

UFRRJ

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM E
EVOLUÇÃO GEOLÓGICA**

DISSERTAÇÃO

**Caracterização Radiométrica do Maciço Alcalino do Morro de
São João - RJ.**

André Gava Heitor

2025



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM E
EVOLUÇÃO GEOLÓGICA

CARACTERIZAÇÃO RADIOMÉTRICA DO MACIÇO
ALCALINO DO MORRO DE SÃO JOÃO - RJ

ANDRÉ GAVA HEITOR

Sob a Orientação do Professor Dr.

Artur Corval

E Co-orientação do Professor Dr.

Thomas Ferreira da Costa Campos

E Co-orientação da Professora Dra.

Suze Nei Pereira Guimarães

Dissertação submetida como requisito parcial
para a obtenção do grau de **Mestre em Geociências**,
no curso de Pós-Graduação em Modelagem e
Evolução Geológica, Área de Concentração em
Modelagem de Processos Petrológicos

Seropédica, RJ

Outubro de 2025

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

G465 c Gava Heitor, Andre, 1998-
Caracterização Radiométrica do Maciço Alcalino do
Morro de São João - RJ. / Andre Gava Heitor. Seropédica,
2026.
63 f.

Orientador: Artur Corval Vieira.
Coorientador: Thomas Ferreira da Costa Campos.
Coorientadora: Suze Nei Pereira Guimarães.
Dissertação (Mestrado). -- Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em
Modelagem e Evolução Geológica, 2026.

1. Gama espectrometria. 2. Calor radiogênico. 3.
Magmatismo Alcalino. 4. Morro de São João. I. Vieira,
Artur Corval, 1977-, orient. II. Campos, Thomas
Ferreira da Costa, -, coorient. III. Guimarães, Suze
Nei Pereira, -, coorient. IV Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro. Programa de Pós-graduação em
Modelagem e Evolução Geológica. V. Título.

*O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de
Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001*

*This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de
Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001*



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS



HOMOLOGAÇÃO DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 65/2025 - IGEO (11.39.00.34)

Nº do Protocolo: 23083.072354/2025-45

Seropédica-RJ, 12 de dezembro de 2025.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM E EVOLUÇÃO
GEOLÓGICA

ANDRE GAVA HEITOR

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Geociências**, no Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Evolução Geológica, área de concentração em MODELAGEM DE PROCESSOS GEOLÓGICOS E GEODINÂMICOS.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 26/11/2025.

Artur Corval Vieira. Dr. PPGMEG/UFRRJ

(Orientador/presidente da banca)

Thomas Ferreira da Costa Campos. Dr. CCET/UFRN

(Co-orientador)

Suze Nei Pereira Guimarães. Dra. DPETRO/UFRRJ

(Co-orientadora)

Francisco José Fonseca Ferreira. Dr. DGEOL/UFPR

(Membro Externo)

Liliane Paiva Panetto. Dra. PPGMEG/UFRRJ

(Membro Interno)

(Assinado digitalmente em 12/12/2025 11:20)

ARTUR CORVAL VIEIRA
COORDENADOR CURS/POS-GRADUACAO - TITULAR
PPGMEG (11.39.00.12)
Matricula: ###489#8

(Assinado digitalmente em 12/12/2025 10:22)

SUZE NEI PEREIRA GUIMARAES
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DPETRO (11.39.40)
Matricula: ###601#9

(Assinado digitalmente em 12/12/2025 10:12)

LILIANE PAIVA PANETTO
ASSINANTE EXTERNO
CPF: ###.###.817-##

(Assinado digitalmente em 12/12/2025 10:02)

THOMAS FERREIRA DA COSTA CAMPOS
ASSINANTE EXTERNO
CPF: ###.###.203-##

(Assinado digitalmente em 12/12/2025 16:35)

FRANCISCO JOSÉ FONSECA FERREIRA
ASSINANTE EXTERNO
CPF: ###.###.384-##

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrrj.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **65**, ano: **2025**, tipo: **HOMOLOGAÇÃO DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**, data de emissão: **12/12/2025** e o código de verificação: **85d5cf9fd9**

