólio. Contudo, o anfibólio apresenta textura poiquilítica ofítica com inclusões de pequenos grãos de feldspato alcalino, titanita, magnetita e clinopiroxênio. Texturas

de assimilação e margem resfriada são vistas onde se pode observar grãos de anfibólio corroídos e englobados por uma fase félsica. Os clinopiroxênios possuem hábitos tabulares.

Figura 18 – Fotomicrografia das principais feições das rochas do Morro de São João.



Legenda: Figura 18a e Figura 18b tem-se o fonolito a nicóis paralelos e cruzados, respectivamente, com destaque aos pórfiros de feldspato alcalino e glomeroporfiróblastos de nefelina. Figura 18c e Figura 18d corresponde a amostra do hornblenda gabro a nicóis paralelos e cruzados, respectivamente. Detalhe para os cristais de anfibólio com inclusões de titanita, magnetita, clinopiroxênio e feldspato alcalino. Figura 18e e Figura 18f da amostra do hornblenda sienito com nefelina a nicóis paralelos e cruzados, respectivamente. Detalhe para os cristais de anfibólio com bordas de reação. Figura 18g e Figura 18h tem-se a amostra do hornblenda sienito com nefelina a nicóis paralelos e cruzados, respectivamente. Destaque para os cristais de anfibólio com bordas de reação e cristais de granada.

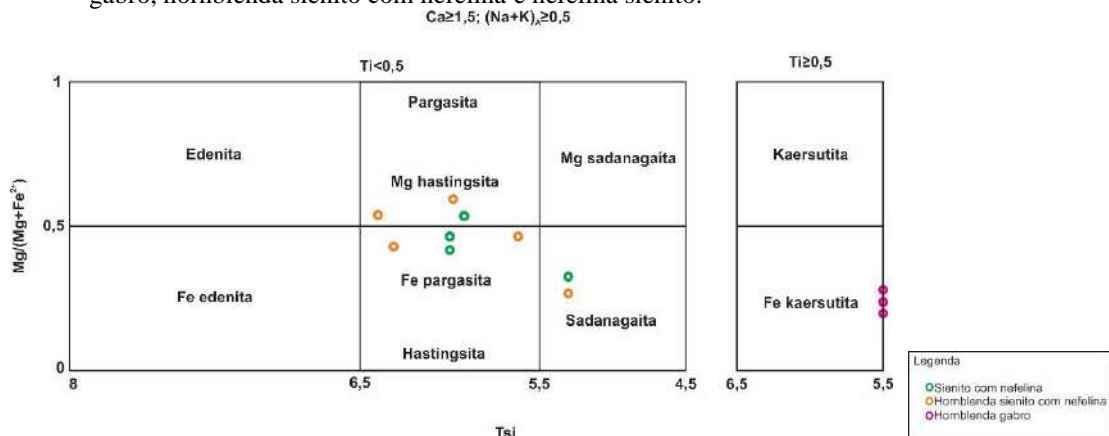
Fonte: A autora, 2019.

3.4 Química Mineral

Três amostras (sienito com nefelina-CAMSJ01, hornblenda sienito com nefelina-CAMSJ05 e hornblenda gabro-CAMSJ30), representativas de cada fácies descritas no trabalho de campo, foram selecionadas para análise da composição química dos minerais. Estas amostras foram escolhidas por serem constituídas de feldspato alcalino, anfibólio, clinopiroxênio e granada na sua associação mineral principal. Também como critério de escolha, foram selecionados os grãos que apresentavam o menor grau de sericitização e com estruturas cristalinas bem formadas.

As análises químicas nessas quatro fases minerais mostraram que a assembleia mineral estudada é rica em cálcio. Os cristais de anfibólio do sienito com nefelina e hornblenda sienito com nefelina são classificados, segundo Leake et al., (1997), como sadanagaíta ((K,Na)Ca₂(Fe,Mg,Al,Ti)₅(Si,Al)₈O₂₂(OH)₂) e hastingsita (NaCa₂(Mg,Fe)₄Fe³⁺[Si₆Al₂O₂₂](OH)₂) com , com variações de Mg núcleo-borda, e Fe-pargasita ((NaCa₂)(Mg₄Al)(Si₆Al₂O₂₂)). Essa modificação composicional nas bordas dos cristais de hornblenda vistas na microscopia óptica pode estar vinculada a concentração de Mg. Já os anfibólios do hornblenda gabro são classificados como Fe kaersutita (Ca₂(Na,K)(Mg,Fe⁺², Fe⁺³)₄Ti(Si₆Al₂O₂₂)(O,OH,F)₂), Figura 19.

Figura 19 – Gráfico de dispersão demonstrando a variação da composição dos anfibólios nas amostras de hornblenda gabro, hornblenda sienito com nefelina e nefelina sienito.

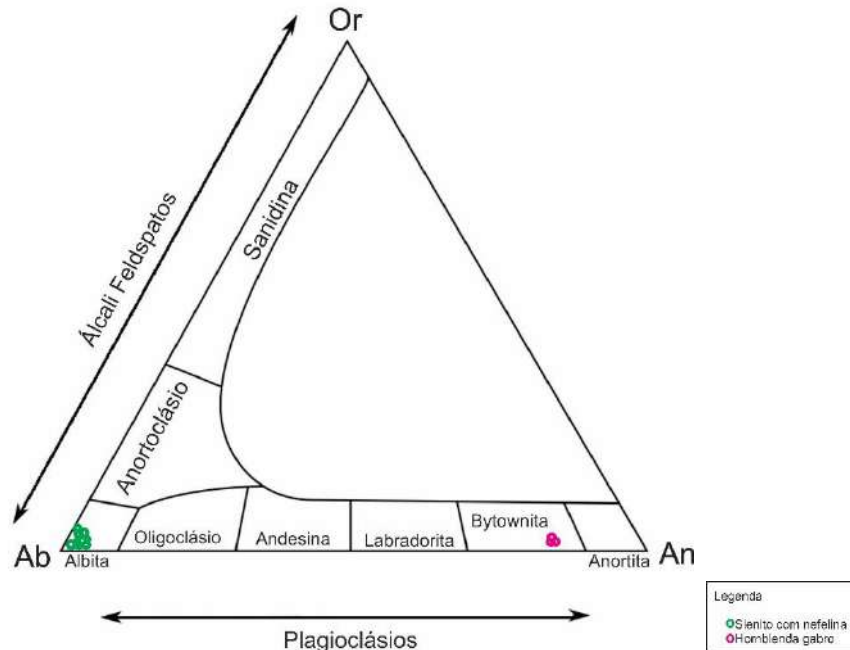


Fonte: Modificado de Leake et al., (1997).

Os plagioclásios (Figura 21), classificados segundo Deer et al., (1981), são albita (Ab₉₃An₅Or₀₂ - NaAlSi₃O₈) para as amostras de sienito com nefelina e hornblenda sienito com nefelina e bytownita (Ab₁₇An₈₂Or₀₁ - (Ca,Na)(Si,Al)₄O₈) para a amostra de hornblenda gabro.

Observa-se a redução nos teores de CaO nas amostras analisadas e aumento da concentração de Na₂O com a diminuição do teor de MgO das rochas.

Figura 20 – Diagrama ternário demonstrando a variação da composição dos plagioclásios nas amostras de hornblenda gabro e nefelina sienito.



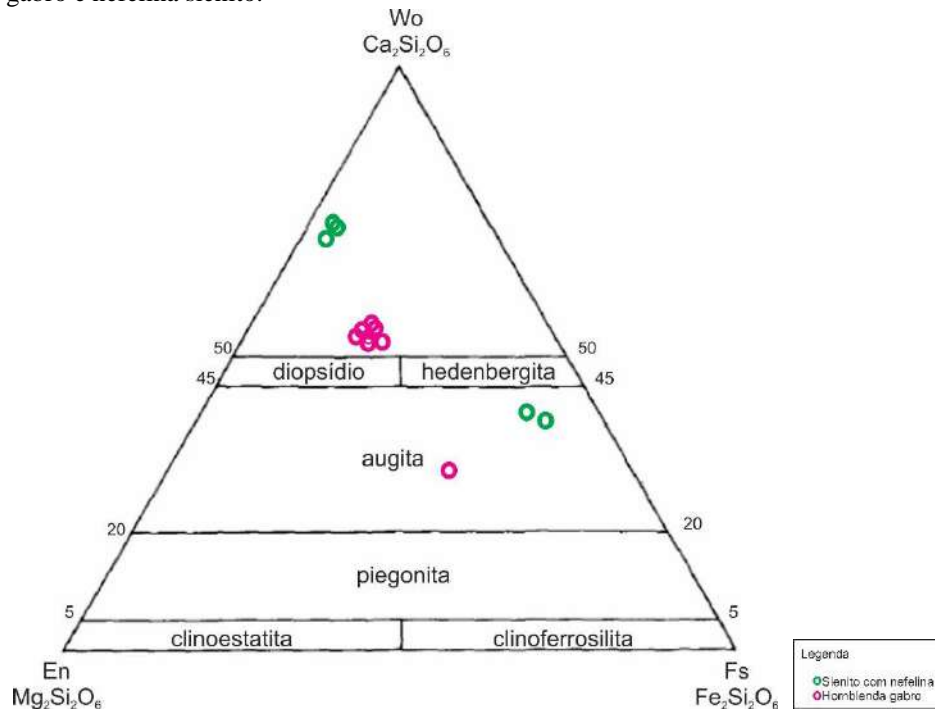
Fonte: Modificado de Deer et al., (1981).

É importante destacar a hipótese de que a mudança núcleo-borda dos anfibólios e, principalmente, a composição dos plagioclásios seja um reflexo da cristalização dessas fases minerais.

Os clinopiroxênios, segundo a classificação segundo Morimoto et al., (1988), para o sienito com nefelina apresentam uma composição dos *end-members* de $Wo_{51}En_{28}Fs_{21}$ e para as amostras do hornblenda gabro a média é $Wo_{53}En_{29}Fs_{18}$ (Figura 23). Para a amostra de hornblenda sienito com nefelina a composição é $Wo_{40}En_{10}Fs_{50}$, sendo os clinopiroxênios classificados dentro do diagrama ternário como augita.

Morimoto et al., (1988) apontam que a fórmula normalizada do piroxênio rico em Ca²⁺ não deve ultrapassar 50% de $Ca_2Si_2O_6$. Piroxênios que demonstram esse comportamento na composição dos *end-members* ($Ca_2Si_2O_6 > 50\%$) são considerados tendo uma composição incomum e a classificação deve ser referida à seção de piroxênios incomuns, ou piroxenoides.

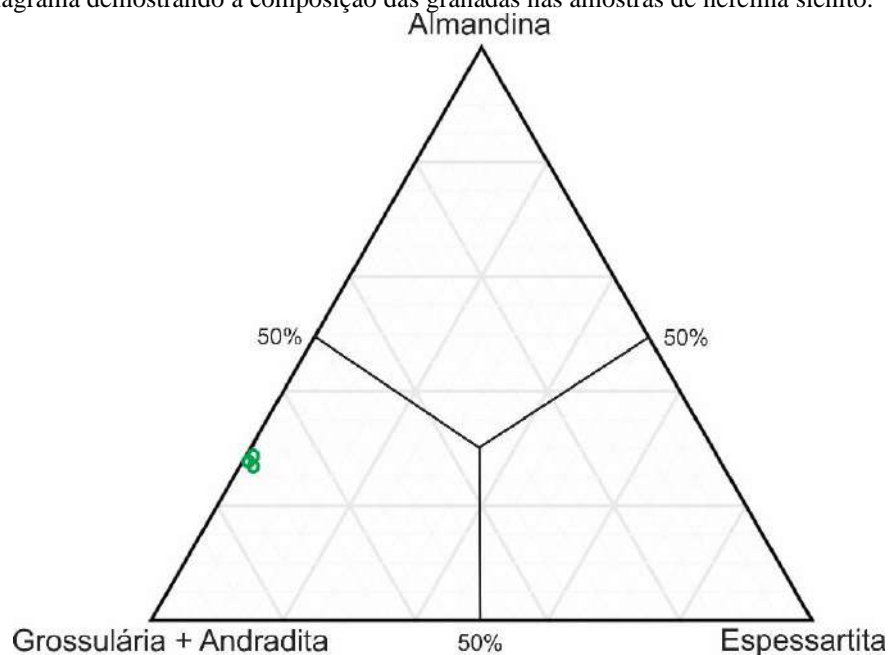
Figura 21 – Diagrama ternário demonstrando a variação da composição dos piroxênios nas amostras de hornblenda gabro e nefelina sienito.



Fonte: Modificado de Morimoto et al., (1988).

Plotados os valores dos *end-members* no gráfico classificatório segundo Grew (2013), as granadas (Figura 22) do sienito com nefelina apresentaram valores da média de $Py_{01}Alm_{30}Gro_{68}Sp_{01}$ para os *end-members* sendo classificada como grossulária ($Ca_3Al_2(SiO_4)_3$).

Figura 22 – Diagrama demonstrando a composição das granadas nas amostras de nefelina sienito.



Fonte: Modificado de Grew et al., (2013).

3.5 Litogeoquímica

Seis amostras coletadas durante os trabalhos de campo foram selecionadas para análise litogeoquímica. Os novos dados foram utilizados juntamente com aqueles obtidos por Brotzu et al. (2007) para dezesseis amostras do Morro de São João. As seis amostras analisadas foram coletadas no setor leste do maciço, mas são representativas de cada uma das três fácies discriminadas no campo e também abrangem todo o espectro de SiO₂ e MgO da amostragem de Brotzu et al. (2007) (Tabela 2).

3.5.1 Classificação Analítica

As amostras do Morro de São João compreendem um intervalo geoquímico que vai desde ultrabásico (37,30 a 45,55 -porcentagem em peso (%peso)- de teor de SiO₂), básico (47,03 a 52,03 - porcentagem em peso (%peso)- teor de SiO₂), até intermediário (52,71 a 55,28 -porcentagem em peso (%peso)- de teor de SiO₂), Tabela 2.

Tabela 2 - Dados litogeoquímicos dos elementos maiores do Morro de São João.

Amostra	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	(Fe ₂ O ₃) _t	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	BaO	SrO	LOI	Total
CAMSJ30	37,3	6.52	14.84	13.97	0.31	3.72	13.67	2.13	2.44	0.64	0.31	0.69	0.75	95.54
MJ68	39.87	5.75	6.98	15.07	0.31	8.14	16.14	0.66	3.31	3.76	0.44	0.20	0.10	100.63
CAMSJ05	40.74	5.76	13.77	10.60	0.25	3.67	11.36	2.29	5.45	0.93	0.13	0.19	2.97	95.14
MJ71	42.07	5.72	15.04	11.03	0.18	6.77	13.49	0.74	2.38	2.58	0.92	0.58	0.15	101.50
MJ69	42.36	5.15	14.86	11.82	0.20	6.15	13.43	0.77	2.45	2.81	0.63	0.53	0.36	101.16
MJ35	45.55	4.22	14.87	11.26	0.19	6.36	9.51	2.05	3.97	2.02	0.71	0.34	0.40	101.05
MJ70	47.03	3.80	17.51	9.00	0.22	2.91	10.09	3.48	5.31	0.65	0.47	0.83	0.99	101.30
MJ18	47.94	3.54	15.50	10.76	0.27	3.75	9.05	2.66	5.90	0.64	0.49	0.69	0.85	101.19
CAMSJ01	48.32	2.36	17.89	6.76	0.20	1.40	6.40	3.34	7.04	0.26	1.05	1.53	1.14	96.55
MJ11	50.78	2.84	15.92	8.53	0.21	3.15	7.30	1.82	8.26	1.20	0.12	0.25	0.68	100.38
MJ39	51.67	1.73	19.91	6.04	0.20	1.24	4.60	6.44	7.82	0.37	0.62	0.85	1.39	101.49
MJ32	51.79	1.71	20.58	5.64	0.18	1.36	4.52	5.32	8.62	0.28	0.32	0.43	1.46	100.75
CAMSJ29	51.96	0.55	20.91	2.67	0.15	0.32	1.99	7.53	7.96	0.09	0.04	0.11	1.82	94.28
CAMSJ11	52.04	1.45	18.74	4.74	0.16	1.07	4.24	5.37	6.80	0.16	0.63	0.72	0.87	96.12
MJ21	52.71	2.27	18.60	6.82	0.20	1.79	6.12	4.00	7.12	0.36	0.50	0.98	0.80	101.47
MJ74	52.83	2.30	19.44	6.41	0.18	1.65	5.95	3.65	7.18	0.42	0.21	0.39	1.29	100.61
MJ12	52.84	2.31	18.33	6.89	0.19	2.22	5.77	3.85	6.91	0.70	0.76	1.01	0.75	101.78
MJ28	54.23	1.36	20.64	4.30	0.13	1.08	3.79	4.76	9.49	0.23	0.31	0.41	1.62	100.73
MJ4	54.33	1.52	19.76	5.41	0.16	1.29	4.94	4.40	7.94	0.25	0.64	0.83	1.01	101.47
MJ15	54.74	2.00	18.55	5.84	0.20	1.48	4.14	3.79	8.85	0.40	0.76	0.87	1.37	101.62
CAMSJ37	54.81	0.42	21.61	2.29	0.15	0.19	1.76	7.79	7.91	0.03	0.01	0.08	0.84	97.05
MJ16	55.28	2.41	17.60	6.97	0.21	1.51	5.00	3.59	7.00	0.43	0.39	0.57	0.91	100.96

Nota: Fe₂O_{3t} é ferro total sob a forma de ferro férrico. LOI é a perda ao fogo.

Legenda: Amostras com prefixo CAMSJ são da autora e amostras com o prefixo MJ são compiladas do Brotzu et al., (2007).

Fonte: A autora, 2019.

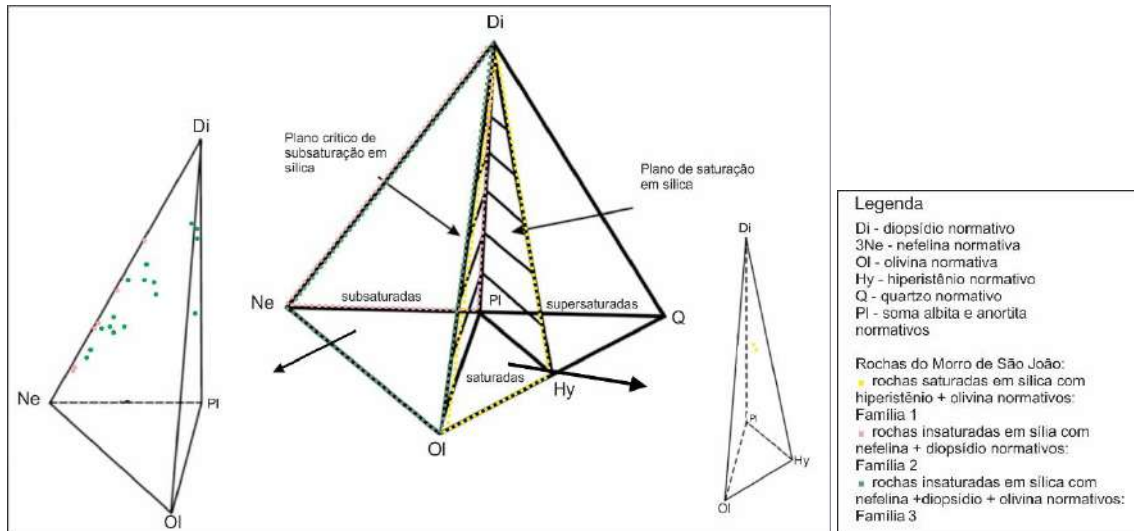
O caráter alcalino de 22 amostras é respaldado pela norma CIPW (Tabela 3 - Figura 23). A classificação normativa permite dividir o grupo analisado em 3 famílias distintas:

Família 1: saturada em SiO₂ com hiperstênio + olivina normativos.

Família 2: insaturadas em SiO₂ com nefelina + diopsídio normativos.

Família 3: insaturada em SiO₂ com nefelina + diopsídio + olivina normativos.

Figura 23 – Classificação geoquímica das rochas do Morro de São João segundo critério de saturação em sílica.



Nota: Cada família possui um campo específico representada pelas cores segundo legenda abaixo.

Fonte: Modificado de Yoder & Tilley (1962).

Tabela 3 – Resultado do cálculo da norma CIPW para as rochas do Morro de São João. Razões FeO/Fe₂O₃ segundo Middlemost (1989).