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

CURSO DE PÓS GRADUAÇÃO EM MODELAGEM E EVOLUÇÃO GEOLÓGICA

ANDRÉ GAVA HEITOR

Dissertação submetida como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre**, no curso de Pós-Graduação em Modelagem e Evolução Geológica, Área de Concentração em Modelagem de Processos Petrológicos.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM :

Assinatura

Artur Corval Vieira (PhD) UFRRJ
(Orientador)

Assinatura

Francisco José Fonseca Ferreira, Dr. UFPR
(Membro externo)

Assinatura

Liliane Paiva Panetto, Dr. PPGMEG/UFRRJ
(Membro interno)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, Clodoaldo, Suely e Júlia, pelo apoio em todos esses anos em que estive envolvido com a geologia.

Aos meus amigos, prévios e contemporâneos à Rural, pelos momentos de descontração e apoio quando eu mais necessitava.

Aos colegas mestrandos do PPGMEG, e todo o corpo docente e de pesquisadores envolvidos. Também aos laboratórios e instituições que estiveram envolvidas nesse trabalho, nos quais posso citar o Observatório Nacional e o Instituto de Radioproteção e Dosimetria.

Aos meus orientadores, Dr. Artur Corval e Dr. Thomas Ferreira de Costa Campos, por me guiarem ao longo do desenvolvimento de minha pesquisa. Agradecimento mais que especial a Dra. Suze Guimarães, que não mediu esforços para me orientar e me ensinar a trabalhar com softwares, banco de dados, e me ajudou com outras diversas adversidades por qual eu passei.

A UFRRJ, a última vez que eu redigi um texto de agradecimentos disse que seria um “até breve”. Dessa vez é um adeus, mas nunca esquecerei de todas as conexões e ensinamentos proporcionados pela Rural.

**“Mude de ideia se esse for o caso,
Deixe entrar um pouco d’água no quintal”
Os Mutantes**

RESUMO

HEITOR, A. G., **Caracterização Radiométrica do Maciço Alcalino do Morro de São João - RJ**. Dissertação de Mestrado em Modelagem e Evolução Geológica. Instituto de Geociências, Departamento de Petrologia e Tectônica, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2024.

O Maciço Alcalino do Morro de São João (MSJ), integrante do Alinhamento Alcalino Poços de Caldas–Cabo Frio (PCCF), é constituído predominantemente por sienitos, apresentando ampla variação composicional expressa em litotipos melanocráticos, mesocráticos e leucocráticos. Diferentemente de outros maciços alcalinos do mesmo alinhamento, o MSJ não possui afloramentos expressivos, sendo seus litotipos reconhecidos principalmente em blocos e matacões de diversas formas e dimensões. Essa característica, aliada ao difícil acesso ao interior do maciço, limita o detalhamento do mapeamento litológico. Neste trabalho, empregou-se gamaespectrometria em diferentes escalas — aérea, de campo e laboratorial — com o objetivo de caracterizar radiometricamente o maciço e relacionar a distribuição de K, Th e U aos litotipos presentes. Os dados aéreos e de campo foram processados no software *Oasis Montaj Student Version*, resultando em mapas de distribuição dos radioelementos, bem como mapas interpretativos (ternário, fator F) e de razões isotópicas. Observou-se boa correlação entre os levantamentos aéreos e de campo; entretanto, os dados de campo revelaram variações localizadas não detectadas pelos aerolevantamentos, atribuídas à maior resolução e proximidade da fonte nos equipamentos portáteis. As análises laboratoriais confirmaram um padrão de enriquecimento em K, Th e U diretamente relacionado ao grau de evolução magmática: rochas melanocráticas apresentam menores teores, enquanto rochas félsicas exibem enriquecimento progressivo, refletindo o comportamento incompatível desses elementos durante a diferenciação magmática. Adicionalmente, foram estimadas as taxas de produção de calor radiogênico a partir de dados de campo e de amostras, evidenciando a contribuição dos elementos radiogênicos para o regime térmico crustal na região.

Palavras-chave: Gamaespectrometria, radionuclídeos naturais, calor radiogênico, Morro de São João, rochas alcalinas.

ABSTRACT

HEITOR, A. G., **Radiometric Characterization of the Morro de São João Alkaline Massif.** Master's thesis in Modeling and Geological Evolution. Institute of Geosciences, Department of Petrology and Geotectonics, Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2024.

The Morro de São João Alkaline Massif (MSJ), part of the Poços de Caldas– Cabo Frio Alkaline Alignment (PCCF), consists predominantly of syenites, exhibiting a wide compositional range represented by melanocratic, mesocratic, and leucocratic lithotypes. Unlike other alkaline massifs in the same alignment, the MSJ lacks significant outcrops, with its lithotypes primarily recognized in blocks and boulders of varying shapes and sizes. This, combined with limited access to the massif interior, constrains detailed lithological mapping. In this study, the gamma spectrometry geophysical method was applied at multiple scales (aerial, field, and laboratory) to radiometrically characterize the massif and relate the distribution of K, Th, and U to the lithotypes present. Aerial and field data were processed using Oasis Montaj Student Version, producing maps of radioelement distribution, interpretive maps (ternary, F factor), and isotopic ratios. A strong correlation was observed between aerial and field surveys; however, field data revealed localized variations not detected in aerial surveys, attributed to the higher resolution and proximity of portable equipment to the source. Laboratory analyses confirmed a pattern of K, Th, and U enrichment directly related to the degree of magmatic evolution, with melanocratic rocks showing lower contents and felsic rocks exhibiting progressive enrichment, reflecting the incompatible behavior of these elements during magmatic differentiation. Additionally, radiogenic heat production rates were estimated from field and sample data, highlighting the contribution of radiogenic elements to the crustal thermal regime in the region.

Keywords: Gamma-ray spectrometry, natural radionuclides, radiogenic heat, Morro De São João, alkaline rocks.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Mapa de localização geográfica do Complexo Alcalino do Morro de São João, destacado pelo formato circular e a cobertura vegetal. Fonte: Google Satellite.....	4
Figura 2.1: Espectros de radiação gama exibindo as posições das janelas de energia para cada elemento radiométrico e para contagem total. Modificado de Lovborg & Mose, 1987.....	6
Figura 2.2: Variação dos teores de radioelementos (K, U e Th) de rochas ígneas em relação ao aumento do teor de sílica. Modificado de Dickson & Scott (1997)	6
Figura 3.1: Diagrama TAS (Total Álcalis x Sílica) de classificação química de rochas de Cox <i>et al.</i> (1979) para as rochas ígneas do MSJ. A curva de discriminação de séries alcalina e subalcalina é de Irvine & Barragar (1971).....	16
Figura 4.1: Amostras coletadas na etapa de campo no MSJ. Legenda: 1: Amostra leucocrática, félsica. 2: Amostra mesocrática, com presença de fases félsicas e máficas. 3: Amostra melanocrática, máfica.	20
Figura 5.1: Lithological map of the Morro de São João Alkaline Massif, Casimiro de Abreu, RJ, Brazil. Modified from Heilbron et al. (2016) and Fagundes et al. (2025b).....	24
Figure 5.2: Airborne data total count and radiogenic element distribution maps. (A) K distribution map; (C) eTh distribution map; (D) eU distribution map. The black line delineates the massif limits.	27
Figura 5.3: Hypsometric map of the Morro de São João Alkaline Massif.	29
Figura 5.4: Geographical profiles traced in the study area, indicating the main variations in: (a) elevation (pink line); (b) potassium (red line); (c) thorium (blue line) and uranium (green line) along the SE-NW and SW-NE axes.	30
Figura 5.5: Interpretative radiogenic maps of the MSJ obtained by airborne gamma spectrometry: (A) RGB-ternary concentration; (B) distribution of F parameter; (C) Results of the K-means clustering and corresponding silhouette coefficient used to assess cluster separation.	30
Figura 5.6: Ground radiogenic element distribution maps: (A) K distribution map; (B) eTh distribution map and (C) eU distribution map. The black line represents the massif limits, and the dots represent ground measurement points.....	32
Figura 5.7: Isotopic ratios and F parameter distribution map for ground gamma spectrometry. The black line represents the massif limits.	34
Figura 5.8: Geological map of the MSJ, inferred from the integration of multi-scale gamma spectrometry data and field interpretations.....	34
Figura 5.9: Examples of MSJ samples classified as nephelyne sienites (A) and hybrid rocks (B).	35
Figura 5.10: Maximum, mean, minimum and standard deviation values K, eTh and eU contents obtained by means of laboratory gamma spectrometry analysis in 35 samples from the MSJ (A) and maximum, mean and minimum values of K, eTh and eU regarding airborne,	