Amostra	Qtz	Plg	Or	Ne	Le	Crn	Dio	Hy	Wo	Ol	Lar	Acm	Ilm	Mg	Ap	Zr	Cro	Total
CA-MSJ-30	0	25,2	0	10,4	12	0	29,3	0	0	3,9	2,9	0	13,1	2,15	1,58	0	0,01	100,51
CA-MSJ-05	0	11,9	4	11,2	24	0	32,7	0	0,95	0	0	0	11,7	1,64	2,29	0	0,01	100,16
CA-MSJ-01	0	13,9	42	16,4	1,6	0	20	0	0,2	0	0	0	4,81	1,04	0,65	0	0,01	101,22
CA-MSJ-29	0	6,38	50	33	0	0	8,3	0	0,26	0	0	0,47	1,12	0,17	0,23	0	0,01	100,08
CA-MSJ-11	0	20,3	43	19,1	0	0	14,2	0	0	0,4	0	0	2,92	0,72	0,39	0	0,01	100,62
CA-MSJ-37	0	13,8	48	29,8	0	0	6,54	0	0,37	0	0	0	0,82	0,35	0,07	0	0,01	100,07
MJ11	0	13	49	7,32	0	0	15,3	0	0	5,9	0	0	5,43	1,25	2,8	0	0,01	100,18
MJ12	0	24,3	41	11,3	0	0	13,2	0	0	3,9	0	0	4,41	1	1,62	0	0,01	100,81
MJ15	0	15	53	13,4	0	0	11,9	0	0	2,2	0	0	3,82	0,86	0,93	0	0,01	100,77
MJ16	0	33,2	42	4,72	0	0	11	0	0	3,3	0	0	4,62	1,01	1	0	0,01	100,45
MJ18	0	13	34	12,3	1,1	0	25,5	0	0	4,9	0	0	6,78	1,58	1,51	0	0,01	100,57
MJ21	0	19,5	42	14,4	0	0	16,7	0	0	1,8	0	0	4,33	1	0,83	0	0,01	100,71
MJ28	0	7,06	56	21,9	0	0	10,1	0	0	1,2	0	0	2,6	0,62	0,53	0	0,01	100,35
MJ32	0	6,86	43	24,5	6,3	0	13,1	0	0	1,7	0	0	3,27	0,83	0,65	0	0,01	100,35
MJ35	0	32,4	24	2,68	0	0	13,6	0	0	14	0	0	8,09	1,65	4,73	0	0,01	100,46
MJ39	0	2,37	42	29,7	3,6	0	18	0	0,09	0	0	0	3,3	0,88	0,86	0	0,01	100,7
MJ4	0	18,6	47	16	0	0	13,1	0	0	1,5	0	0	2,91	0,78	0,58	0	0,01	100,7
MJ68	0	6,39	10	3,07	7,5	0	41,7	0	0	9,2	0	0	11,1	2,22	8,83	0	0,01	100,27
MJ69	0	36,8	15	0	0	0	17,2	8,4	0	5,3	0	0	9,89	1,73	6,58	0	0,01	100,54
MJ70	0	16,6	25	16,1	4,9	0	26,9	0	0	0,6	0	0	7,27	1,32	1,53	0	0,01	100,62
MJ71	0	37,3	14	0	0	0	18,3	5,7	0	6,5	0	0	11	1,61	6,05	0	0,01	100,67
MJ74	0	26,5	43	10,9	0	0	10,7	0	0	3,2	0	0	4,39	0,93	0,97	0	0,01	100,28

Legenda: Amostras com prefixo CAMSJ são da autora e amostras com o prefixo MJ são compiladas do Brotzu et al., (2007).

Fonte: A autora, 2019.

A partir dessas análises preliminares, as rochas do Morro de São João são divididas em 4 grupos com suas respectivas afinidades geoquímicas e que estão discriminadas na Tabela 4 a seguir:

Tabela 4 – Esquema de classificação dos grupos estabelecidos neste trabalho para as rochas do Morro de São João.

Grupo	Características
Grupo dos Gabros Ultrabásicos saturados em sílica - Grupo GS	Compreende os gabros ultrabásicos e saturados em SiO ₂ com diopsídio + hiperstênio normativos com caráter potássico para teores de K ₂ O vs. Na ₂ O
Grupo das rochas máficas/ultramáficas insaturadas em sílica - Grupo MI	Compreende as demais rochas máficas e ultramáficas (hornblenda gabro e hornblenda sienito com nefelina), ultrabásicos e básicos, instaurados em SiO ₂ com nefelina + diopsídio e/ou olivina normativos com caráter predominantemente potássico
Grupo dos Sienitos - Grupo SI	Compreende os sienitos, nefelina sienitos e sienitos com nefelina insaturados em sílica com nefelina + diopsídio e/ou olivina normativa com caráter potássico dominante
Grupo dos Fonolitos - Grupo FO	Compreende os fonolitos que são insaturados em sílica com nefelina + diopsídio normativo com caráter essencialmente transicional (entre potássico e sódico) para teores de K ₂ O vs. Na ₂ O

Legenda: Esquema com base em dados litogeoquímicos e normativos: Grupo dos Gabros Saturados em sílica - Grupo GS; Grupo das rochas Máficas/ultramáficas Insaturadas em sílica - Grupo MI; Grupo dos Sienitos - Grupo SI; Grupo dos Fonolitos - Grupo FO.

Fonte: A autora, 2019.

A Tabela 3 mostra o índice agpaítico (SØRENSEN, 1974) de sienitos com nefelina, nefelina sienitos e fonolitos do Morro de São João e indica o caráter miaskítico da série alcalina. Esta classificação é coerente com a associação mineralógica destas rochas, caracterizada por anfibólio hastingsita, nefelina e feldspato alcalino, como minerais principais, e titanita e magnetita como minerais acessórios (MARKS, 2011).

Tabela 5 – Valores do cálculo do Índice Agpaítico (IA) das rochas do Morro de São João com resultado para miaskíticas para todas as amostras.

Amostra	Na₂O	K₂O	Al₂O₃	IA	
CA-MSJ-01	3,34	7,04	17,89	0,580	Miaskítico
MJ39	6,44	7,82	19,91	0,716	Miaskítico
MJ32	5,32	8,62	20,58	0,677	Miaskítico
CA-MSJ-29	7,53	7,96	20,91	0,741	Miaskítico
CA-MSJ-11	5,37	6,80	18,74	0,649	Miaskítico
MJ21	4	7,12	18,6	0,598	Miaskítico
MJ74	3,65	7,18	19,44	0,557	Miaskítico
MJ28	4,76	9,49	20,64	0,690	Miaskítico
MJ4	4,4	7,94	19,76	0,624	Miaskítico
MJ15	3,79	8,85	18,55	0,681	Miaskítico
CA-MSJ-37	7,79	7,91	21,61	0,727	Miaskítico
MJ16	3,59	7	17,6	0,602	Miaskítico

Legenda: Amostras com prefixo CAMSJ são da autora e amostras com o prefixo MJ são compiladas do Brotzu et al., (2007).

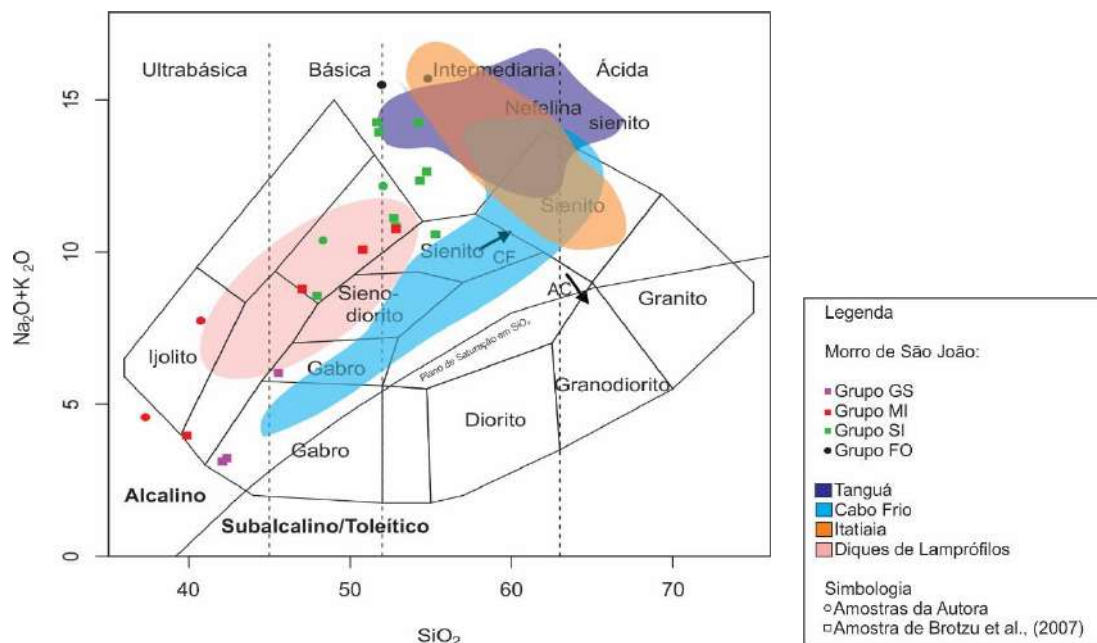
Fonte: A autora, 2019.

No diagrama de TAS - Total álcali vs. Sílica (COX et al 1979), que consiste num gráfico baseado na comparação do teor ponderal (%) total dos álcalis totais ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) da soma do teor em peso (%) de sílica (SiO_2), exibe um *trend* de fracionamento da relação cristal-líquido, formam um série geoquímica com tendência linear crescente em relação ao enriquecimento de SiO_2 (Figura 24). Todas as seis amostras deste estudo, bem como as amostras compiladas, inserem-se numa série alcalina fortemente insaturada em sílica, sendo predominantemente metaluminosas com uma leve tendência peralcalina (Figura 25).

Neste trabalho serão utilizadas amostras, a nível de comparação, do maciço de Tanguá (MOTOKI, 2015), Ilha de Cabo Frio (OLIVEIRA, 2019), Itatiaia (ROSA, 2017) e diques de lamprófiros da PASM (Província Alcalina da Serra do Mar - MOTOKI, 2015).

As rochas do Morro de São João constituem uma linha evolutiva fortemente insaturada em sílica, semelhante aos lamprófiros de PASM, mas distinto da tendência mais moderadamente alcalina de Tanguá, Ilha de Cabo Frio e Itatiaia (Figura 24). Além disso, parece haver uma série exclusivamente miaskítica metaluminosa em Morro de São João, ao contrário de Tanguá, Ilha de Cabo Frio e Itatiaia (Figura 25).

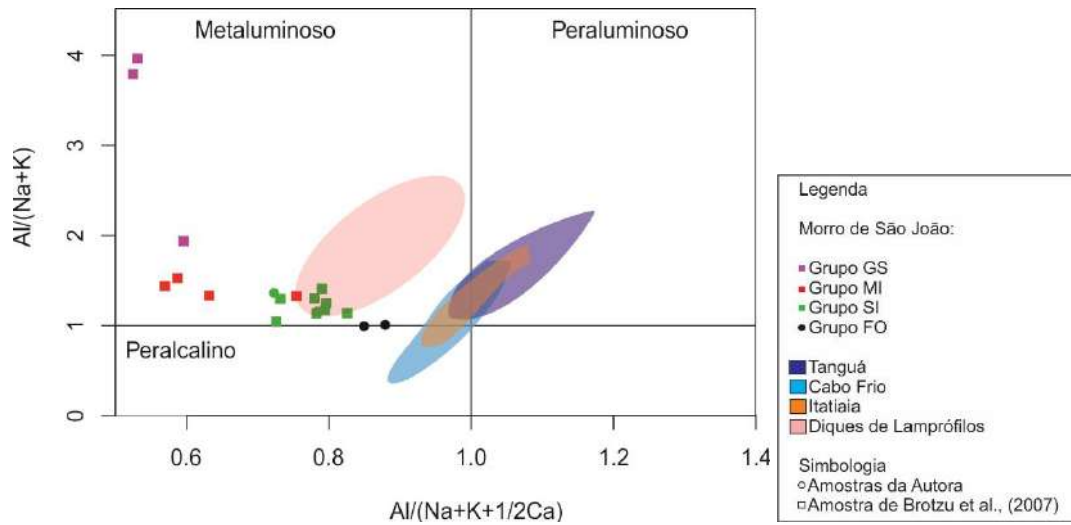
Figura 24: Diagrama Total Álcali vs. Sílica (COX et al 1979) para as rochas do Morro de São João.



Nota: O diagrama indica o espectro composicional, desde rochas ultrabásicas a intermediárias, todas de caráter alcalino. Os grupos estabelecidos estão discriminados na Tabela 4. Os campos de classificação de outros maciços alcalinos do Estado do Rio de Janeiro também são mostrados no diagrama.

Legenda: Modificado Cox et al., (1979).

Figura 25 – Rochas do Morro de São João classificadas em diagrama que utiliza o índice de Shand (1943).

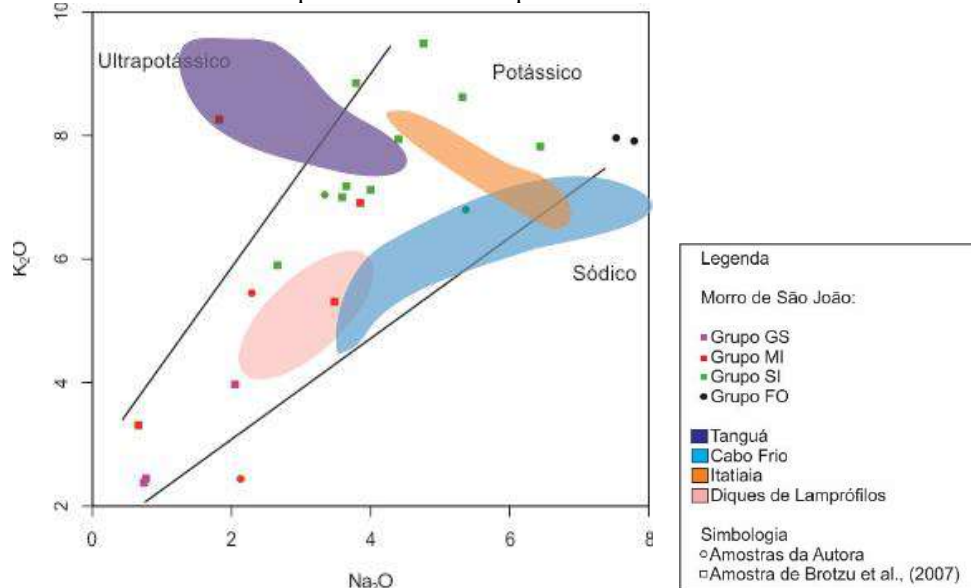


Nota: Os campos de classificação de outros maciços alcalinos do Estado do Rio de Janeiro também são mostrados no diagrama.

Fonte: Modificado de Shand (1943).

O maciço de Morro de São João é formado por rochas plutônicas com afinidade predominantemente potássica com alguns litotipos localizados no campo ultrapotássico e transicional sódico quando plotadas no gráfico Na_2O vs. K_2O proposto por Middelmost (1975 - Figura 26). As amostras dos demais corpos alcalinos possuem diversas assinaturas, muito embora predomine o caráter potássico para todos eles, à exceção, talvez, de Tanguá.

Figura 26 – Gráfico Na_2O vs. K_2O proposto por Middelmost (1975) para as rochas do Morro de São João demonstrando a tendência predominantemente potássica.



Fonte: Modificado de Middelmost (1975).

3.5.2 Diagramas de Variação

O MgO foi utilizado como índice de diferenciação nos diagramas de variação para investigação da compatibilidade e incompatibilidade dos elementos maiores e traços durante os processos de equilíbrio cristal-líquido (em especial, cristalização fracionada). A escolha do óxido MgO se deu por se tratar do óxido de maior variação percentual relativa dentre todos os outros. Este varia de 0,19 a 8,14 % (porcentagem em peso) em relação à SiO₂ que varia de 37,30 a 55,28 % peso.

As Figuras 27 e 28 mostram os diagramas de variação para os elementos maiores e traços, respectivamente.

Os gráficos de elementos maiores mostram (Figura 27) um *trend* evolutivo – positivo e negativo - ao longo do consumo de MgO denotando uma possível cogeneticidade por cristalização fracionada entre as amostras do Morro de São João.

Observa-se que nos diagramas de variação dos óxidos TiO₂, Fe₂O_{3(t)}, CaO, P₂O₅ existe um *trend* negativo, ou seja, quando há consumo do óxido de MgO (isto é, com o progresso da diferenciação), os demais óxidos citados acima são consumidos concomitantemente. Ou seja, há uma relação de compatibilidade com a fase sólida que está sendo cristalizada. As fases fracionantes mais óbvias, considerando-se os litotipos do Morro de São João, seriam clinopiroxênio, anfibólio, titanita, apatita e magnetita.

Em contrapartida, observam-se *trends* positivos dos óxidos de SiO₂, Al₂O₃, Na₂O, K₂O, apesar da maior dispersão neste último. Quando há consumo de MgO, esses óxidos permanecem no líquido o que remete a incompatibilidade desses elementos na fase sólida que está sendo cristalizada. Estes elementos são incorporados à cristalização em fases mais tardias. Assim, minerais como feldspato alcalino e nefelina, principalmente, não teriam sido envolvidos no processo de diferenciação magmática por cristalização fracionada.

As amostras dos maciços de Itatiaia e Ilha de Cabo Frio, por vezes, se assemelham aos padrões do Morro de São João. As amostras do maciço de Tanguá possuem um padrão restrito de variação composicional quando comparados com os demais e com o Morro de São João.

Figura 27 – Diagramas de variação para elementos maiores das amostras do Morro de São João, Tanguá, Ilha de Cabo Frio e Itatiaia. (continua)

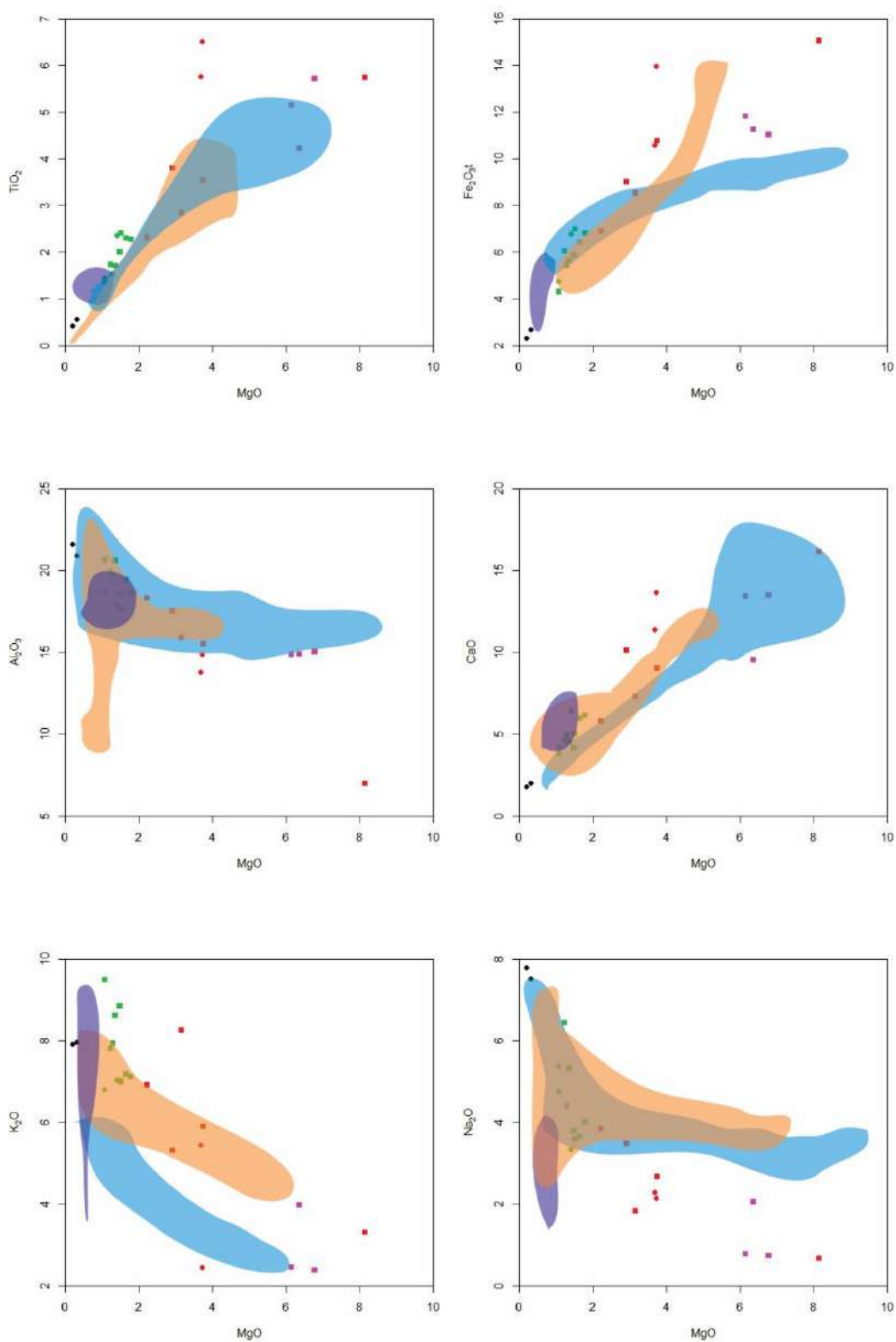
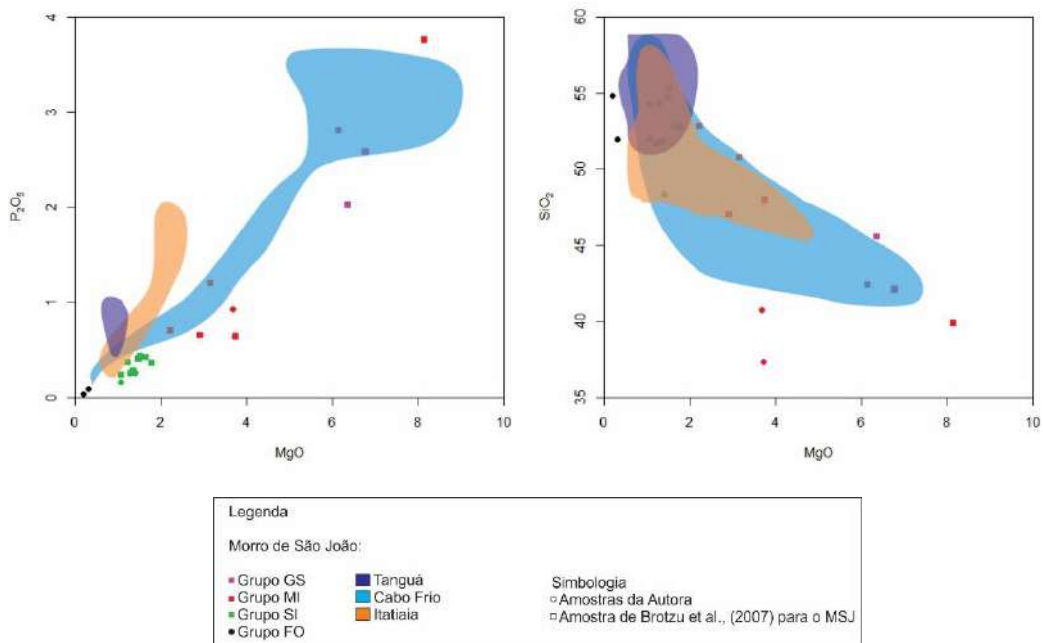