ground and laboratory gamma ray measurements (B). σ is used to denote standard deviation, n represents the number of samples.39

Figura 5.11: Maps of (A) radiogenic heat production and (B) radiogenic heat flow calculated from ground gamma-ray spectrometry data. The black line delineates the boundaries of the Morro de São João (MSJ) alkaline massif...41

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1: Statistical synthesis of K, eTh and eU concentrations for the three clusters obtained from the K-means classification. eU denotes equivalent uranium (ppm); eTh denotes equivalent thorium (ppm); and K denotes potassium (%). σ is used to denote standard deviation.....31

Tabela 5.2: Statistical synthesis of K, eTh, and eU obtained by in situ measurements. K: potassium (%); eTh: equivalent thorium (ppm); eU: equivalent uranium (ppm). σ = standard deviation.....32

Tabela 5.3: A statistical synthesis of K, eTh and eU obtained by means of laboratory gamma spectrometry analysis in 35 samples from the MSJ. eU denotes equivalent uranium (ppm); eTh denotes equivalent thorium (ppm) and K denotes potassium (%). The σ is used to denote standard deviation.....36

Tabela 5.4: A statistical synthesis of K, eTh and eU obtained by means of laboratory gamma spectrometry analysis in 35 samples from the MSJ. eU denotes equivalent uranium (ppm); eTh denotes equivalent thorium (ppm) and K denotes potassium (%). The samples were then grouped according to their colour index. The σ denotes by standard deviation of a set of data.36

Tabela 5.5: : Correlation coefficients (r) between airborne (Air), ground and laboratory (Lab) methods for K, eTh, and eU..... 40

Tabela 5.6: A statistical synthesis of radiogenic heat ($\mu\text{W}/\text{m}^3$) production and mean density (g/cm^3) obtained by means of laboratory gamma spectrometry data, which had been grouped according to the samples colour index. The σ denotes the standard deviation.43

Tabela 5.7: Statistical synthesis of MSJ surface heat flow obtained from in situ gamma spectrometry measurements. σ denotes the standard deviation.41

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Apresentação	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Justificativa.....	3
1.4. Localização da área de estudo	4
2 O MÉTODO GAMAESPECTROMÉTRICO.....	4
2.1. Caracterização radiométrica de Rochas.....	4
2.2. Geoquímica dos elementos radiométricos	7
2.3. Aquisição e processamento de dados gamaespectrométricos.....	9
3 REVISÃO TEMÁTICA	12
3.1. A Faixa Ribeira e o Terreno Cabo Frio	12
3.2. Magmatismo Alcalino no Sudeste Brasileiro	13
3.3. O Maciço Alcalino do Morro de São João (MSJ)	15
4 BASE DE DADOS.....	18
4.1. Gamaespectrometria aérea.....	18
4.2. Gamaespectrometria de campo.....	18
4.3. Gamaespectrometria de laboratório.....	19
5 ARTIGO CIENTÍFICO : RADIOMETRIC CHARACTERIZATION OF THE MORRO DE SÃO JOÃO	20
5.1. Abstract	20
5.2. Introduction	21
5.3. Simplified Geological Context of the Morro de São João Alkaline Massif	22
5.4. Geophysical Dataset and Methodology	24
5.4.1. Gamma Ray Spectrometry at Ground and Lab scale	24
5.4.2. Airborne Gamma Ray Spectrometry.....	26
5.5. Results and Discussion.....	27
5.5.1. Radiometric Characterization of the MSJ	27
5.5.1.1. Regional Characterization	27
5.5.1.2. Local Characterization.....	32
5.5.1.3. Laboratory Radiometric Analysis.....	36
5.5.2. Radiogenic heat production	37
5.6. Conclusions	41
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44

1 INTRODUÇÃO

1.1. Apresentação

Essa dissertação foi desenvolvida no curso de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Evolução Geológica (PPGMEG) da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ). O tema geral do projeto de dissertação é a caracterização radiométrica do maciço alcalino do Morro de São João (MSJ), localizado no município de Casimiro de Abreu - RJ. Esta pesquisa esteve vinculada à linha de pesquisa Modelagem de Processos Petrológicos e teve apoio financeiro do projeto de pesquisa “PETROMAGMATISMO”, desenvolvido no Laboratório de Modelagem e Evolução Geológica (LabMEG) da UFRRJ, tendo como conveniente a Fundação FAPUR. A dissertação e a submissão do artigo científico em periódico de nível B1 ou superior de acordo com o Qualis da área de geociência da CAPES constituem requisitos obrigatórios para a obtenção do título de mestre no PPGMEG (UFRRJ).

O magmatismo alcalino brasileiro tem sido amplamente investigado em razão de sua diversidade composicional, complexidade evolutiva e relevância tectônica (**Sonoki & Garda, 1988; Gibson et al, 1997; Thompson et al., 1998; Thomaz Filho et al., 1999**). Sua origem está relacionada ao *break-up* do Gondwana e a consequente abertura do Atlântico Sul durante o Cretáceo Inferior. Tal abertura foi acompanhada de uma série de eventos tectônicos e magmáticos, gerando extensos enxames de diques e propiciando a reativação de antigas zonas de falha ao longo da Faixa Ribeira (Rift Continental do Sudeste do Brasil) (**Riccominni, 2004; Schmitt et al., 2008; Almeida et al., 2021**).

A Faixa Ribeira constitui uma extensa faixa orogênica composta por rochas metamórficas e ígneas, se estendendo ao longo da margem atlântica desde a região norte do estado de Santa Catarina até o sul do Espírito Santo. Seu desenvolvimento está associado a múltiplos episódios de convergência continental ocorridos durante o Ciclo Brasileiro - Pan Africano, no Neoproterozóico (**Heilbron et al. 2016**).

Durante o Cretáceo Superior e o Paleoceno, eventos de magmatismo alcalino na Plataforma Sul-Americana originaram uma província alcalina localizada na região Sudeste do Brasil, denominada Província Alcalina da Serra do Mar (PASM - **Almeida 1983**). Com base em variações geocronológicas e relações estruturais, **Riccominni et al. (2005)** dividiram a província em duas partes: Setor Norte da Serra do Mar, que engloba corpos alcalinos que se

estendem da Bacia do Paraná até a região costeira do estado de São Paulo; e o Alinhamento Alcalino Poços de Caldas-Cabo Frio (PCCF), se estendendo da cidade de Poços de Caldas (MG) até a cidade de Rio das Ostras (RJ). O PCCF é constituído por corpos intrusivos predominantemente félsicos e insaturados em sílica, classificados como sienitos, alcalissienitos, monzonitos, nefelina sienitos e fonolitos (Ex: Mendanha, Itatiaia, Morro Redondo, Tinguá) (**Mota, 2012**).