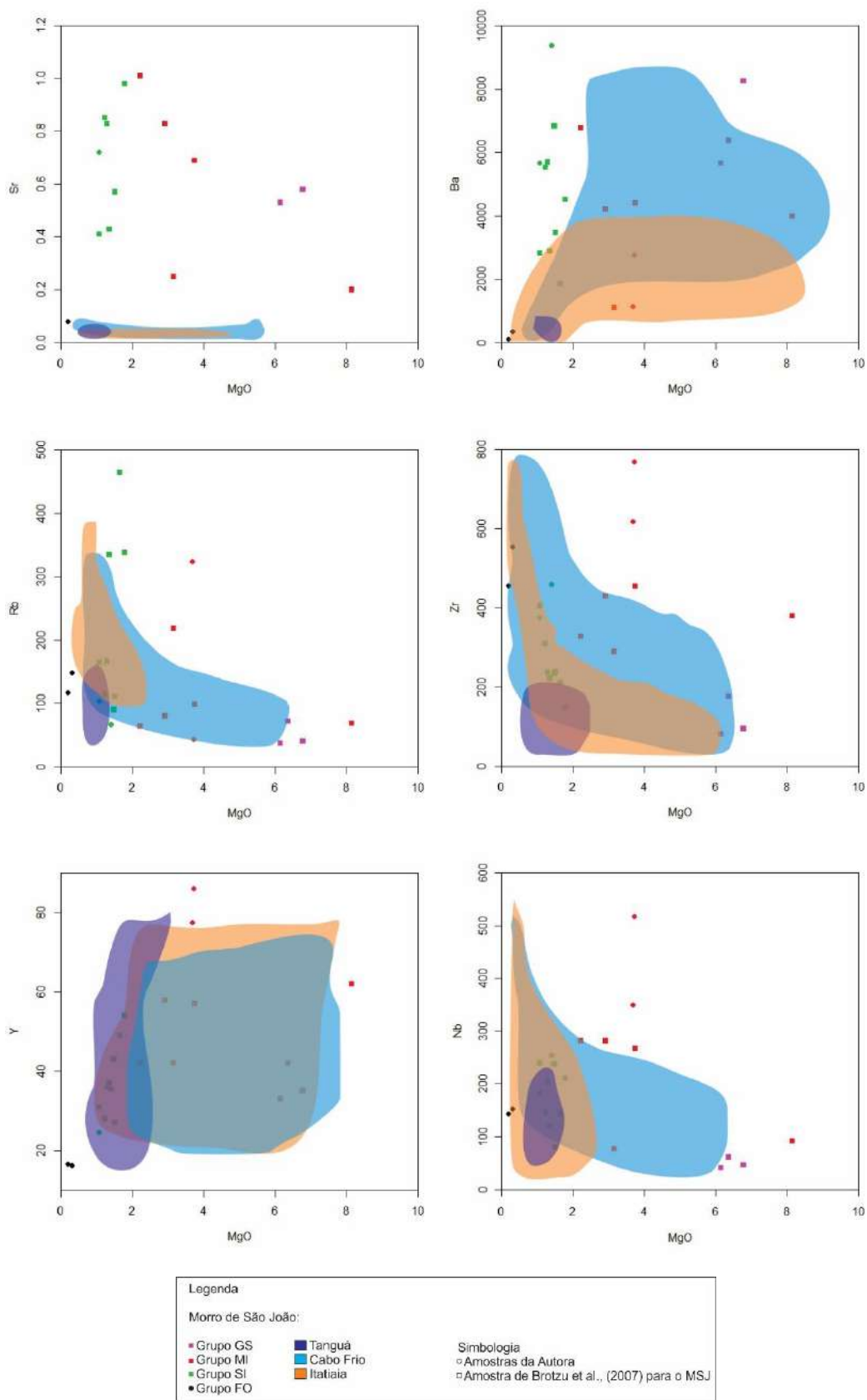
Figura 27 – Diagramas de variação para elementos maiores das amostras do Morro de São João, Tanguá, Ilha de Cabo Frio e Itatiaia. (conclusão)



Fonte: A autora, 2019.

Apesar de alguns dos elementos-traços mostrados na Figura 28 serem de caráter móvel, os valores de perda ao fogo (Tabela 2) são baixos, o que indica pouca alteração das amostras. Nos diagramas de variação feitos com elementos-traços não se observam quaisquer relações lineares com o índice de diferenciação (MgO - Figura 28) para o Morro de São João. Nas amostras dos demais maciços existe uma leve tendência nos elementos Rb, Zr e Nb denotando uma incompatibilidade com a fase rica em MgO que está sendo cristalizada. Contudo, as grandes áreas hachuradas nestes gráficos indicam a dispersão desses elementos sendo difícil uma interpretação em favor de processos evolutivos envolvendo exclusivamente cristalização fracionada.

Figura 28 – Diagramas de variação para elementos traços das amostras do Morro de São João, Tanguá, Ilha de Cabo Frio e Itatiaia.

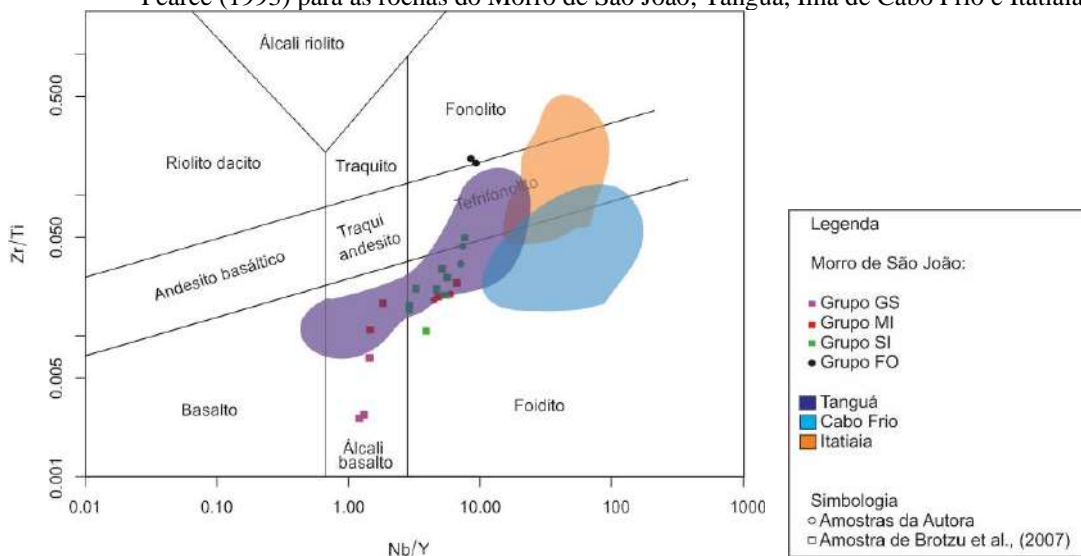


Fonte: A autora, 2019

Segundo Pearce (1996) a abundância e distribuição de alguns elementos traços em rochas vulcânicas frescas podem ser usados para classificar os produtos de diferenciação das séries de magma subalcalino e alcalino de maneira semelhante aos métodos usando índices normativos ou de elementos maiores. Ademais, o comportamento dos elementos traços são diferentes dos elementos maiores. As abundâncias absolutas e relativas de determinados elementos traços, como Zr, Y, Nb, Gd e Sc são estáveis durante processos de alteração de metamorfismo, hidrotermalismo e intemperismo (MOTOKI, 2015). Esses elementos, especialmente os HFSE (Zr, Nb, Hf, Ta e Ti), são úteis para a classificação de rochas que passaram por algum tipo de alteração (GAST, 1968, PEARCE & CANN, 1973 E PEARCE & PARKINSON, 1993).

No diagrama Nb/Y vs. Zr/Ti de Winchester & Floyd (1977) e modificado por Pearce, 1996 – Figura 29) é possível observar três grupos distintos no caso do Morro de São João, quais sejam: Um grupo composto pelos fonolitos, um segundo grupo composto pelos gabros saturados e um terceiro grupo que compõe rochas do Grupo SI e Grupo FO. As rochas de Itatiaia e Ilha de Cabo Frio não possuem variação significativa, ao passo que as amostras de Tanguá revelam uma tendência similar as rochas do Morro de São João.

Figura 29 – Diagrama classificatório Nb/Y vs. Zr/Ti proposto por Winchester & Floyd (1977), modificado por Pearce (1993) para as rochas do Morro de São João, Tanguá, Ilha de Cabo Frio e Itatiaia.



Nota: Observa-se o agrupamento de 3 grupos geoquímicos: composto pelos fonolitos, outro composto pelos gabros saturados em SiO₂ e um terceiro que compõe rochas do Grupo SI e Grupo MI.

Fonte: Modificado de Winchester & Floyd (1977) e Pearce (1993).

3.5.3 Elementos Terras Raras

Os padrões obtidos no diagrama multielementar dos elementos terras-raras normalizados para o condrito (Boynton, 1984) apontam duas tendências distintas dos grupos analisados (Grupo GS, Grupo MI, Grupo SI e Grupo FO).

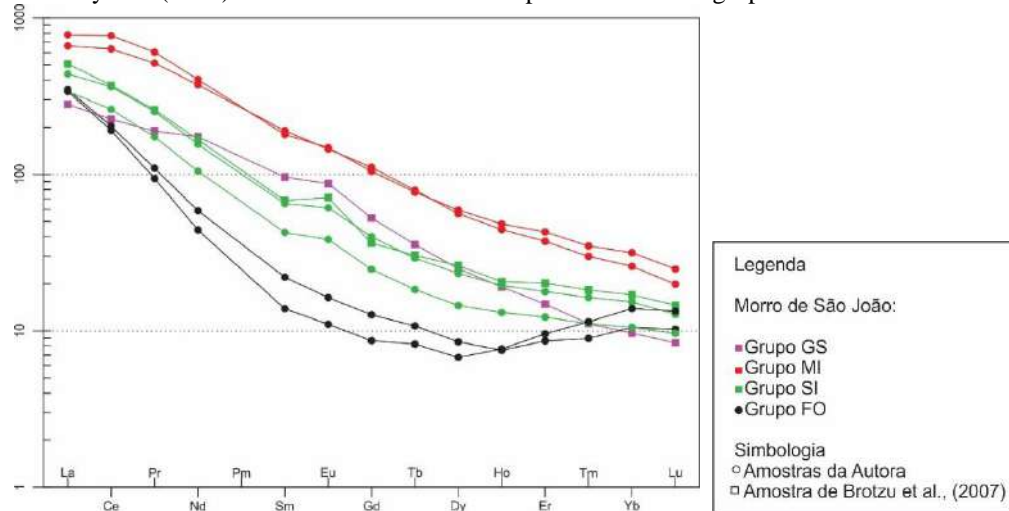
A primeira tendência abrange dois grupos: Grupo MI e Grupo GS (Figuras 31a e Figura 31b). Esta possui um padrão mais horizontalizado que, segundo Brotzu et al (2007) denota uma origem mantélica com razões $(La/Gd)_N = 5,33_{\min}$ a $39,30_{\max}$ e $(Gd/Yb)_N = 0,62_{\min}$ a $5,38_{\max}$. No Grupo MI essa tendência é ainda mais linear (Figura 31a) comparada ao Grupo GS que possui uma anomalia positiva de Eu ($Eu/Eu^* = 1,24$, onde $Eu^* = (Eu)_N / [(Sm)_N \times (Gd)_N]^{0,5}$), Figura 31b.

A segunda tendência observada compreende os demais grupos (Grupo SI e Grupo FO - Figura 31c e Figura 31d). Esta tendência exhibe um padrão inclinado côncavo que, segundo Brotzu et al. (2007), Melluso et al. (2017) e Azzone (2018), é indicativo de fracionamento magmático, em líquidos evoluídos, de anfibólios e titanita, majoritariamente. Este padrão indica empobrecimento nos elementos terras-raras intermediários em relação aos pesados ($La_N/Gd_N = 15,54_{\text{média}}$ e $Gd_N/Yb_N = 2,72_{\text{média}}$) pelo ao fracionamento da titanita em fonolitos evoluídos, onde há o empobrecimento de elementos terras raras intermediários. Este padrão côncavo é mais aparente no Grupo FO do que no Grupo SI que além disso possui uma leve anomalia positiva de Eu ($Eu/Eu^* = 1,3_{\text{média}}$).

Todos os grupos exibem padrões sutis de enriquecimento maiores em ETR_L (elementos terras raras leves) do que os ETR_P (elementos terras raras pesados). Esses valores variam de $(La/Yb)_N = 24,21$ a $32,79$ e as pequenas anomalias de Eu denotam um fracionamento incipiente do plagioclásio (MOTOKI et al., 2015).

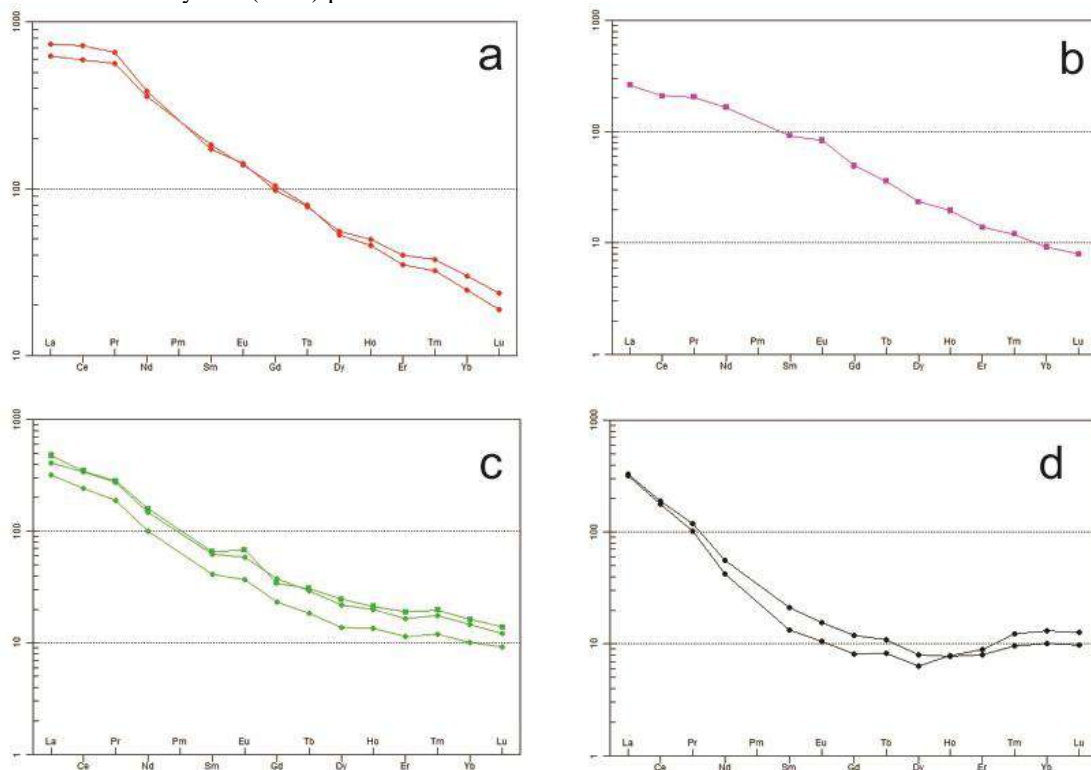
É interessante observar que as amostras mais evoluídas (Grupo FO) apresentam valores menos enriquecidos de elementos terras raras comparadas as rochas dos grupos mais evoluídos (Grupo GS e Grupo MI - Figura 30). Isto remete que a origem das rochas desse grupo é distinta com o pressuposto de que as rochas mais evoluídas desses grupos não são resultantes da cristalização fracionada das rochas menos evoluídas.

Figura 30 – Diagrama multielementares de Elementos Terras Raras normalizados para o Condrito segundo Boynton (1984) do Morro de São João comparando todos os grupos.



Fonte: Modificado de Boynton (1984).

Figura 31 – Diagramas multielementares de Elementos Terras Raras normalizados para o Condrito segundo Boynton (1984) para o Morro de São João.



Legenda: Figura 31a - Grupo MI; Figura 31b - Grupo GS; Figura 31c - Grupo SI; Figura 31d - Grupo FO.
Fonte: Modificado de Boynton (1984).

Tabela 6 – Tabela com valores das razões dos elementos terras raras do Morro de São João normalizadas para o condrito segundo Boynton (1984).

Amostra	Eu/Eu*	(La/Yb) _N	(La/Sm) _N	(Ce/Yb) _N	(Ce/Sm) _N	(Eu/Yb) _N	(La/Gd) _N	(Gd/Yb) _N	(La/Gd) _N	(Gd/Yb) _N	(La/Ce) _N
CA-MSJ-01	1,21	28,33	6,59	23,36	5,4	3 4,0	10,98	2,58	10,98	2,58	1,21
CA-MSJ-05	1	25,36	3,41	24,11	3,2	4 5,6	5,98	4,24	5,98	4,24	1,05
CA-MSJ-11	1,19	31,85	7,79	24,35	5,9	5 3,6	13,72	2,32	13,72	2,32	1,31
CA-MSJ-29	0,98	32,79	15,48	18,99	8,9	7 1,5	27,60	1,19	27,60	1,19	1,73
CA-MSJ-30	1,09	24,43	4,24	23,99	4,1	6 4,7	7,46	3,28	7,46	3,28	1,02
CA-MSJ-37	1,01	24,21	23,99	13,56	13,4	4 0,8	39,30	0,62	39,30	0,62	1,79
MJ69	1,24	28,68	2,85	22,89	2,2	8 9,1	5,33	5,38	5,33	5,38	1,25
MJ74	1,44	29,67	7,32	21,46	5,3	0 4,2	14,01	2,12	14,01	2,12	1,38

Fonte: A autora, 2019.