O objeto de estudo desse trabalho é o Morro de São João (MSJ), localizado no município de Casimiro de Abreu, na região leste do estado do Rio de Janeiro. O maciço corresponde a uma das intrusões pertencentes ao PCCF, com idade estimada em aproximadamente 65 Ma (**Mota, 2012**). Trata-se de um corpo de geometria aproximadamente circular, com cerca de 4 km de diâmetro, que se distingue dos demais integrantes do PCCF pela presença de volumes expressivos de rochas máficas e uma ampla variedade litológica. Essa diversidade, destacada por **Brotzu et al. (2007)**, **Mota (2012)** e **Fagundes (2025)**, confere ao maciço um papel-chave na compreensão dos mecanismos de diferenciação magmática no contexto alcalino, bem como de suas implicações para a evolução tectônica da Plataforma Sul-Americana.

A caracterização litológica detalhada do MSJ, entretanto, é dificultada pela densa cobertura vegetal e pelas restrições de acesso em campo, o que limita a eficácia do mapeamento geológico convencional. Nesse contexto, métodos geofísicos, em especial a gamaespectrometria, representam alternativas valiosas, pois permitem inferir a composição das rochas a partir da detecção da radiação natural emitida pelos isótopos de potássio (K), urânio (U) e tório (Th). A aplicação integrada desse método, em escalas regional e de detalhe, oferece subsídios para a distinção litológica, a análise da evolução magmática e a avaliação do potencial de geração de calor radiogênico.

1.2. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é integrar dados de gamaespectrometria, também referida como espectrometria gama, obtidos em diferentes escalas — aerolevantamento, medições terrestres e análises laboratoriais — para caracterizar radiometricamente o Maciço Alcalino do Morro de São João (MSJ). Os objetivos específicos consistem em: (i) quantificar os teores de K, Th e U nos principais litotipos do maciço; (ii) mapear a distribuição espacial desses elementos e relacioná-la às unidades litológicas previamente reconhecidas; e (iii)

discutir as implicações geológicas dessas distribuições no contexto da evolução do magmatismo alcalino da região. Complementarmente, realiza-se a estimativa da produção de calor radiogênico do maciço, visando avaliar sua relevância térmica e implicações petrogenéticas.

Investigações prévias conduzidas em terrenos intrusivos de natureza análoga têm demonstrado a elevada eficiência da gamaespectrometria na discriminação de contatos litológicos, na detecção de heterogeneidades composicionais internas e na caracterização de processos pós-magmáticos, notadamente os de natureza hidrotermal (**Minty, 1997; Ribeiro et al., 2014; Silva e Ferreira, 2021**). Nesse contexto, a aplicação integrada dessa técnica ao Morro de São João (MSJ) configura-se como uma abordagem robusta para o refinamento da interpretação de sua arquitetura interna e da sua evolução magmático-estrutural. Adicionalmente, a estimativa da taxa de produção de calor radiogênico a partir das concentrações de K, U e Th (**Rybach, 1986**) constitui um parâmetro essencial para a identificação de potenciais anomalias térmicas e para a compreensão de suas implicações no arcabouço térmico e no contexto do magmatismo alcalino regional.

1.3. Justificativa

A caracterização radiométrica de corpos alcalinos constitui uma ferramenta essencial para compreender os processos petrogenéticos e a evolução geoquímica desses sistemas. O Morro de São João, situado no estado do Rio de Janeiro, representa um importante maciço alcalino do PCCF, cuja origem está associada aos eventos de rifteamento relacionados à abertura do Atlântico Sul. Apesar de sua relevância geológica e da ampla disponibilidade de dados geofísicos regionais, estudos detalhados que integrem informações gamaespectrométricas em múltiplas escalas — aerolevantamento, aquisição terrestre e análises laboratoriais — ainda são escassos.

O estudo contribui para o avanço do conhecimento sobre a geofísica de rochas alcalinas, oferecendo subsídios para interpretações petrogenéticas. Além disso, a caracterização radiogênica detalhada pode auxiliar na identificação de anomalias geoquímicas associadas a potenciais mineralizações, uma vez que variações nos teores de K, Th e U podem refletir processos de concentração de elementos traço e minerais acessórios de interesse econômico.

1.4. Localização da área de estudo

O Maciço Alcalino do Morro de São João localiza-se no sudeste do estado do Rio de Janeiro, no município de Casimiro de Abreu (**Figura 1.1**). O centro urbano da cidade de Rio das Ostras fica situado a sudeste do complexo. O maciço corresponde a um corpo circular com aproximadamente 13 km², podendo alcançar até 816m de altura. Ele é circundado por propriedades agrícolas particulares, como por exemplo as fazendas Trimonte e São João.

A logística de acesso ao morro é possível pela rodovia BR-101, a norte, na altura do km 190 no distrito de Rio Dourado. Após esse acesso, é possível seguir por estradas de terra à beira da antiga linha de trem, atravessando o Rio Dourado e percorrendo cerca de 8 km. Alternativamente, a rodovia Serramar, que liga a BR-101 ao distrito de Barra de São João e a cidade de Rio das Ostras, pode ser utilizada. O acesso efetivo ao Morro de São João (alcançando as porções mais elevadas do maciço) deve ser feito pela estrada da Fazenda São João. (**Mota, 2012**).

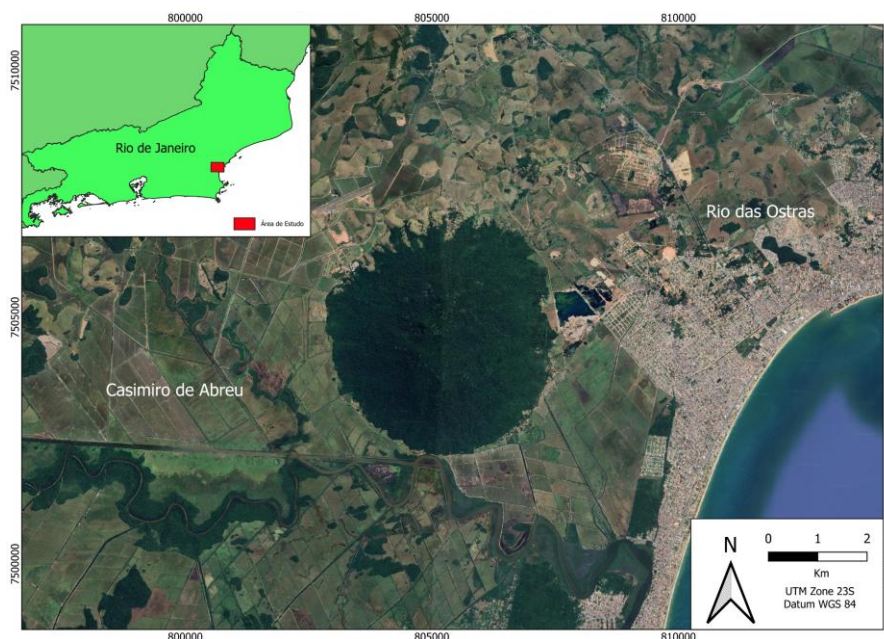


Figura 1.1: Mapa de localização geográfica do Maciço Alcalino do Morro de São João, destacado pelo formato circular e a cobertura vegetal. Fonte: Google Satellite.

2 O MÉTODO GAMAESPECTROMÉTRICO

2.1. Caracterização radiométrica de rochas

A radioatividade natural resulta do decaimento espontâneo de núcleos instáveis, que se transformam em núcleos estáveis com a liberação de energia. Esse processo ocorre em séries radioativas iniciadas por um isótopo progenitor (elemento-pai), o qual sofre sucessivas

desintegrações até atingir um estado estável, passando por isótopos intermediários radioativos (elementos-filhos). Cada radioisótopo apresenta uma meia-vida característica, que expressa a probabilidade de decaimento nuclear (Minty, 1997).