3.5.4 Elementos Traços

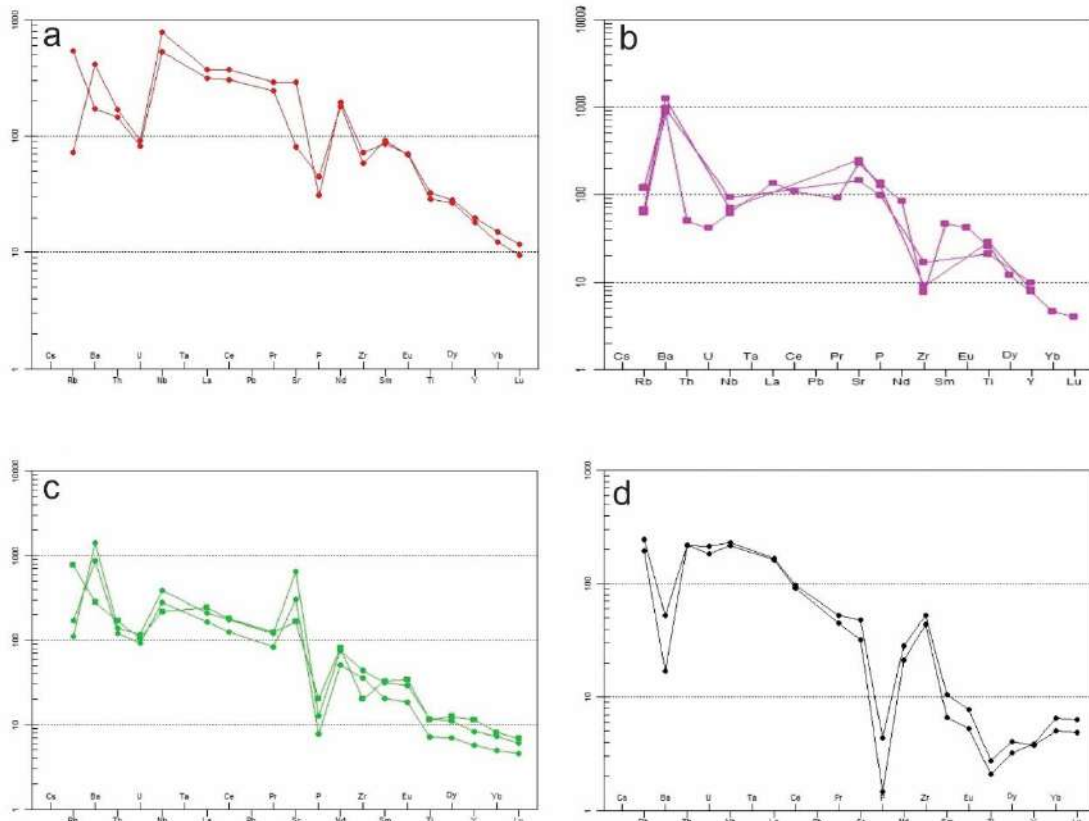
Observa-se nos diagramas multielementares de elementos traços normalizados para o Manto Primitivo, segundo McDonough & Sun (1995 - Figura 32), que os padrões dos elementos HFSE e terras-raras, em comparação aos LILEs, são mais retilíneos - com exceção do elemento Zr que possui anomalias negativas para o Grupo GS, MI e SI.

Já os LILEs não possuem um padrão bem determinado. O Ba possui anomalia positiva para o Grupo GS, MI e SI tendo uma concentração em torno de 1000 vezes a do manto primitivo. Já este mesmo elemento, para o Grupo FO, mostra anomalia negativa e a concentração é cerca de 10 vezes a do manto primitivo. O Rb apresenta concentrações de cerca de 100 vezes a o manto primitivo e o mesmo apresenta anomalias negativas e positivas nos Grupo MI e SI.

A variação positiva de Ba (Grupos GS, MI e SI) sugere a alta atividade de fluidos e que, em contrapartida, as anomalias negativas de Ba (Grupo FO) pode ser um efeito da assimilação crustal posteriormente o fracionamento do magma sienítico (MOTOKI et al., 2010 e 2015).

Um destaque para o Grupo FO que apresenta variação negativa de Ti bem marcada em relação aos demais grupos. A anomalia negativa do Ti refere-se ao fracionamento da titanita nestas rochas mais evoluídas (AZZONE 2016, 2018).

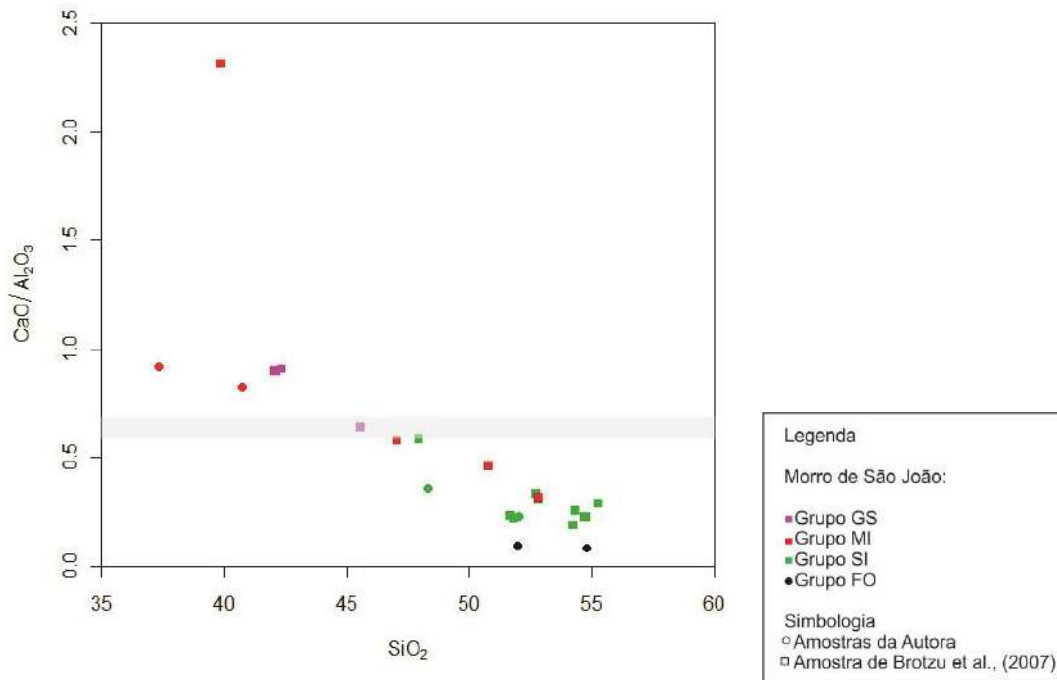
Figura 32 – Diagramas multielementares de Elementos Traços normalizados para o Manto Primitivo segundo McDonough & Sun (1995) para o Morro de São João



Legenda: . Figura 32a - Grupo MI; Figura 32b - Grupo GS; Figura 32c - Grupo SI; Figura 32d - Grupo FO.
Fonte: Modificado de McDonough & Sun (1995).

As anomalias negativas de Zr, como é observado no Grupo GS e MI, podem estar associadas aos líquidos oriundos de fonte metassomatizadas por fluidos carbonatíticos (ZENG, 2010). Segundo RUDNICK (1993) e AZZONE (2018), esse metassomatismo eleva as razões $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (Figura 33), $(\text{La}/\text{Zr})_N$, a exemplo da amostra MJ69 com razão $(\text{La}/\text{Zr})_N = 17,60$, contraponto 3,17 e 3,74 das amostras de fonolito. Além do mais, o mesmo processo metassomático diminui as razões $(\text{Ti}/\text{Eu})_N$ (Tabela 7). Esses valores para as rochas ultrabásicas são próximos a 0,5 e é compatível com outras rochas máficas do sul e sudeste brasileiros, tais como Juquiá, Ponte Nova e Jacupiranga, os diques de alcalinas da PASM, no Alto de Cabro Frio (OLIVEIRA, 2019; AZZONE, 2013, 2016 e 2018; VALENTE, 1997 e CHMYZ, 2017).

Figura 33 – Gráfico SiO_2 vs. $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ comparando as razões de $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ entre as rochas do Morro de São João sob possível influência de fluidos metassomatizados ricos em CO_2 representado pela faixa cinza.



Fonte: A autora, 2019.

Tabela 7 – Tabela com valores das razões dos elementos traços do Morro de São João normalizados para o Manto Primitivo segundo McDonough & Sun (1995).

Amostra	(Ba/Sr) _N	(Rb/Sr) _N	(La/Zr) _N	(Ti/Eu) _N	(La/Yb) _N	(La/Sm) _N	(Dy/Yb) _N	(Nb/Ta) _N
CA-MSJ-30	1,42	0,25	5,10	0,46	24,94	4,32	1,41	0,84
CA-MSJ-05	2,11	6,65	5,39	0,41	25,90	3,47	1,49	0,66
MJ69	3,79	0,27	17,60	0,61	29,28	2,91	1,55	
CA-MSJ-01	2,18	0,17	4,81	0,40	28,91	6,71	1,35	1,19
CA-MSJ-29	1,10	5,15	3,17	0,35	33,46	15,77	1,08	1,76
CA-MSJ-11	2,81	0,56	4,55	0,39	32,50	7,93	1,21	1,31
MJ74	1,70	4,68	12,13	0,34	30,29	7,46	1,09	
CA-MSJ-37	0,54	6,10	3,74	0,40	24,69	24,43	0,83	2,06

Fonte: A autora, 2019.

A Figura 34 mostra os dados dos maciços da Ilha de Cabo Frio, Tanguá e Itatiaia normalizados para o condrito segundo Boynton (1984) e McDonough & Sun (1995) para fins de comparação com as amostras do Morro de São João.

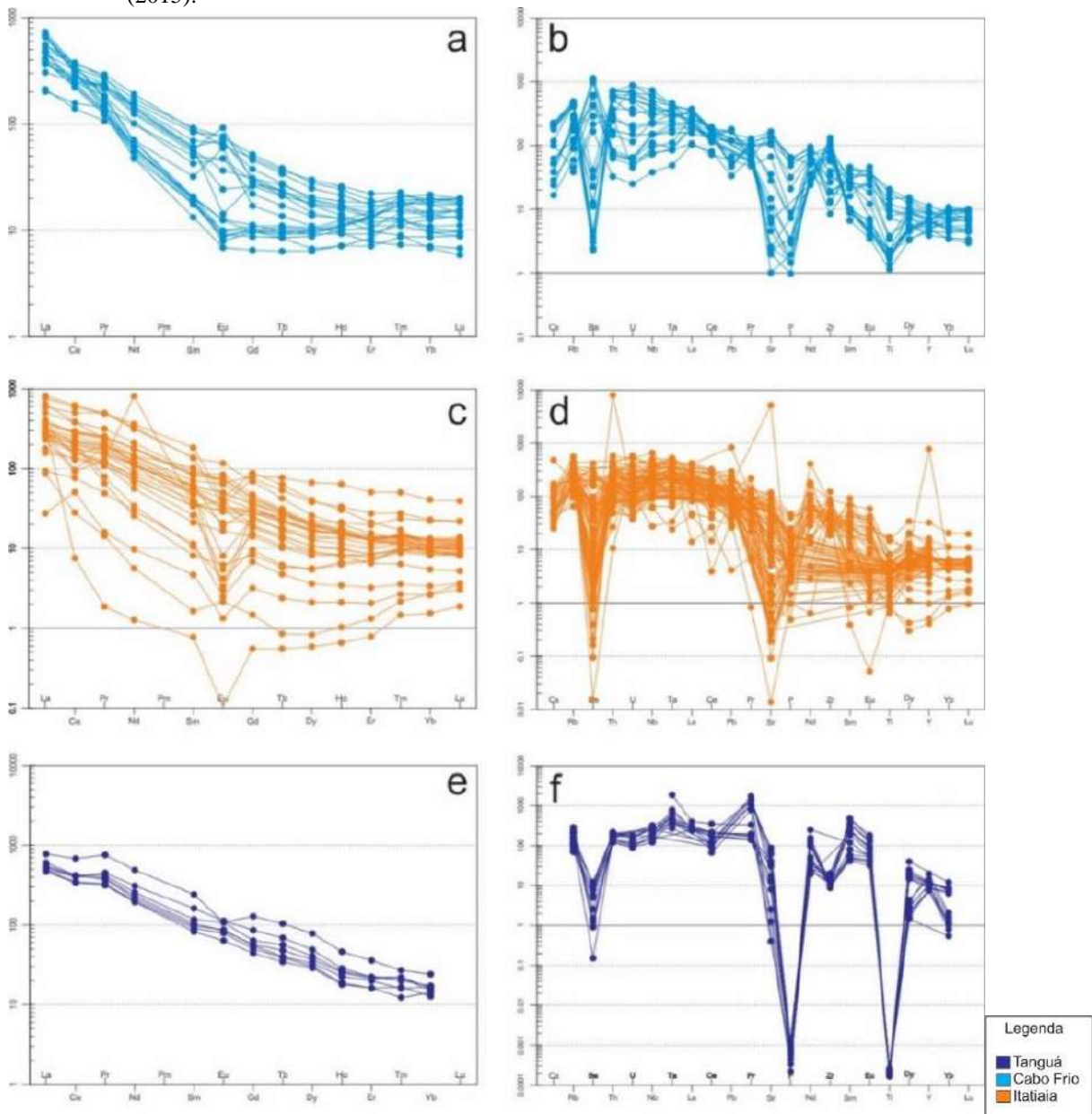
Para as análises normalizadas para o condrito, as rochas da Ilha de Cabo Frio (Figura 34a) apresentam um padrão semelhante ao do Morro de São João onde as rochas mais evoluídas exibem um padrão côncavo e as mais evoluídas um padrão mais linear.

As amostras do maciço de Itatiaia exibem um padrão semelhante ao da Ilha de Cabo Frio para a análise normalizada para o condrito (Figura 34c), dando destaque para a anomalia

acentuada de Eu. Já as normalizadas para o manto primitivo possuem uma anomalia bem significativa de Ba e Sr.

Para as amostras de Tanguá, observa-se na Figura 34e uma variação linear de elementos terras raras com uma leve anomalia de Eu que denota um fracionamento irrelevante de plagioclásio (MOTOKI, 2015) As amostras normalizadas para o manto primitivo mostram anomalias negativas acentuadas dos elementos P e Ti (Figura 34f).

Figura 34 – Dados das amostras do maciço da Ilha de Cabo Frio (Figura 34a e Figura 34b) de Oliveira (2019), Itatiaia (Figura 34c e Figura 34d) de Rosa (2017), e Tanguá (Figura 34e e Figura 34f) de Motoki (2015).



Fonte: Modificado de Boynton (1984) e Modificado de McDonough & Sun (1995).

3.6 Modelagem Geoquímica

Processos de assimilação e mistura magmática podem ser sugeridos para a petrogênese do Morro de São João com base em dados de campo e petrográficos. Por outro lado, a coerência das amostras plotadas em diagramas de variação, especialmente para elementos maiores, são, de modo geral, condizentes com o processo de cristalização fracionada.

Modelos geoquímicos podem ser elaborados para testar hipóteses de processos evolutivos e decidir qual ou quais os mais prováveis de terem ocorrido na formação de uma série magmática.

Para a hipótese de cristalização fracionada (com ou sem assimilação), considera-se que a olivina e o piroxênio são as fases fracionantes comuns em rochas ultramáficas e máficas. De modo geral todos os elementos terras-raras são incompatíveis durante o processo de equilíbrio cristal-líquido entre essas fases e magmas máficos (ROLLINSON, 1993). Conseqüentemente, os padrões de elementos terras raras dos litotipos félsicos (representantes de líquidos mais evoluídos) deveriam colocar-se acima dos padrões dos litotipos máficos, o que não é observado no caso de Morro de São João (Figura 31). A fase capaz de reter os elementos terras-raras médios e possibilitar uma relação de cogeneticidade das rochas máficas e félsicas de Morro de São João é a hornblenda.

Para testar a hipótese de cogeneticidade por cristalização fracionada, utiliza-se a Equação de *Rayleigh* proposta por Wood & Fraser (1976) é expressada por:

$$C_1/C_0 = F^{(D-1)} \quad (1)$$

Onde:

C_1 é a concentração do elemento traço na fase líquida evoluída;

C_0 é a concentração do elemento traço na fase líquida mais parental;

F é a quantidade de líquido remanescente, logo, $1-F$ é a quantidade de cristalização fracionada; e

D é coeficiente de partição total. $D = \sum_{i=1}^n W_i \cdot K_{d_i}$, onde W é a proporção de fracionamento da fase i e K_{d_i} é o coeficiente de partição cristal/líquido para líquidos da fase i . Os valores de coeficiente de partição (K_D) da hornblenda segundo Rollinson (1993) são utilizados no modelo geoquímico elaborado a seguir.

Os resultados da modelagem são apresentados na Tabela 8. A amostra CAMSJ30 (hornblenda gabro - C_O e $C_O^N_{real}$) representa um magma máfico parental e o modelo calcula a composição de um líquido modelo gerado por 81% (1-F) de fracionamento exclusivamente do mineral hornblenda. O processo é validado pela aproximação entre a composição do líquido modelado (C_L e $C_L^N_{calculado}$) e a composição da amostra representativa do líquido evoluído real, neste caso, CAMSJ11 (nefelina sienito - C_L e $C_L^N_{real}$). A validação é estimada pelas diferenças percentuais entre os valores calculados e reais. Os valores elevados para a maior parte dos elementos não são condizentes com uma relação de cogeneticidade por cristalização fracionada entre líquidos máficos/ultramáficos e félsicos do Morro de São João envolvendo o único mineral máfico (hornblenda) capaz de gerar os padrões de elementos terras raras vistos na Figura 30.

As amostras utilizadas para as análises de modelagem estão discriminadas a seguir:

CAMSJ01	Sienito (selecionada como o membro híbrido)
CAMSJ05	Hornblenda sienito com nefelina
CAMSJ11	Nefelina sienito (selecionado como o membro mais evoluído)
CAMSJ29	Fonolito
CAMSJ30	Hornblenda gabro (selecionada como o membro mais parental)
CAMSJ37	Fonolito

Tabela 8 – Tabela com os cálculos de modelagem geoquímica para testar a hipótese de cristalização fracionada.

Líquido remanescente/Quantidade de cristalização fracionada		Assembleia fracionante (em % vol.)				
F=	19	Mineral	Olivina	Titanita	Hornblenda	Soma
1-F=	81		0	0	100	100

Kd			Elemento	D	Co	CL	CL	Fator de normalização	Co ^N	CL ^N	CL ^N	Diferença percentual
Olivina	Titanita	Hornblenda			(real)	(real)	(calculado)		(real)	(real)	(calculado)	
0,012	2,1	0,5442	La	0,544	241,9	105,1	515,7	0,329	735	319	1567	391
0,009		0,843	Ce	0,843	622,5	210,6	807,9	0,865	720	243	934	284
0,005			Pr		73,82	21,19	388,5	0,112	659	189		100
0,004		1,3395	Nd	1,340	242,6	63,0	138,0	0,63	385	100	219	119
			Pm									
0,003	11	1,8035	Sm	1,804	35,1	8,3	9,2	0,203	173	41	46	11
0,003	0,06	1,5565	Eu	1,557	10,90	2,82	4,3	0,077	142	37	56	53
0,004		2,0163	Gd	2,016	27,13	6,41	5,0	0,276	98	23	18	22
0,004			Tb		3,65	0,87	19,2	0,047	78	19		
0,0017		2,0235	Dy	2,024	19,06	4,68	3,5	0,343	56	14	10	26
0,007	11		Ho		3,46	0,94	18,2	0,07	49	13		
0,008		1,74	Er	1,740	9,01	2,57	2,6	0,225	40	11	12	3
0,009			Tm		1,13	0,36	5,9	0,03	38	12		
0,013		1,642	Yb	1,642	6,60	2,20	2,3	0,22	30	10	10	3
0,018	6	1,5625	Lu	1,563	0,80	0,31	0,3	0,0339	24	9	9	1

Legenda: Onde se tem o membro CAMSJ30 (C_o e $C_o^{N_{real}}$) como representante de um magma máfico parental, CAMSJ11 (C_L e $C_L^{N_{real}}$) a amostra mais evoluída e (C_L e $C_L^{N_{calculado}}$) o membro de magma félsico evoluído modelo. Considera-se 1-F: 81 como sendo 81% de fracionamento da hornblenda para testar a hipótese. A diferença percentual é entre $C_L^{N_{real}}$ e $C_L^{N_{calculado}}$.

Fonte: A autora, 2019.

Já a modelagem do processo de de hibridização (ou seja, de mistura magmática homogênea, ou *magma mixing*) utilizou a seguinte equação geral:

[**Amostras A:** CAMSJ05 ou 30 - hornblenda sienito com nefelina ou hornblenda gabro] + [**Amostra B:** CAMSJ11 - nefelina sienito] = [**Amostra C:** CAMSJ01 - sienito], onde:

Amostra A: representante do líquido máfico/ultramáfico;

Amostra B: representante do líquido félsico;

Amostra C: representante do líquido híbrido.

A hipótese de hibridização entre as composições máficas/ultramáficas e félsicas foi testada com um modelo utilizando-se a equação de mistura binária (FAURE, 1984 - Tabela 9) tendo as amostras CAMSJ30 como membro máfico da mistura, mantendo-se a amostra CAMSJ11 como membro félsico e considerando a amostra CAMSJ01 como representativa da composição híbrida. Foi gerado um modelo onde a composição de elementos terras raras deste híbrido modelo seja semelhante da amostra CAMSJ01.

A Equação de Mistura Binária proposta por Faure (1984) é expressada por:

$$W_C = (f_A \times W_A) + [(1-f) \times (W_B)] \quad (2)$$

Onde:

WA e WB são pesos (ou volumes) dos componentes A e B em uma dada mistura; WC é o peso do híbrido e f é a quantidade de mistura dada pela contribuição do membro A. Os resultados do modelo são apresentados na Tabela 9. O melhor ajuste envolvendo os membros A, B e C escolhidos foi obtido com 19% de mistura. Outras possibilidades são apresentadas no próximo capítulo da dissertação.

Tabela 9 – Tabela com os cálculos de modelagem geoquímica para testar a hipótese de hibridização.

Elemento	Membro	Membro	Híbrido	Fatores de normalização	Elemento normalizado	Membro	Membro	Híbrido	0.19
	A	B	C			A	B	C	
	CAMSJ30	CAMSJ11	CAMSJ01			CA-MSJ-30	CA-MSJ-11	CA-MSJ-01	
La	241,9	105,1	136	0,329	La	735,3	319,5	413,4	398,5
Ce	622,5	210,6	293,9	0,865	Ce	719,7	243,5	339,8	333,9
Pr	73,82	21,19	30,8	0,112	Pr	659,1	189,2	275,0	278,5
Nd	242,6	63	93,5	0,63	Nd	385,1	100,0	148,4	154,2
Pm					Pm				
Sm	35,1	8,3	12,7	0,203	Sm	172,9	40,9	62,6	66,0
Eu	10,9	2,82	4,5	0,077	Eu	141,6	36,6	58,4	56,6
Gd	27,13	6,41	10,36	0,276	Gd	98,3	23,2	37,5	37,5
Tb	3,65	0,87	1,38	0,047	Tb	77,7	18,5	29,4	29,7
Dy	19,06	4,68	7,5	0,343	Dy	55,6	13,6	21,9	21,6
Ho	3,46	0,94	1,4	0,07	Ho	49,4	13,4	20,0	20,3
Er	9,01	2,57	3,74	0,225	Er	40,0	11,4	16,6	16,9
Tm	1,13	0,36	0,53	0,03	Tm	37,7	12,0	17,7	16,9
Yb	6,6	2,2	3,2	0,22	Yb	30,0	10,0	14,5	13,8
Lu	0,8	0,31	0,41	0,0339	Lu	23,6	9,1	12,1	11,9

Legenda: Onde se tem o membro CAMSJ30 - A como representante de um magma máfico parental, membro CAMSJ11-B a amostra mais evoluída e membro C o híbrido.

Fonte: A autora. 2019

4 DISCUSSÕES

4.1 Interpretação dos Processos Petrogenéticos

Ainda que o entendimento de processos petrogenéticos em rochas ígneas dependa, principalmente, de estudos geoquímicos, tanto relativos à fonte magmática quanto à interação com rochas encaixantes e cristalização de fundidos, o estudo petrográfico, com caracterização textural, das rochas geradas pelos fundidos é fundamental para definição de condições e etapas de cristalização.

Dada as observações de campo, atreladas à petrografia e geoquímica, é possível estabelecer algumas relações dos processos petrogenéticos envolvidos na evolução do magmatismo em questão.

4.1.1 Arquitetura e concentricidade do maciço

Diferentemente dos demais maciços alcalinos do estado do Rio de Janeiro, o Morro de São João possui um volume de rochas ultramáficas e máficas considerável. Nos demais corpos estas litologias afloram em forma de enclaves e diques (OLIVEIRA, 2019).

Em relação ao volume de rochas máficas e ultramáficas, em termos comparativos, o Morro de São João assemelha-se, em parte, ao Maciço Ponte Nova (AZZONE, 2018), que também faz parte da Província Alcalina do Sudeste Brasileiro.

No entanto, sua concentricidade cônica com topografia acentuada, que contrasta com a área circundante, somado às características litológicas como zoneamento inverso -núcleos máficos a ultramáficos cercados por uma zona intermediária e por fim, uma camada externa de rochas félsicas- o Morro de São João é comparável a maciços graníticos pós-colisionais localizados no cinturão orogênico Ribeira-Aracuaí, sudeste brasileiro, tais como: Santa Angélica (BAYER, 1987 e TULLER, 1993), Várzea Alegre (MEDEIROS, 2000 e MENDES, 1997), Pedra Azul/Aracê (BAYER, 1987 e COSTA-DE-MOURA, 1999), Castelo (WIEDEMANN, 1997), Mimoso do Sul (LUDKA, 1991) e Conceição de Muqui (MURAD, 1992 e WIEDEMANN, 2001). Wiedemann (2001) e De Campos (2006) apontam que essas

características são típicas de magmatismo bimodal e evidência de mistura entre magmas de composição consideravelmente contrastantes. Wiedemann (2001) ainda considera que esses maciços graníticos não foram colocados através de um simples dique permissivo, nem um simples mecanismo de *ballooning*, mas sim, zonas de fragilidade das rochas como foliação regional e zonas de cisalhamento.

4.1.2 Interpretação a partir dos dados petrográficos e litogeoquímicos

O Grupo GS forma uma série fracamente saturada em sílica com valores de $Ol_{norm} < 8$ e $Q_{norm} = 0$. Este grupo é composto pelos gabros descritos pelo Brotzu et al. (2007). O Grupo MI é uma série moderadamente insaturada em sílica com valores médios de $Ne_{norm} \sim 9$, e é representado pelo hornblenda gabro descrito nesta dissertação e shonkinito, gabro, clinopiroxenito e sienito melanocrático pelo Brotzu et al. (2007). O Grupo dos sienitos, representado pelos sienitos, sienitos com nefelina e nefelina sienitos, forma uma série fortemente instaura em sílica com valores chegando a $Ne_{norm} = 30$. Por fim, O Grupo dos Fonolitos, representado pelos fonolitos, também forma uma série fortemente insaturada em sílica com valores $Ne_{norm} = 33$ e 30.

Levando em consideração que estas rochas estão encaixadas em embasamento crustal silicático do Terreno Cabo Frio na Faixa Ribeira, é possível pressupor que a diferença nos valores de saturação em sílica dessas amostras analisadas provém da assimilação de um material crustal rico em sílica e que é completamente capaz de fornecer quantidade suficiente de sílica para ocasionar essas mudanças nos teores.

Sørensen (1974) pontua que este é um mecanismo frequente para a formação dos litotipos saturados. Azzone (2016) aponta que no maciço alcalino ultramáfico de Ponte Nova, há diferentes proporções de assimilação crustal durante a formação e *emplacement* de rochas com nefelina normativa. Porém, dados de campo e litogeoquímica são necessários para descrever minuciosamente esse processo de assimilação. Ademais, é possível ver que no Morro de São João existem relações estruturais que indicam processos muito mais complexas do que simplesmente assimilação crustal.

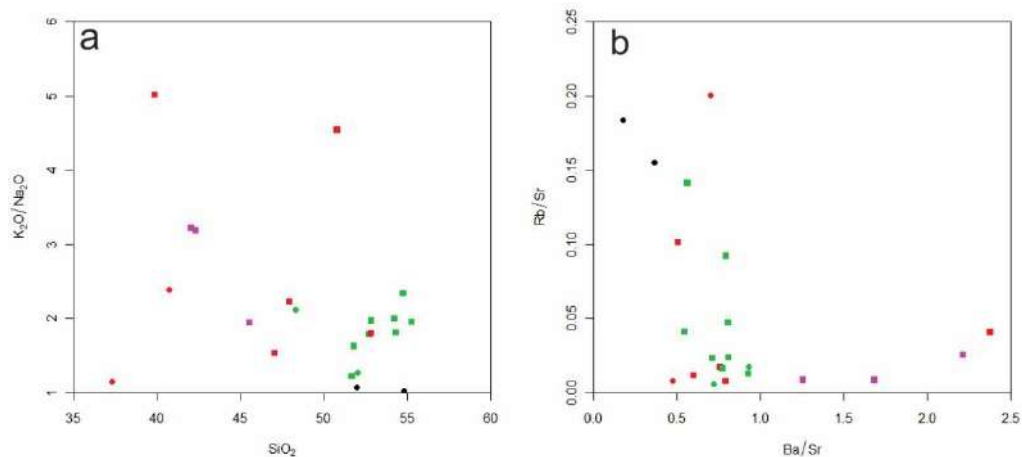
Uma evidência de assimilação vista na análise petrográfica das amostras do Morro de São João é dada pela invasão de uma fase félsica, recristalizada nas rochas ultramáficas de

hornblenda gabro, com consumo de fenocristais de anfíbólio da fase ultramáfica. Neste contexto, tem-se uma rocha ultramáfica mais fria entrando em contato com uma intrusão de um líquido félsico mais quente gerando a assimilação do ultramáfico e contaminação do félsico. Isto levanta a hipótese de interação entre duas câmaras magmáticas distintas.

Para o maciço alcalino ultramáfico de Ponte Nova e diques alcalinos da PASM, Azzone (2016 e 2018) utiliza as razões K_2O/Na_2O vs. SiO_2 e Ba/Sr vs. Rb/Sr como indicadores de contaminação crustal afirmando que o aumento destas razões seria ocasionado pela assimilação da rocha crustal encaixante pelo magma alcalino.

Observa-se na Figura 35a que há uma dispersão de dados, muito embora as amostras das rochas dos Grupos GS e MI possuam razões um pouco maiores ou semelhantes em relação as do Grupo dos Sienitos e muito maiores em relação as do Grupo dos Fonolitos. Em contrapartida, na Figura 35b, o Grupo dos Sienitos apresenta baixa razão Ba/Sr e valores variáveis para Rb/Sr em oposição às amostras do Grupo GS e MI que apresenta valores opostos.

Figura 35 – Diagrama K_2O/Na_2O vs. SiO_2 e Ba/Sr vs. Rb/Sr para as rochas do Morro de São João.



Nota: O Grupo GS e MI possui razões maiores que os demais grupos denotando uma não cogeneticidade.
Fonte: A autora, 2019.

Analisando separadamente o Grupo GS e MI, o enriquecimento da razão K_2O/Na_2O pode indicar contaminação crustal e esta hipótese não é corroborada pelos valores de nefelina normativos, nos cálculos da norma CIPW, que decrescem nesses grupos se comparados as rochas dos demais grupos (Grupo SI e FO), que deveriam ser os mais contaminados.

Vê-se nos gráficos de variação padrões de diferenciação magmática por cristalização fracionada com ou sem assimilação. Entretanto, os padrões normalizados para o Condrito

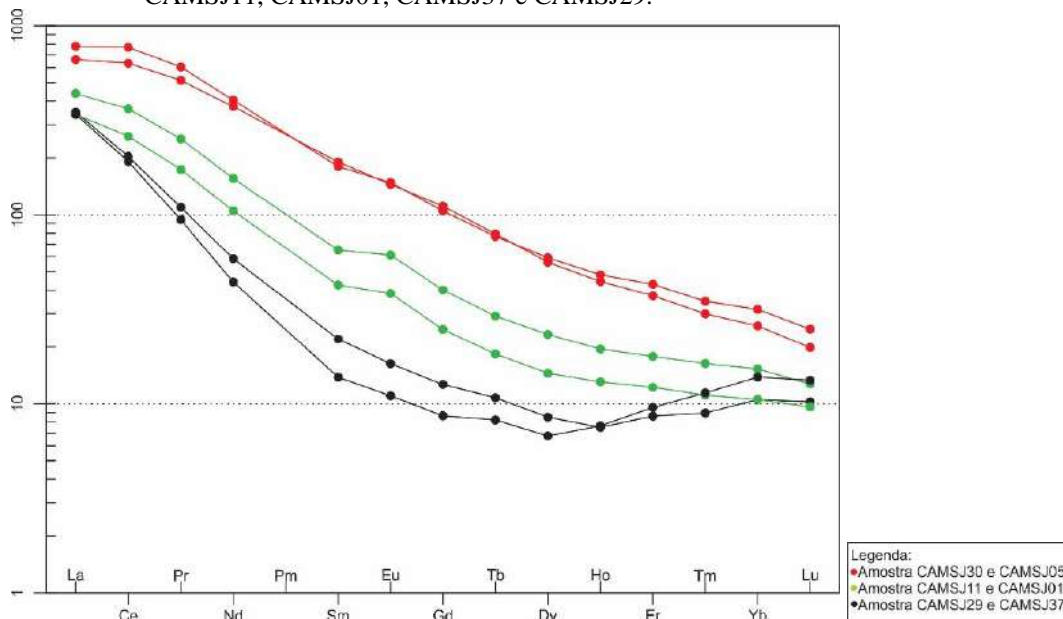
segundo Boynton (1984) dos elementos terras raras não corroboram, a princípio, com esta hipótese.

Com base nos cálculos de modelamento geoquímico mostrados anteriormente (Tabela 8) tem-se:

Hipótese 1: Cristalização fracionada sem assimilação envolvendo fases minerais máficas.

Para corroborar com essa suposição, considera-se que as amostras mais evoluídas (CAMSJ11 e CAMSJ37) sejam produtos das mais parentais (CAMSJ30 e CAMSJ05), passando por uma intermediária (CAMSJ01). Entretanto os padrões de elementos terras raras não ilustram dessa forma como já foi discutido (Figura 36). Nessas condições, para serem cogenéticos, uma assembleia mineral fracionante teria que reduzir os teores de todos elementos terras raras resultando em um líquido mais evoluído empobrecido desses elementos.

Figura 36 – Diagramas multielementares de Elementos Terras Raras normalizados para o Condrito segundo Boynton (1984) do Morro de São João com apenas amostras da autora: CAMSJ30, CAMSJ05, CAMSJ11, CAMSJ01, CAMSJ37 e CAMSJ29.

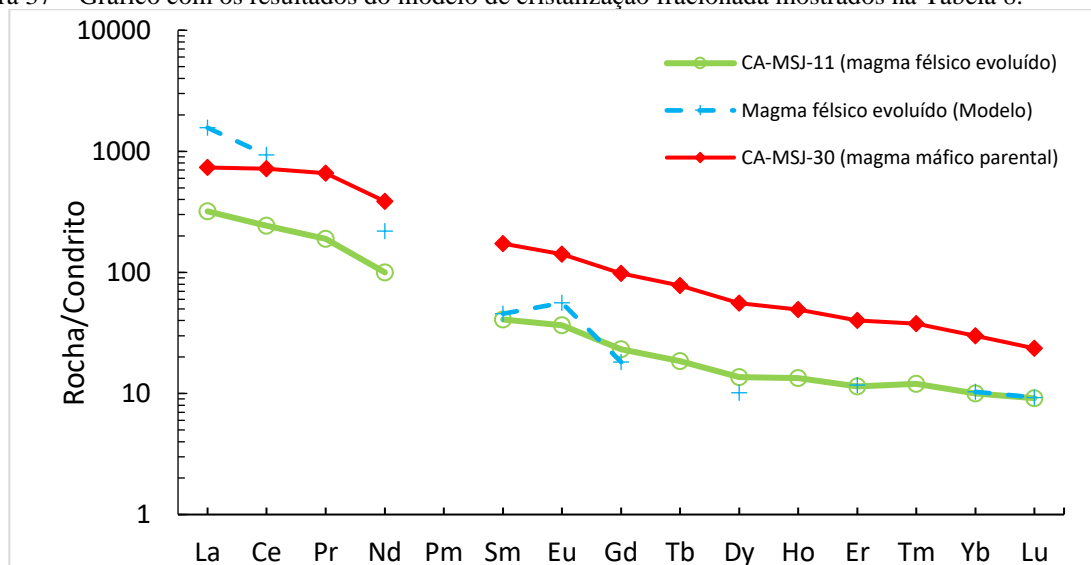


Fonte: Modificado de Boynton (1984).

A Equação de Rayleigh proposta por Wood & Fraser (1976) foi utilizada para gerar a composição de elementos terras raras de um magma félsico evoluído modelo a partir da composição da amostra CAMSJ30 (hornblenda gabro) tida como representativa do magma máfico parental e os resultados foram mostrados na Tabela 8.

A validação do modelo foi feita comparando-se a composição do magma modelo com a composição da amostra CAMSJ11 (nefelina sienito), tida como representativa do magma félsico evoluído. Os resultados do modelo são apresentados na Figura 37, tendo sido utilizados os maiores valores de coeficientes de partição cristal-líquido segundo Rollinson (1993). Como citado anteriormente, o melhor resultado obtido considerou o improvável fracionamento somente de hornblenda e quantidade muito elevada (81%) de cristalização fracionada, Figura 37. A diferença percentual (Tabela 8) dos teores de Er, Yb e Lu, considerando-se o modelo e a amostra CAMSJ11, ficou próxima do erro analítico para esses elementos. No entanto, os resultados para os elementos terras raras médios e, principalmente elementos terras raras leves, não foram satisfatórios, indicando a necessidade do envolvimento de uma outra fase fracionante retentora desses elementos como, por exemplo, titanita. Entretanto, seria necessário fracionar entre 11% e 45% deste mineral para que resultados satisfatórios fossem obtidos para La, por exemplo, considerando-se valores de coeficientes de partição cristal-líquido, segundo Green & Pearson (1983), e a mesma quantidade de cristalização fracionada (81%), o que afetaria, conseqüentemente, a quantidade de hornblenda e o controle desta fase sobre os elementos terras raras médios e pesados.

Figura 37 – Gráfico com os resultados do modelo de cristalização fracionada mostrados na Tabela 8.



Fonte: A autora, 2019.

Com este modelo, vê-se que não há cogeneticidade entre os membros félsicos e máficos por processo de cristalização fracionada sem assimilação. As relações de cogeneticidade pelos mesmos processos envolvendo membros félsicos representados pelas amostras CAMSJ01 são igualmente improváveis, uma vez que as condições do modelo seriam semelhantes ao apresentado aqui. Isso também se aplica à amostra CAMSJ37 (fonolito) cujos padrões de elementos terras raras cruzam nos elementos La, Tm, Yb, Lu nas amostras CAMSJ01 e 11.

Hipótese 2: Mistura magmática por interação entre duas ou mais câmaras magmáticas gerando um líquido híbrido.

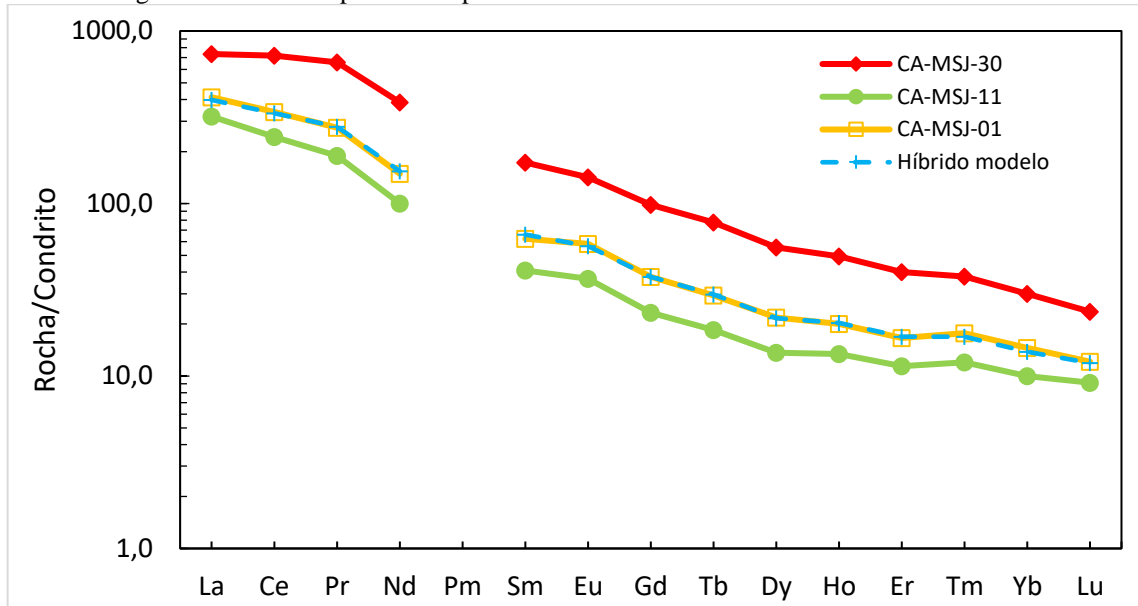
Os resultados do modelo são apresentados na Tabela 10 e na Figura 38. A quantidade do membro máfico na mistura (f) ficou em 19% e 20%, usando-se as amostras CAMSJ30 e CAMSJ05 na modelagem, respectivamente. As diferenças percentuais máxima, mínima e média entre os teores de elementos terras raras calculados (composição do híbrido modelo) e da amostra CAMSJ01 foram menores no modelo que utilizou a amostra CAMSJ30 como membro máfico, mas com uma covariância (desvio padrão/média em %) um pouco maior do que o modelo que utilizou a amostra CAMSJ05. Ademais, os teores de SiO₂ e MgO da amostra CAMSJ01 também são intermediários entre os valores destes óxidos dos membros finais na mistura, corroborando o modelo apresentado.

Tabela 10 – Valores dos cálculos da quantidade de mistura e covariância corroborando com a hipótese de hibridização.

Membro máfico	Quantidade de mistura f (%)	Diferença percentual máxima	Diferença percentual mínima	Diferença percentual média	Covariância (%)
CAMSJ30	19	5,4	0,1	2,6±1,9	72
CAMSJ05	20	11,3	0,7	5,7±3,8	66

Fonte: A autora, 2019.

Figura 38 – Modelo geoquímico de formação de um magma híbrido calculado (ou modelo) comparado a um magma híbrido real representado por amostra de sienito CAMSJ01 do Morro de São João.



Fonte: A autora, 2019.

Dessa forma, pode-se afirmar que as amostras de sienito do Morro de São João são resultantes de processos de hibridização entre um magma máfico (hornblenda gabro) e félsico (nefelina sienito) corroborando com a hipótese de magmatismo bimodal como principal formador das rochas do maciço. Já para amostra CAMSJ37 (fonolito), o padrão convexo e o cruzamento dos elementos Tm, Yb e Lu com os padrões das amostras félsica e híbrida não permitem considerar que o fonolito é um membro final de num processo de hibridização (mistura binária).

4.1.3 Indícios da Fonte Geradora

Brotzu et al. (2007) pontua que a origem do magmatismo, assim como nos outros corpos alcalinos potássicos da PASM, é proveniente fonte peridotítica com flogopita localizada no manto litosférico subcontinental. Esta fonte com assinatura isotópica de basaltos OIB é fruto de fusão parcial de fonte metassomatizada rica em CO₂ (THOMPSON et al., 1998).

Azzone (2016) atribuiu a origem do maciço alcalino ultramáfico de Ponte Nova fontes mantélicas heterogêneas de composição rica em piroxênio e/ou granada metassomatizada por fluidos ricos em CO₂. Rudnick (1993) utiliza razões de elementos maiores e traços, normalizados para o manto primitivo, que seriam indicativos das características da fonte

formada a partir do líquido gerado pela fusão parcial dessa fonte. Posteriormente, Valente (1997) Chmyz (2017) e Azzone (2013, 2018) utilizaram destes parâmetros para caracterizar os maciços e diques do PASM.

Segundo Azzone (2018), rochas alcalinas básicas ou ultrabásicas formadas a partir de líquidos alcalinos derivados do manto apresentam baixas razões $(Ba/Sr)_N$ e $(Rb/Sr)_N$ contrapondo as altas concentrações de Pb, Ba e Rb de rochas derivadas de fusão parcial de rochas do embasamento crustal.

Não é possível observar uma relação clara nessas análises (Tabela 6). As rochas do Grupo GS apresenta valores de médio a baixo para as razões $(Ba/Sr)_N = 3,79$ e $(Rb/Sr)_N = 0,27$. No Grupo MI os valores se alternam entre baixo e médio com média de $(Ba/Sr)_N = 1,76$ e $(Rb/Sr)_N = 3,45$. No Grupo dos Sientos também se vê essa alternância de valores com a média de $(Ba/Sr)_N = 2,23$ e $(Rb/Sr)_N = 1,80$. Já no Grupo dos Fonolitos tem-se valores baixos pra razão $(Ba/Sr)_N = 0,54$ e $1,1$ e médios para $(Rb/Sr)_N = 6,10$ e $5,15$. Porém, os altos valores para razão dos elementos terras raras leves e pesados com a média de $(La/Yb)_N = 28,72$ e concentração relativamente alta de elementos terras raras, principalmente os leves, sugere uma fonte enriquecida com granada, que é o mineral capaz de incorporar esses elementos da fonte (CHMYZ, 2017).

Zeng (2010) afirma que anomalias negativas de K, Zr, Hf e Ti em diagramas multielementares normalizados estão associados a líquidos oriundos de uma fonte metassomatizada por fluidos carbonatados. O Grupo GS, MI e SI apresentam essa anomalia para Zr (Figura 36). No primeiro grupo esta anomalia é mais marcante e no terceiro é incipiente. Rudnick (1993) e Azzone (2018) apontam ainda que esse tipo de metassomatismo aumenta as razões CaO/Al_2O_3 (Figura 33), $(La/Zr)_N$ e diminui a razão $(Ti/Eu)_N$. Com isso, propõe-se que as rochas do Grupo GS e MI tenha relação direta com fontes metassomatizadas. Estes grupos apresentam valores para $(La/Zr)_N = 17,6$ e $(Ti/Eu)_N = 0,61$ para o Grupo GS e $(La/Zr)_N = 5,10$ e $(Ti/Eu)_N = 0,61$ para o Grupo MI.

4.1.4 Análise do Modelo Evolutivo

Estudar e comparar as especificidades do Morro de São João com os demais maciços alcalinos da PASM é de extrema relevância para entender a relação entre esses corpos e sua gênese. As rochas da PASM no Estado do Rio de Janeiro são representadas por rochas

majoritariamente félsicas com e sem nefelina, intrudidas por diques de fonolito e traquito, associadas a brechas vulcânicas e enclaves máficos (OLIVEIRA, 2019). Associação entre rochas félsicas saturadas e insaturadas em sílica pode ser vista no próprio Morro de São João (BROTZU et al., 2017 e MOTA, 2012), Itatiaia (ROSA, 2017), Ilha de Cabo Frio (Oliveira, 2019), Tanguá (MOTOKI, 2015) e outros maciços não estudados nesse trabalho como Morro Redondo e Mendanha (MOTA, 2012), Ilha de Búzios (GOMES, 2017).

As expressões máficas e ultramáficas na PASM são descritas como diques de lamprófiros dispersos na Região Sudeste (VALENTE, 1997), como também no Mendanha (MOTA, 2012), Ilha de Cabo Frio (ARAÚJO, 1995), enclaves na Ilha de Cabo Frio (OLIVEIRA, 2019) e em blocos aflorantes no Morro de São João (VALENÇA, 1980, BROTZU et al., 2007, MOTA, 2012).

Sonoki & Garda (1988) e Thomaz Filho & Rodrigues (1999) apontam que estes corpos, apesar da diferença temporal, não podem ser vistos como eventos isolados, no que diz respeito à formação e gênese. O primeiro detalhe a ser considerado é a formação desses maciços com o controle tectônico que é exercido pelo embasamento Proterozoico da Faixa Ribeira.

Um grande questionamento sobre a gênese dos maciços alcalinos do PASM é a localidade dessas rochas máficas e ultramáficas num contexto geológico e evolutivo. Os maciços ultramáficos Ponte Nova, Juquiá, Jacupiranga e Alto do Paraíba (BARBOSA, 2012, AZZONE, 2013, 2016, BECCALUVA et al., 2017) em que afloram rochas mais primitivas, consegue-se gerar uma linhagem evolutiva completa desses maciços. Isso não acontece com os demais maciços félsicos no estado do Rio de Janeiro, com exceção do Morro de São João. Desse modo, um estudo mais detalhado desse maciço se torna de extrema relevância.

Uma sugestão para trabalhos futuros seria análises isotópicas aliados a estudos termodinâmicos, extrapolando de forma coerente para os demais maciços do Rio de Janeiro, e assim, aplicar um modelo petrogenéticos para, conseguinte, um modelo geodinâmico, visto que, análises geomorfológicas, petrografia e litogeoquímica não são o suficiente para definir esses processos em sua totalidade.

É importante esclarecer que, com os dados aqui apresentados, é imaturo utilizá-los para propor modelos petrogenéticos mais robustos. Entretanto, com esses mesmos dados, pode-se salientar um modelo evolutivo que se inicia com uma fusão parcial de uma fonte peridotítica que passa por processo evolutivo com diferenciação magmática até interagir com um líquido com outra característica geoquímica e gerar um material híbrido e todas as feições que se vê hoje.

CONCLUSÕES

A partir de todas as análises, interpretações e discussões a respeito da geomorfologia, petrografia e geoquímica, as conclusões sobre a petrogênese e processos evolutivos do magmatismo alcalino do Morro de São João são as seguintes:

- a) O Complexo Alcalino do Morro de São João é formado por um espectro abrangente de rochas alcalinas com diferentes teores de sílica, tendo rochas que vai desde ultrabásicas a intermediárias. São elas: sienito, nefelina sienito, sienito com nefelina, fonolito, hornblenda sienito com nefelina e hornblenda gabro. Todos estes litotipos estão intrudidos em uma biotita gnaiss do Terreno Cabo Frio - Faixa Ribeira. As associações vistas são de diques, veios, enclaves e texturas de mistura magmática e assimilação;
- b) O maciço é caracterizado como um corpo circular, concêntrico, cônico com topo é dissecado pelos processos intempéricos de onde se projeta um cume principal com 728m de altitude. A concentricidade se dá por rochas ultramáficas no centro, máficas nas porções intermediárias e bordas félsicas. Este padrão (zoneamento inverso) é análogo a outros corpos graníticos pós-colisionais presentes nas faixas orogênicas Ribeira-Araçuaí. As redes de drenagens são caracterizadas como radiais centrífuga e centrípeta, onde o centrífuga os canais irradiam de uma área central, do centro para fora e o centrípeta os canais fluem para dentro em direção ou nas proximidades de depressões centrais. Existe um lineamento de direção WNW-ESSE que atravessa toda extensão do maciço, possível de ser observado em imagens aéreas. Todavia o mesmo não exerce influência sobre o padrão de drenagem nem disposição dos litotipos e estruturas associadas;
- c) Foram caracterizadas três fácies a partir de características petrográficas afins dos litotipos mapeados. Com exceção dos fonolitos afaníticos, as rochas do Morro de São João são, em geral, faneríticas, maciças, holocristalinas, granulometria predominantemente média e equigranular. As fácies mapeadas são descritas como: Fácies Melanocrática que compreende as rochas ultramáficas e é representada, principalmente, pela hornblenda gabro. Fácies Mesocrática compreende as rochas máficas como os hornblenda sienitos com

nefelina. Fácies Leucocrática corresponde as rochas félsicas: sienitos, sienitos com nefelina e nefelina sienitos;

- d) A mineralogia do nefelina sienito e sienito com nefelina é caracterizada por nefelina, feldspato alcalino (albita), anfibólio, clinopiroxênio, titanita, granada (grossulária) zircão, apatita e magnetita. Sendo que em diferentes proporções modais de uma rocha para outra. Sienito composto por feldspato alcalino, anfibólio e clinopiroxênio. Os fonolitos são compostos por nefelina, feldspato alcalino, clinopiroxênio e magnetita. As rochas máficas e ultramáficas são compostas por nefelina, feldspato alcalino (albita para o hornblenda sienito com nefelina), plagioclásio (bytownita para o hornblenda gabro), anfibólio (Fe-kaersutita para o hornblenda gabro e uma variação com Mg-hastingsita, Fe-pargasita e sadanagaíta para o hornblenda sienito com nefelina), clinopiroxênio, titanita, magnetita, também em proporções modais distintas de um litotipo para outro;
- e) Os litotipos alcalinos possuem características geoquímicas predominantemente potássicas, metaluminosas, miaskíticas que formam duas séries geoquímicas distintas (saturada e insaturada) subdivididas em três famílias. A Família 1 forma uma série fracamente saturada em sílica com hiperstênio + olivina normativos com valores de $Ol_{norm} < 8$ e $Q_{norm} = 0$ e é representada pelo Grupo GS. A Família 2 possui nefelina + diopsídio normativos e Família 3 nefelina + diopsídio + olivina normativos. Estas famílias são representadas pelos demais grupos onde o Grupo MI forma uma série moderadamente insaturada em sílica com valores médios de $Ne_{norm} \sim 9$, e é representado, principalmente, pela hornblenda gabro. O Grupo SI, representado pelos sienitos, sienitos com nefelina e nefelina sienitos, forma uma série fortemente instaura em sílica com valores chegando a $Ne_{norm} = 30$. Já o Grupo FO, representado pelos fonolitos, também formam uma série fortemente insaturada em sílica com valores $Ne_{norm} = 33$ e 30;
- f) Não é possível estabelecer uma relação clara quando se é feita a análise de alguns elementos traços móveis, como o Ba, Rb, Sr, devido suas respostas não coesas quando postos em diagramas de variação, multielementares e de razões normalizadas para o manto primitivo. Porém, quando se é analisado alguns dos elementos maiores e HFSE, têm-se que as rochas do Grupo GS e

MI tem relação direta, com um manto peridotítico, rico em granada, metassomatizado por fluidos carbonatados. As anomalias negativas de Zr no diagrama multielementar normalizado para o manto primitivo, aumento das razões $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ e $(\text{La}/\text{Zr})_N$ e diminuição da razão $(\text{Ti}/\text{Eu})_N$ corroboram com essa hipótese;

- g) Em termos evolutivos, sugere-se a seguinte relação cronológicas entre as unidades: primeiro é formado as rochas do Grupo GS e Grupo MI por fusão parcial de um manto peridotítico com granada influenciado por fluidos metassomatizados ricos em CO_2 . Estes dois passam por processos de assimilação visto a porcentagem baixa a nula de nefelina normativa. Um segundo episódio pode ser descrito como um pulso magmático com rochas alcalinas mais evoluídas (félsicas) sendo oriundas de outra fonte. A partir dessa nova injeção magmática, gerou-se feições de mistura magmática além de um material híbrido. E por nova injeção magmática fim, intrusões de um magma fonolítico finalizam a atividade magmática que originou o Complexo Alcalino do Morro de São João.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. F. M. Origem e evolução da Plataforma Brasileira. *Boletim* 241, Rio de Janeiro: DNPM-Divisão de Geologia e Mineralogia, 1967. 36p.
- _____. Distribuição regional e relações tectônicas do magmatismo pós- Paleozoico no Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 16, p. 423-428, 1986.
- _____. O alinhamento magmático de Cabo Frio. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 2. São Paulo. *Anais...* São Paulo: SBG/NSP e SBG/NRJ. p. 423-428, 1991.
- _____. The system of continental rifts bordering the Santos Basin, Brazil. *Academia Brasileira de Ciências. Suppl.* v. 48. pp. 15-26, 1976.
- _____. Correlação do magmatismo das bacias da margem continental brasileira com o das áreas emersas adjacentes. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 26, n. 3, p. 125-138, 1996.
- _____. Relações tectônicas das rochas alcalinas mesozoicas da Região Meridional da Plataforma Sul-Americana. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 13, p. 139- 158, 1983.
- AMARAL, G. et al. Potassium-argon ages of alkaline rocks from southern Brazil. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, n. 31, p. 117-142, 1967.
- ARAÚJO, A.L. *Geologia, geoquímica e petrologia das rochas alcalinas da Ilha do Cabo Frio e das áreas continentais adjacentes, Arraial do Cabo - RJ*. 1995. 114f. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 1995.
- AZZONE, R.G., MUÑOZ P.M., ENRICH G.E.R., ALVES A., RUBERTI E., GOMES C.B. Petrographic, geochemical and isotopic evidence of crustal assimilation processes in the Ponte Nova alkaline mafic-ultramafic massif, SE Brazil. *Lithos*, 260:58-75, 2016.
- _____. ENRICH G.E.R., GOMES C.B., RUBERTI E. Trace element composition of parental magmas from mafic-ultramafic cumulates determined by in situ mineral analyses: The Juquiá mafic-ultramafic alkaline-carbonatite massif, SE Brazil. *J. South Am. Earth Sci.*, 41:5-21, 2013.
- _____. RUBERTI E., SILVA J.C.L., GOMES C.B., ROJAS G.E.E., HOLLANDA M.H.B.M., TASSINARI C.C.G. Upper Cretaceous weakly to strongly silica-undersaturated alkaline dike series of the Mantiqueira Range, Serra do Mar alkaline province: Crustal assimilation processes and mantle source signatures. *Braz. J. Geol.*, 48 (2):373-390, 2018.
- BAYER, P., SCHMIDT-THORN, R., WEBER-DIEFENBACH, K., HORN, H.A. Complex concentric granitoid intrusions in the coastal mobile belt, Espírito Santo, Brazil: the Santa Angelica Pluton-an example. *Geol. Rund.*, v. 76, pp. 357-371, 1987.
- BATCHELOR, R. A., BOWDEN, P. Petrogenetic interpretation of granitic rocks series using multicationic parameters. *Chem Geol* 48: 43-55, 1985.

BARBOSA, E.S.R., BROD J.A., JUNQUEIRA-BROD T.C., DANTAS E.L., CORDEIRO P.F.O., GOMIDE C.S. Bebedourite from its type area (Salitre I complex): A key petrogenetic series in the Late-Cretaceous Alto Paranaíba kamafugite–carbonatite–phoscorite association, Central Brazil. *Lithos*, 144-145: 56-72, 2012.

BECCALUVA, L., BIANCHINI G., NATALI C., SIENA F. The alkaline-carbonatite complex of Jacupiranga (Brazil): Magma genesis and mode of emplacement. *Gondwana Res.*, 44:157-177, 2017.

BOYNTON, W.V. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies (Chapter 3). In: HENDERSON, P. (ed.) *Rare Earth Element Geochemistry*. 1st Ed. Amsterdam: Elsevier, 1984. p. 115-1522. (Developments in Geochemistry 2).

BOWEN, N.L. Later stages in the evolution of igneous rocks. *Journal of Geology*, v. 23. Suppl. 8, p. 56, 1915.

BROTZU, P., GOMES, C. B., MELLUSO, L., MORBIDELLI, L., MORRA, V. & RUBERTI, E. Petrogenesis of coexisting SiO₂-undersaturated to SiO₂-oversaturated felsic igneous rocks: The alkaline complex of Itatiaia, southeastern Brazil. *Lithos*, 40, 133–156, 1997.

_____. et al. Petrogenesis of the Early Cenozoic potassic alkaline complex of Morro de São João, southeastern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 24, p. 93-115, 2007.

CHMYZ L., ARNAUD N., BIONDI J.C., AZZONE R.G., BOSCH D., RUBERTI E. Ar-Ar ages, Sr-Nd isotope geochemistry, and implications for the origin of the silicate rocks of the Jacupiranga ultramafic-alkaline complex (Brazil). *J. South Am. Earth Sci.*, 77:286-309, 2017.

COSTA-DE-MOURA, J., WIEDEMANN, C. M., WALLFASS, C.M. AND VAN WESTRENNEN, W. Pedra Azul: a estrutura do maciço intrusivo e suas rochas encaixantes – Domingos Martins, Espírito Santo, Brasil. In: VII SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 7. Lençóis, BA. *Anais...* Lençóis, BA: SBG, p. 129-131, 1999.

COX, K.G., BELL, J.D., PANKHURST, R.J. *The Interpretation of Igneous Rocks*. London: George Allen & Unwin, 1979. 450p.

CROSS, W., IDDINGS, J. P., PIRSSON, L. V., WASHINGTON, H. S. Quantitative System of Classification of Igneous Rocks. The University of Chicago Press. *The Journal of Geology*, V. 20, N. 6., p. 550-561, 1912.

DEER, W. A., HOWIE, R. A., ZUSSMAN, J. *Minerais Constituintes das Rochas*. Lisboa, Portugal: Fundação Calouste Gulbenkian, Soc. Ind. Gráfica Telles da Silva LTDA, 1981. 558p.

DE CAMPOS, C. P., MEDEIROS, S. R., MENDES, J. C., PEDROSA-SOARES, A. C., DUSSIN, I., LUDKA, I. P., DANTAS, E. L. Cambro-Ordovician magmatism in the Araçuaí Belt (SE Brazil): Snapshots from a post-collisional event. *Journal of South American Earth Science* 1e21, 2006

DE LA ROCHE, H., LETERRIER, J., GRANDCLAUDE P., MARCHAL M. A classification of volcanic and plutonic rocks using R1R2-diagram and major-element analyses – Its relationships with current nomenclature. *Chem. Geol.*, 29 (1-4):183-210, 1980.

DERBY, O.A. On nepheline rocks in Brazil, with special reference to the association of phonolite and foyaite. *Q. J. Geol. Soc. Lond.*, 43:457-473, 1887.

DEPARTAMENTO DE PETROLOGIA E METALOGENIA - UNESP. Museu de Minerais, Minérios e Rochas Heinz Ebert, c2019. Página inicial. Disponível em: <<https://museuhe.com.br/>>. Acesso em: 12 dez.2019.

DRM-RJ. Projeto Carta Geológica do Estado do Rio de Janeiro: Texto Explicativo das folhas Morro de São João e Barra de São João. Rio de Janeiro, p. 64, 1998.

FAURE, G. Principles of Isotope Geology, 2nd Edition. *Capítulo 9*, 1984.

FITTON, J.G. & UPTON, B.G.J. Alkaline igneous rocks. *Geological Society Special Publication*, v.30. p. 9-14, 1987.

FOLAND, K. A. & HENDERSON, C. M. B. Application of age and Sr isotope data to the petrogenesis of the Marangudzi ring complex, Rhodesia. *Earth and Planetary Science Letters*, 29, 291–301, 1976.

_____, LANDOLL, J. D., HENDERSON, C. M. B., CHEN, J. & JIANGFENG, C. Formation of cogenetic quartz and nepheline syenites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **57**, 697–704, 1993.

FONSECA, M.J.C; HEILBRON, M.; CHRISPIM, S. Geologia Estrutural da Área de Cabo Frio e Armação de Búzios. In: *Cong. Bras. Geol.*, 33, Rio de Janeiro, Anais, p. 5393-5407, 1984.

FROST, B. R. & FROST, C. D. A geochemical classification for feldspathic igneous rocks. *Journal of Petrology* 49, 1955-1969, 2008.

FUDALI, R. F. Experimental Studies Bearing on the Origin Of Pseudoleucite and Associated Problems of Alkalic Rock Systems. *Geological Society of America Bulletin*, v. 74, p. 1101-1126, 1963.

GAST, P. W. Trace element fractionation and the origin of tholeiitic and alkaline magma types. *Geochim Cosmochim Acta* 32(10): 1057-1086, 1968.

GERALDES, M.C., MOTOKI A., VARGAS T., IWANUCH W., BALMANT A., MOTOKI, K.F. Geology, petrography, and emplacement mode of the Morro dos Gatos alkaline intrusive rock body, State of Rio de Janeiro, Brazil. *Geocienc*, 32(4):625-639, 2013.

GIRET, A., BONIN, B. & LEGER, J.-M. Amphibole compositional trends in oversaturated and undersaturated alkaline plutonic ring complexes. *Canadian Mineralogist*, 18, 481–495, 1980.

- GOMES, C. B., COMIN-CHIARAMONTI, P. Magmatismo Alcalino Continental da Região Meridional da Plataforma Brasileira. *Eduso*, 595 p, 2017.
- GREEN, T.H. AND PEARSON, N.J. Effect of pressure on rare Earth element partition coefficients in common magmas. *Nature* 305: 414-416, 1983.
- GREW, E. LOCOCK, A. J., MILLS, S. J., GALUSKINA, I. O. GALUSKIN, E. V. U., HÅLENIUS, U. Nomenclature of the garnet supergroup. *American Mineralogist* 98 (4): 785–811, 2013.
- GUPTA, A. K. *et al.* Silica-Undersaturated Portion of the System Nepheline–Kalsilite–SiO₂ at 2 GPa [P (H₂O)=P (Total)]. *The Canadian Mineralogist* **48**, 1297–1313, 2010.
- HAMILTON, D. L. & MACKENZIE, W. S. Phase-equilibrium studies in the system NaAlSiO₄ (nepheline)-KAlSiO₄ (kalsilite)-SiO₂-H₂O. *Mineralogical Magazine* **34**, 214–231, 1965.
- HEILBRON, M., EIRADO, L. G., ALMEIDA, J. Geologia e Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro. *Nota Explicativa - CPRM*, p. 109, 2016.
- _____. *et al.* A Província Mantiqueira. In: MANTESSO NETO, V., *et al.* *O Desvendar de um Continente: A Moderna Geologia da América do Sul e o Legado da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo: Beca, Cap. XIII, p. 203-234, 2004.
- HESSELBO, S. P. Pseudoleucite from the Gardar of South Greenland. *Bull. geol. Soc. Denmark*, vol. 35, pp. 11-17, 1986.
- HOLLOCHER, K. CIPW Norm Calculation Program. Geology Department, *Union College*, 2004.
- HORSTPETER, H. G. J., ULBRICH, SILVIO, R. F., VLACH & VALDECIR, A. O mapeamento faciológico em rochas ígneas plutônicas. *Revista Brasileira de Geociências*. 31(2): 163-172, 2001.
- HOWARD, A.D. Drainage Analysis in Geologic Interpretation: A Summation. *American Association of Petroleum Geologist Bulletin*, 51, 2246-2259, 1967.
- HUSSAK, E. Ueber Leueit-Pseudokrystalle in Phonolith (Tinguait) der Serra de Tinguá, Estado Rio de Janeiro, Brazil. *Neues Jahrb* 1,166-169, 1890.
- IBGE. Divisão regional do Brasil em mesorregiões e microrregiões geográficas. *Biblioteca IBGE*: 1:99-90, 2019.
- JUNG, S., MEZGER, K. & HOERNES, S. Shear zone-related syenites in the Damara belt (Namibia): the role of crustal contamination and source composition. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 148, 104–121, 2004.
- KIRI, L., PÁL-MOLNÁR, E, BATKI, A., Kiss, B. Evidences of magma mixing/mingling in syenites of the Ditrau Alkaline Massif. *Conference: Meeting of Young Geoscientists, At Hajdúszoboszló, Hungary*, 2018.

- KNIGHT, C. W. A new occurrence of pseudoleucite. *American Journal of Science*. 21, 286-293, 1906.
- KOGARKO, L. N. Role of volatiles. In: Sørensen, H. (ed.) *The Alkaline Rocks*, London: John Wiley & Sons, 622, 1974.
- LASAULX, A. Ueber das Vorkommen von Elaeolith-Syeniten und editeri zu diesen gehorigen Elaeolith-porphyren aus der Serra d'Itatiaia westlich von Rio de Janeiro, Brasilien. *Sitzungsberichte Der Niederrheinischen Gesellschaft Für Natur* 231–231, 1885.
- LE BAS, M.J., LE MAITRE, R.W., STRECKEISEN, A., ZANETTIN B. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali sílica diagram. *J. Petrol.*, 27 (3):745-750, 1986.
- LE MAITRE, R. W. *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms: A Classification and Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences, Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks*. Cambridge University Press, 2002.
- LEAKE, B. Nomenclature of amphiboles. *American Mineralogist*, Volume 63, pages 1023-1052, 1997.
- LIMA, M. I. C. Análise de drenagem e seu significado geológico-geomorfológico. *Belém, Pará, UFPA*, 222, 2006.
- LUDKA, I.P. Geologia, Petrografia e Geoquímica do Maciço Intrusivo de Jacutinga-Torre-Mimoso do Sul, Espírito Santo. *Master Thesis, Federal University of Rio de Janeiro/UFRJ/Brazil*, 11Op, 1991.
- MARKS, M.A.W., HETTMANN, K., SCHILLING, J., FROST, B.R., MARKL, G. The Mineralogical Diversity of Alkaline Igneous Rocks: Critical Factors for the Transition from Miaskitic to Agpaitic Phase Assemblages. *Journal of Petrology* 52 (3), 439-455, 2011.
- _____. & MARKL, G. Fractionation and assimilation processes in the alkaline augite syenite unit of the Ilimaussaq Intrusion, South Greenland, as deduced from phase equilibria. *Journal of Petrology* 42, 1947–1969, 2001.
- MASKENZIE, W. S., DONALDSON, C. H., GUILFORD, C. Atlas of Igneous Rocks and Their Textures. *John Wiley & Sons*, 1982.
- _____. GUILFORD, C. Atlas of the Rock-Forming Minerals in Thin Section. *Prentice Hall*, 1980.
- MCDONOUGH W.F., SUN S. The composition of the Earth. *Chem. Geol.*, 120:223-253, 1995.
- MEDEIROS, S.R., WIEDEMANN, C.M., MENDES, J.C. Postcollisional magmatism in the Ribeira Mobile Belt: geochemical and isotopic study of the VBrzea Alegre Intrusive Complex (VAIC), ES, Brazil. *Brazilian contributions to the 31st International Geological Congress, BraziV2000. Rev. Bras. Geoc.*, v. 30, pp. 30-34. 2000.

MENDES, J.C., MCREATH, I., WIEDEMANN, C.M., FIGUEIREDO, M.C.H. Charnoquibides do Macico de Varzea Alegre: um exemplo de magmatismo calcio-alcálico de alto K no arco magmático do espírito Santo. *Rev. Bras. Geoc.*, v. 27, pp, 13-24, 1997.

MELLUSO, L., GUARINO, V., LUSTRINO, M., MORRA V., GENNARO, R. The REE- and HFSE-bearing phases in the Itatiaia alkaline complex (Brazil) and geochemical evolution of feldspar-rich felsic melts. *Min. Mag.*, 81 (2):217-250, 2017.

MIDDLEMOST, E. Iron oxidation ratios, norms and the classification of volcanic rocks. *Chemical Geology*, 77 (1989) 19-26, 1989.

_____. The Basalt Clan. *Earth-Science Reviews*, 11, 337-564, 1975.

MINGRAM, B., TRUMBULL, R. B., LITTMAN, S. & GERSTENBERGER, H. A petrogenetic study of anorogenic felsic magmatism in the Cretaceous Paresis ring complex, Namibia: evidence for mixing of crust and mantle-derived components. *Lithos* 54, 1–22, 2000.

MOHRIAK, W. U., BARROS, A. Z. N., FUJITA, A. Magmatismo e tectonismo Cenozoico na região de Cabo Frio, RJ. In: *SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 37, Natal, Anais*, v. 6, p. 2873-2884, 1990.

MORIMOTO, N. et al. Nomenclature of pyroxenes. *American Mineralogist*, v. 73, p.1123-1133, 1988.

MOTA, C. E. et al. Características Isotópicas (Nd e Sr), Geoquímicas e Petrográficas da Intrusão Alcalina do Morro do São João: Implicações Geodinâmicas e Sobre a Composição do Manto Sublitosférico. *Geologia USP - Série Científica, São Paulo*, 9, n. 1, 85-100, 2009.

MOTA, C. E. M. *Petrogênese e geocronologia das intrusões alcalinas de Morro Redondo, Mandanha e Morro de São João: caracterização do magmatismo alcalino no Estado do Rio de Janeiro e implicações geodinâmicas*. 2012. Tese (Doutorado) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

MOTOKI, A. Rochas piroclásticas constituintes de condutos e fissuras subvulcânicos de magmatismos alcalinos félsicos: características geológicas e litológicas, processo de formação e modo de erupção. *Revista de Geociências*, 2008.

MOTOKI, A. Magmatismos sob ponto de vista da tectônica global. Apostila Didática. *Departamento de Mineralogia e Petrografia ígneas, Universidade do Estado do Rio de Janeiro*, 2001.

_____.; SICHEL, S. E.; VARGAS, T.; MOTOKI, K. Geochemical behaviour of trace elements during fractional crystallization and crustal assimilation of the felsic alkaline magmas of the state of Rio de Janeiro, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 87(4): 1959-1979, 2014.

_____., DA SILVA, S., SICHEL, S. E., MOTOKI, K. F. Morphologic analyses by summit level and base level maps based on the Aster Gdem for Morro de São João felsic alkaline

massif, State of Rio de Janeiro, Brazil. *São Paulo, UNESP, Geociências*, v.33, n. 1, p.11-25, 2014.

_____, SICHEL, S. E., VARGAS, T., MELO, D. P., MOPTOKI, K. Geochemical behaviour of trace elements during fractional Crystallization and crustal assimilation of the felsic alkaline magmas of the state of Rio de Janeiro, Brazil. *An Acad Bras Cienc* (2015) 87 (4), 2015.

MURAD, A. Geologia, Petrografia e Geoquímica (Elementos Maiores, Menores e alguns Tracos) do Maciço Intrusivo de Conceição de Muqui, Espírito Santo. *Master Thesis, Federal University of Rio de Janeiro/UFRJ/Brazil*, 98p, 1992.

NEKVASIL, H., DONDOLINI, A., HORN, J., FILIBERTO, J., LONG, H. & LINDSLEY, D. H. The Origin and Evolution of Silica-saturated Alkalic Suites: an Experimental Study. *Journal of Petrology* **45**, 693–721, 2004.

NIU, Y.; WILSON, M.; WILLIAMS, H.E., O'HARA, J.M. A trace element perspective on the source of ocean island basalts (OIB) and fate of subducted ocean crust (SOC) and mantle lithosphere (SML). *Episodes*, 35: 310–327, 2012.

OLIVEIRA, A. O. Serviços de campo no Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: *DGM-DNPM*, 1952.

OLIVEIRA, F.M. O Magmatismo Alcalino da Ilha de Cabro Frio, Arraial do Cabo, RJ: Geologia e Evolução Litogeoquímica. *Dissertação de Mestrado, Departamento de Geologia e Paleontologia, Museu Nacional/UFRJ*. p. 61, 2019.

PANKHURST, R. J., BECKINSALE, R. D. & BROOKS, C. K. Strontium and oxygen isotope evidence relating to the petrogenesis of the Kangerdlugssuaq alkaline intrusion, East Greenland. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 54, 17–42, 1976.

PEARCE, J. A. Sources and settings of granitic rocks. *Episodes* 19(4): 120-125, 1996.

PEARCE, J.A, PARKINSON, I. J. Trace element models for mantle melting: application to volcanic arc petrogenesis. *Geol. Soc. London Spec. Publ.* 76: 373-403, 1993.

_____, CANN, J.R. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth Planet Sc Lett* 19(2): 290-300, 1973.

_____, PARKINSON, I. J. Trace element models for mantle melting: application to volcanic arc petrogenesis. *Geol. Soc. London Spec. Publ.* 76: 373-403, 1993.

PÉREZ-PEÑA, V., AL-AWABDEH, M., AZAÑÓN, J. M., GALVE, J.P., BOOTH-REA, G., NOTTI, D. SwathProfiler and NProfiler: Twonew ArcGIS Add-ins for the automatic extraction of swath and normalized river profiles. *Computers & Geosciences*, 2017.

PILET, S. et al. The metasomatic alternative for ocean island basalt chemical heterogeneity. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 236, p. 148-166, 2005.

RAMSAY, J. G., HUBER, M. I. - The Techniques of modern structural geology. *Vol. 2: Folds and Fractures. Academic Press, London*, 403 p, 1987.

RIBEIRO FILHO, E. Geologia e Petrologia dos Maciços Alcalinos do Itatiaia e Passa-Quatro (Sudeste do Brasil). *Boletim da Faculdade de Filosofia Ciências e Letras, Universidade de São Paulo. Geologia* **302**, 9, 1967.

RICCOMINI, C. et al. Sobre a ocorrência de um derrame de ankaramito na Bacia de Volta Redonda (RJ) e sua importância na datação das bacias tafrogênicas continentais do sudeste brasileiro. *In: Simpósio Regional de Geologia. SBG/NSP*. p. 23-24, 1983.

_____, SANT'ANNA, L.G., FERRARI, A.L. Evolução geológica do rift continental do sudeste do Brasil. *In: Mantesso-Neto V., Bartorelli A., Carneiro C.D.R., Britto-Neves B.B. (Org.) Geologia do Continente Sul-americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. Beca, São Paulo*, 647 p, 2004.

RIISHUUS, M. S., PEATE, D. W., TEGNER, C., WILSON, J. R. & BROOKS, C. K. Petrogenesis of Cogenetic Silica-Oversaturated and -Undersaturated Syenites by Periodic Recharge in a Crustally Contaminated Magma Chamber: the Kangerlussuaq Intrusion, East Greenland. *Journal of Petrology* **49**, 493–522. 2008.

ROLLINSON, H. R. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. *Capítulo 4*, p. 108, 1993.

ROSA, P.A.S. Geologia e Evolução Petrogenética do Maciço Alcalino de Itatiaia, MG-RJ. *Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo*, 137 p, 2017.

RUDNICK, R.L., MCDONOUGH W.F., CHAPPELL B.W. Carbonatite metasomatism in the northern Tanzanian mantle: Petrographic and geochemical characteristics. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 114 (4):463-475, 1993.

SCHMINCKE. H.-U. FIRTH. J.V. and DUFFIELD. W. Proceedings of the Ocean Drilling Program. *Scientific Results*, v. 157, Chapter 27, p. 443-469, 1998.

SCHMITT, R.S., TROUW, R.A.J., W.R.; PIMENTEL. Late amalgamation in the central part of Western Gondwana: new geochronological data and the characterization of a Cambrian collision orogeny in the Ribeira Belt (SE Brazil). *Precambrian Research*, 133:29-61, 2004.

_____. Orogenia Búzios – Um evento tectonometamórfico cambro-ordoviciano caracterizado no Domínio Tectônico de Cabo Frio, Faixa Ribeira – sudeste do Brasil. *Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro*, 273p, 2001.

SCHOBENHAUS, C. Geologia do Brasil. *Texto explicativo do Mapa Geológico do Brasil e da área oceânica adjacente incluindo depósitos minerais - escala 1:2.500.000. Brasília, MME/DNPM*, 501 p, 1984.

SICHEL, S.E. Subvolcanic vent-filling welded tuff breccia of the Cabo Frio Island, State of Rio de Janeiro, Brazil. *REM - Revista Escola de Minas, Ouro Preto*, v.61(4), 423-432, 2008b.

SICHEL, S.E., MOTOKI, A., IWANUCH, W., VARGAS, T., AIRES, J. R., MELO, D. P., MOTOKI, K. F., BALMANT, A., RODRIGUES, J.G. Cristalização fracionada e assimilação da crosta continental pelos magmas de rochas alcalinas félsicas do estado do Rio de Janeiro, Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio de Janeiro*, 35 (2):84-104, 2012.

SHAND S.J. The eruptive rocks. *John Wiley, New York, segunda edição*. 444p, 1943.

_____. The problem of the alkaline rocks. *Proceedings of the Geological Society of South Africa*, v. 25, p.19-33, 1922.

SONOKI, I.K., GARDA, G.M. Idades K-Ar de rochas alcalinas do Brasil Meridional e Paraguai Oriental: compilação e adaptação às novas constantes de decaimento. *Bol. IG-USP, Cien.*, São Paulo, 19:63-85, 1988.

SZATMARI, P. Habitat of petroleum along the south Atlantic margins. *Petroleum Systems of South Atlantic Margins: AAPG Memoir 73*, p.69-75, 2000.

SMYTH, C.H. Composition of the alkaline rocks and its significance as to their origin. *American Journal of Science*, v. 36(4), p.1-36, 1913.

SØRENSEN, H. *The Alkaline Rocks*. London: John Wiley & Sons, 1974.

THOMAZ FILHO, A. et al. Hot spot volcanic tracks and their implications for South American plate motion, Campos basin (Rio de Janeiro state), Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 18, n. 3-4, p. 383-389, 2005.

_____, RODRIGUES A.L. O alinhamento de rochas alcalinas Poços de Caldas-Cabo Frio (RJ) e sua continuidade na Cadeia Vitória- Trindade. *Rev. Bras. Geoc.* (2)189-194, 1999.

TULLER, M.P. Texto Explicativo da Folha SE. 24-Y-C-VI, Colatina. In: Tuller, M.P. *Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, DNPM/CPRM Brasília*. 163p, 1993.

THOMPSON, R.N., GIBSON, S.A., MITCHELL, J.G., DICKIN, A.P., LEONARDOS, O.H., BROD, J.A., GREENWOOD, J.C. Migrating Cretaceous–Eocene Magmatism in the Serra do Mar Alkaline Province, SE Brazil: Melts from the Deflected Trindade Mantle Plume? *J. petrol.*39 (8): 1493-1526, 1998.

TUPINAMBÁ, M. Geologia da Faixa Ribeira Setentrional: estado da arte e conexões com a Faixa Araçuaí. *Geonomos* 15(1): 67 - 79, 2007.

ULBRICH, H.H.G.J., GOMES, C.B. Alkaline rocks from continental Brazil. *Earth-Sci. Rev.*, 17:135-154, 1981.

VALENÇA, J. Geology, petrography and petrogenesis of some alkaline igneous complexes of Rio de Janeiro state, Brazil. *Tese de doutorado – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro*, 1980.

_____. Rochas alcalinas do Estado do Rio de Janeiro. *Revista de Mineração e Metalurgia*, v. 39, n. 366, p. 6-11, 1975.

VALENTE, S. C., MEIGHAN, I. G. ; FALLICK, A. E. ; ELLAM, R. L. . Os diques de rochas alcalinas do Rio de Janeiro, RJ. *Anais do V Congresso Brasileiro de Geoquímica e III Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa. Rio de Janeiro: SBG*, v. 1. p. lit20, 1995.

_____. Geochemical and isotopic constraints on the petrogenesis of the Cretaceous dykes of Rio de Janeiro, Brazil. *Tese de Doutorado, Departamento de Geologia, Escola de Geociências, The Queen's University of Belfast*, 373 p, 1997.

WIEDEMANN, C.M., MENDES, J.C., COSTA-DE-MOURA, J., COSTA-NASCIMENTO, R. AND LUDKA, I.P. Granitoids of the Espirito Santo Magmatic Arc. *SBG, International Symp. On granites and associated mineralizations, 2 Excursions Guide*, pp. 57-76, 1997.

_____., DE MEDEIROS, S.R., LUDKA, I.P., MENDES, J.C., J. COSTA-DE-MOURA. Architecture of Late Orogenic Plutons in the AraGuai-Ribeira Fold Belt, Southeast Brazil. *Gondwana Research*, v5, No. 2, pp. 381-399, 2001.

WINCHESTER, A., FLOYD, P. A. J. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology Volume 20*, Pages 325-343, 1977.

WOOD, B. J., FRASER, D. C. Elementary Thermodynamics for Geologists. *Geol. Mag*, 116 (1), pp 69-78, 1976.

YODER, H.S., TILLEY, C. E., Origin of Basalt Magmas: An Experimental Study of Natural and Synthetic Rock Systems. *Journal of Petrology*. Vol. 3, Part J, pp. 342-532, 1962.

ZENG G., CHEN L., XU X., JIANG S., HOFMANN A.W. Carbonated mantle sources for Cenozoic intra-plate alkaline basalts in Shandong, North China. *Chem. Geol.*, 273 (1-2):35-45, 2010.

APÊNDICE A - Tabela de Pontos

Dados: *Datum*: SIRGAS 2000. Sistema de coordenadas UTM Fuso 23S Estendido.

Ponto	UTM_N	UTM_E	Cota	Unidade
CAMSJ01	7503918	807527	9m	Sienito com nefelina
CAMSJ02	7503922	807282	48m	Sienito com nefelina
CAMSJ03	7503903	807247	55m	Sienito com nefelina
CAMSJ04	7503866	807096	80m	Fonolito
CAMSJ05	7503814	807109	78m	Hornblenda sienito com nefelina
CAMSJ06	7503658	807011	118m	Sienito com nefelina
CAMSJ07	7503622	806978	102m	Nefelina sienito
CAMSJ08	7503593	806942	100m	Hornblenda sienito com nefelina + Interação*
CAMSJ09	7503962	807063	123m	Nefelina sienito
CAMSJ10	7503551	806809	36m	Sienito com nefelina
CAMSJ11	7503467	806733	80m	Nefelina Sienito
CAMSJ12	7503358	806697	128m	Nefelina sienito
CAMSJ13	7503538	806715	209m	Sienito
CAMSJ14				Interação
CAMSJ15	7500369	806729	201m	Hornblenda sienito com nefelina
CAMSJ16	7503826	806740	230m	Hornblenda sienito com nefelina
CAMSJ17	7504095	806751	276m	Hornblenda sienito com nefelina
CAMSJ18	7504188	806558	309m	Sienito
CAMSJ19	7504174	806419	337m	Hornblenda sienito com nefelina
CAMSJ20	7504244	806384	341m	Hornblenda sienito com nefelina
CAMSJ21	7504368	806301	334m	Hornblenda sienito com nefelina
CAMSJ22	7504408	806083	349m	Fonolito Pórfiro
CAMSJ23	7504357	805954	362m	Fonolito
CAMSJ24	7504302	805750	400m	Nefelina sienito
CAMSJ25	7504311	805720	398m	Nefelina sienito
CAMSJ26	7504277	805646	380m	Interação
CAMSJ27	7503451	807191	11m	Sienito
CAMSJ28	7503283	807156	12m	Hornblenda gabro + Interação
CAMSJ29	7503210	807134	15m	Sienito
CAMSJ30	7503109	807058	10m	Hornblenda gabro
CAMSJ31	7505682	807352	7m	Nefelina sienito
CAMSJ32	7506433	807068	8m	Biotita Gnaisse
CAMSJ33	7500664	807000	11m	Biotita Gnaisse
CAMSJ34	7506574	806983	13m	Biotita Gnaisse
CAMSJ35	7506617	806881	15m	Nefelina sienito
CAMSJ36	7506732	806908	11m	Sienito
CAMSJ37	7506777	806603	16m	Embasamento + Fonolito
CAMSJ38	7506844	806497	14m	Sienito com nefelina
CAMSJ39	7506808	806449	16m	Sienito + Interação
CAMSJ40	756849	806359	32m	Interação

CAMSJ41	7506751	806480	35m	Sienito
CAMSJ42	7506703	806434	42m	Hornblenda sienito com nefelina
CAMSJ43	7506658	806380	55m	Sienito
CAMSJ44	7504623	806854	100m	Sienito
CAMSJ45	7504639	806738	101m	Sienito
CAMSJ46	7504745	806747	73m	Sienito
CAMSJ47	7504637	806822	134m	Sienito + Interação
CAMSJ48	7504652	806921		Sienito
CAMSJ49	7504634	806987	91m	Fonolito
CAMSJ50	7504620	807094	51m	Hornblenda sienito com nefelina
CAMSJ51	7503213	807121	7m	Hornblenda sienito com nefelina
CAMSJ52	7503111	807035	8m	Hornblenda gabro
CAMSJ53	7502627	806474	18m	Traquito + Embasamento
CAMSJ54	7502441	806286	3m	Sienito
CAMSJ55	7502234	805082	11m	Sienito/Fonolito
CAMSJ56	7502179	804699	2m	Sienito/Fonolito
CAMSJ57	7502860	803737	7m	Sienito
CAMSJ58	7505405	802853	4m	Hornblenda gabro + Sienito
CAMSJ59	7504903	802865	11m	Hornblenda gabro + Sienito
CAMSJ60	7504770	802831	7m	Hornblenda gabro
CAMSJ61	7503927	803028	8m	Sienito
CAMSJ62	7503731	803021	5m	Sienito
CAMSJ63	7505901	807353	9m	Sienito
CAMSJ64	7504850	805110	567m	Sienito
CAMSJ65	804827	7504792	575m	
CAMSJ66	7504758	805142	517m	Sienito + Interação
CAMSJ67	7504670	805128	511m	Interação
CAMSJ68	7504630	805182	485m	Enclave máfico não identificado
CAMSJ69	7504588	805264	483m	Hornblenda gabro
CAMSJ70	7504550	805359	459m	Sienito
CAMSJ71	7504497	805517	402m	Sienito
CAMSJ72	7504378	805543	375m	Fonolito + Interação
CAMSJ73	7504285	805644	365m	Interação
CAMSJ74	7504402	806170	321m	Fonolito
CAMSJ75	7504364	806285	290m	Interação
CAMSJ76	7504119	806735	240m	Interação
CAMSJ77	7503894	806678	232m	Nefelina Sienito
CAMSJ78	7503545	806694	166m	Nefelina Sienito
CAMSJ79	7503356	806924	128m	Zona de Assimilação + Sienito
CAMSJ80	7506515	806951	11m	Nefelina Sienito
CAMSJ81	7506715	806891	5m	Nefelina Sienito
CAMSJ82	7507383	806265	4m	Embasamento + Veios de Quartzo Recristalizado
CAMSJ83	7506561	805239	110m	Interação todas unidades
CAMSJ84	7506829	805330	58m	Hornblenda sienito com nefelina
CAMSJ85	7507401	805114	4,8m	Embasamento
CAMSJ86	7507143	804472	9m	Nefelina Sienito

CAMSJ87	7507100	804748	5m	Nefelina Sienito
CAMSJ88	7507156	805144	6m	Interação
CAMSJ89	7505589	803038	11m	Interação
CAMSJ90	7505440	803622	83m	Interação
CAMSJ91	7506923	804029	30m	Nefelina Sienito
CAMSJ92	7506765	804120	19m	Nefelina Sienito
CAMSJ93	7506601	804932	28m	Nefelina Sienito
CAMSJ94	7506242	803569	11m	Colúvio acima do Depósito de Talus

*Interação: feições de mistura magmática

APÊNDICE B – Tabelas Microsonda Eletrônica

Tabela cálculo #Mg (número de magnésio) e TSi (Teor de Sílica)

Amostra	Mg/(Mg+Fe²⁺)	TSi
CAMSJ01	0.324	5.201
CAMSJ01	0.478	5.962
CAMSJ01	0.581	5.886
CAMSJ01	0.44	5.866
hornblenda sienito com nefelina	0.298	5.433
hornblenda sienito com nefelina	0.518	6.429
hornblenda sienito com nefelina	0.482	5.601
hornblenda sienito com nefelina	0.45	6.307
hornblenda sienito com nefelina	0.587	5.735
hornblenda gabro	0.392	5.231
hornblenda gabro	0.364	5.273
hornblenda gabro	0.425	5.237

	Granada				
SiO ₂	34.55	34.25	34.31	33.82	34.59
TiO ₂	2.11	4.71	2.84	4.63	3.67
Al ₂ O ₃	6.77	5.72	5.66	6.36	6.15
FeO	19.99	19.96	20.49	19.99	19.73
MnO	0.79	0.73	0.72	0.69	0.69
Total	98.43	99.04	97.10	99.32	98.54

Piroxênio

	Hornblenda gabro							Nefelina Sienito				
	SiO ₂	40.68	42.63	40.72	42.18	41.86	42.30	36.85	42.19	41.82	43.76	50.24
TiO ₂	4.78	3.58	4.67	4.14	4.08	3.42	4.94	3.51	3.23	2.46	0.39	0.35
Al ₂ O ₃	11.45	10.20	11.91	10.59	10.70	10.02	15.47	9.50	9.89	8.75	1.75	1.38
Cr ₂ O ₃	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00
FeO	9.93	10.83	10.88	10.02	10.63	12.12	17.05	11.07	13.29	13.02	19.77	21.40
MnO	0.34	0.31	0.35	0.34	0.39	0.45	0.52	0.42	0.59	0.71	3.30	3.33
MgO	8.34	8.78	8.17	9.03	8.79	8.02	7.94	8.51	7.42	7.95	3.86	2.70
CaO	22.97	23.09	22.91	23.01	22.76	22.43	11.58	22.19	22.51	22.51	16.58	14.88
Na ₂ O	0.68	0.75	0.75	0.63	0.78	0.95	1.80	0.74	0.88	0.87	3.80	5.16
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	99.17	100.19	100.34	99.94	99.99	99.70	96.19	98.12	99.63	100.05	99.69	99.15

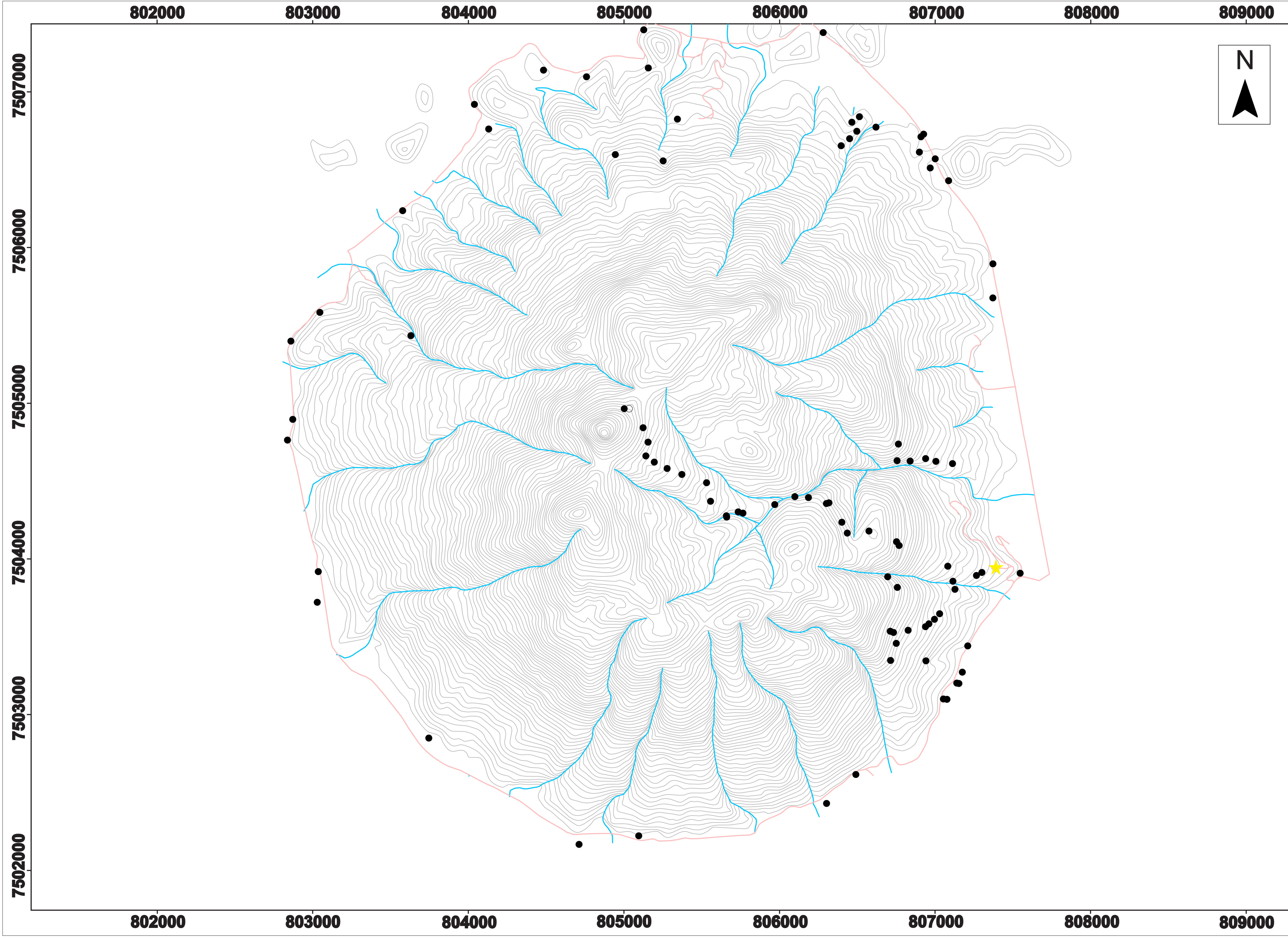
Anfibólio

	Hornblenda gabro			Nefelina Sienito				Hornblenda sienito com nefelina				
	SiO ₂	32.99	34.09	32.88	32.43	36.00	36.58	35.52	34.02	39.23	36.25	37.79
TiO ₂	5.40	5.53	5.38	3.21	2.20	3.11	2.37	3.68	1.19	3.45	1.29	4.15
Al ₂ O ₃	16.33	16.42	16.09	16.35	9.04	9.35	9.55	14.98	5.46	13.87	6.33	10.48
FeO	18.93	20.45	17.83	25.47	14.16	11.81	15.22	23.47	14.54	16.29	16.01	11.10
MnO	0.59	0.65	0.56	1.19	0.77	0.48	0.85	0.68	0.57	0.41	0.61	0.39
MgO	6.87	6.58	7.40	4.51	7.28	9.19	6.71	5.59	8.79	8.50	7.36	8.88
CaO	12.08	12.36	12.04	12.11	21.72	22.27	21.88	12.11	22.10	18.06	21.41	22.36
Na ₂ O	1.56	1.49	1.70	1.68	1.02	0.78	0.93	1.30	1.07	0.62	1.33	0.91
K ₂ O	1.66	1.62	1.76	1.88	0.00	0.00	0.00	1.85	0.00	0.05	0.00	0.00
Total	96.41	99.20	95.64	98.81	92.19	93.55	93.02	97.68	92.94	97.51	92.12	94.33

Plagioclásio

	Hornblenda gabro		
SiO ₂	46.36	46.64	46.4
TiO ₂			
Al ₂ O ₃	34.49	33.58	34.4
FeO	0.49	0.43	0.45
CaO	16.11	16.14	15.7
Na ₂ O	1.85	1.67	1.77
Total	99.36	98.50	98.9

	Nefelina Sienito														
SiO ₂	60.44	59.2	57.8	58.6	58.9	59.23	59.45	59.96	54.8	40.4	62.21	65.0	61.69	62.11	63.64
TiO ₂															
Al ₂ O ₃	18.95	19.2	19.82	18.87	19.56	19.02	19.29	19.02	21.6	33.56	17.93	18.94	18.01	17.97	18.39
FeO	0.11	0.08	0.14	0.07	0.14	0.11	0.16	0.08	0.11	0.34	0.08	0.07	0.22	0.14	0.23
CaO	0.15	0.17	0.24	0.14	0.25	0.15	0.19	0.14	0.31	1.88	0.01	0.09	0.03	0.01	0.05
Na ₂ O	1.80	1.80	1.81	1.56	1.74	1.51	1.81	1.48	4.24	15.06	2.53	8.48	0.40	0.37	4.90
K ₂ O															
Total	101.01	99.6	98.34	99.09	99.15	99.24	100.16	100.45	94.1	99.65	102.74	98.77	103.9	104.38	101.30








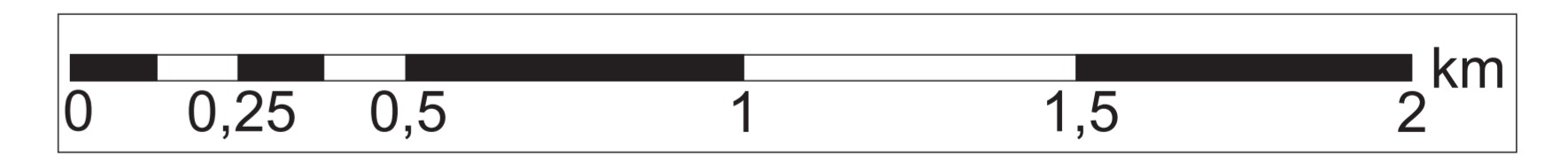
Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Geologia

APÊNDICE D - Mapa de Pontos do Morro de São João

Autora: Mariana Bessa Fagundes

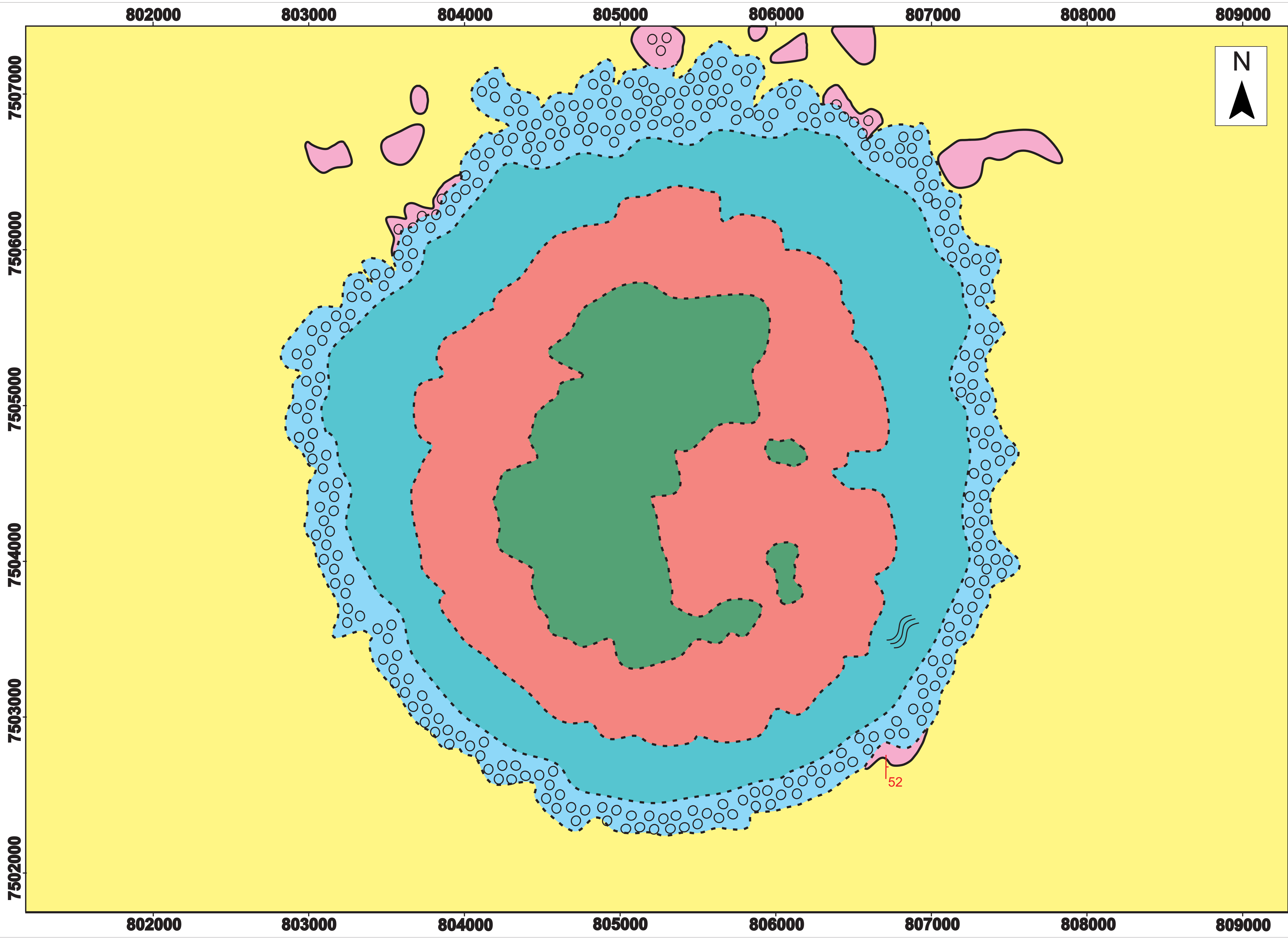
Legenda

-  Curvas de Nível
-  Hidrografia
-  Arruamento/Trilhas
-  Pontos Coletados
-  Pousada Fazenda São João



Referencial Geodésico SIRGAS 2000
 Sistemas de Coordenadas UTM Fuso 23S Estendido
 Fonte: IBGE RJ25

Processo FAPERJ: E-26/202.621/2018
 Processo ANP-PETROBRAS-UFRRJ: 2017/00353-1



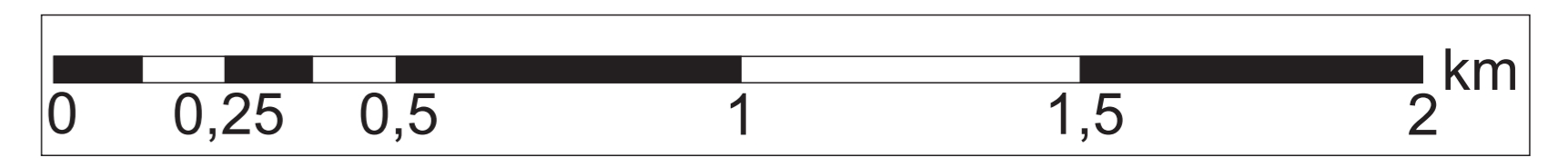
Universidade do Estado do Rio de Janeiro
 Centro de Tecnologia e Ciências
 Faculdade de Geologia

APÊNDICE E - Mapa Geológico do Morro de São João

Autora: Mariana Bessa Fagundes

Legenda

- Fácies Melanocrática
- Fácies Mesocrática
- Fácies Leucocrática
- Embasamento Gnáissico
- Sedimento Quaternário
- Depósito de Talus
- Zona de Assimilação
- Contato Observado
- Contato Inferido
- Foliação Gnáissica



Referencial Geodésico SIRGAS 2000
 Sistemas de Coordenadas UTM Fuso 23S Estendido
 Fonte: IBGE RJ25

Processo FAPERJ: E-26/202.621/2018
 Processo ANP-PETROBRAS-UFRRJ: 2017/00353-1