O decaimento radioativo gera três tipos principais de radiação:

- **Partículas alfa (α):** compostas por dois prótons e dois nêutrons (núcleo de hélio), possuem energias discretas e baixo poder de penetração, sendo atenuadas após poucos centímetros no ar.
- **Partículas beta (β):** equivalentes a elétrons de carga negativa, apresentam maior alcance no ar em comparação às partículas alfa.
- **Radiação gama (γ):** radiação eletromagnética de alta energia, emitida pelo núcleo após as emissões alfa ou beta. Isenta de carga e massa, apresenta elevado poder de penetração, podendo atravessar cerca de 30 cm de rocha e centenas de metros no ar.

Devido ao seu elevado poder de penetração e à especificidade energética dos fótons emitidos, a radiação gama é amplamente utilizada no sensoriamento remoto da radioatividade terrestre. O espectro energético obtido permite a identificação de picos característicos associados a isótopos específicos. Entre os radioisótopos naturais, apenas alguns apresentam abundância e intensidade suficientes para serem detectados e quantificados em levantamentos gamaespectrométricos, destacando-se o potássio-40 (^{40}K) e os radionuclídeos pertencentes às séries de decaimento do urânio-238 (^{238}U) e do tório-232 (^{232}Th), elementos comuns na mineralogia das rochas (Ulbrich et al., 2009).

A gamaespectrometria é o método empregado para estimar as concentrações de ^{40}K , urânio equivalente (eU) e tório equivalente (eTh), a partir da radiação gama emitida por rochas e solos. Os levantamentos podem ser realizados em escala de detalhe, com espectrômetros portáteis em campo, ou por meio de aquisições aerotransportadas, nas quais as medições são efetuadas ao longo de linhas de voo, conforme os objetivos do estudo.

A quantificação das concentrações de K, U e Th baseia-se na detecção de radiações no intervalo energético entre 0,41 e 2,81 MeV. Cada elemento é identificado em canais específicos: o ^{40}K apresenta um pico em 1,46 MeV; já o ^{238}U e o ^{232}Th , embora não emitam radiação gama diretamente, são estimados indiretamente pelas emissões gama de descendentes radioativos, como o ^{214}Bi (1,76 MeV) e o ^{208}Tl (2,61 MeV), respectivamente (Figura 2.1). As concentrações de urânio e tório assim obtidas são expressas como urânio equivalente (eU) e

tório equivalente (eTh), conforme definido por **Lovborg e Mose (1987)**.

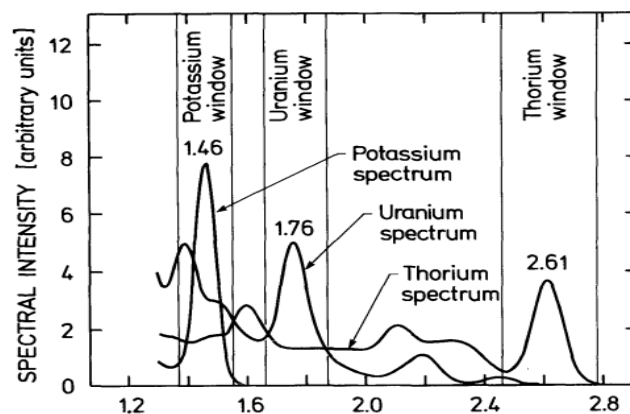


Figura 2.1: Espectros de radiação gama exibindo as posições das janelas de energia para cada elemento radiométrico e para contagem total. Modificado de Lovborg & Mose, 1987.

A aplicação da gamaespectrometria em rochas ígneas revela uma tendência geral de aumento das concentrações de K, U e Th em função do incremento do teor de SiO_2 , resultando em enriquecimento sistemático desses elementos em rochas félsicas quando comparadas às máficas (**Dickson & Scott, 1997**). Ao longo da evolução magmática, o tório apresenta a maior amplitude de variação (**Figura 2.2**), enquanto o potássio e o urânio exibem incrementos menos expressivos. Esse comportamento justifica a utilização das razões Th/U e Th/K como indicadores eficazes do grau de diferenciação magmática em suítes ígneas.

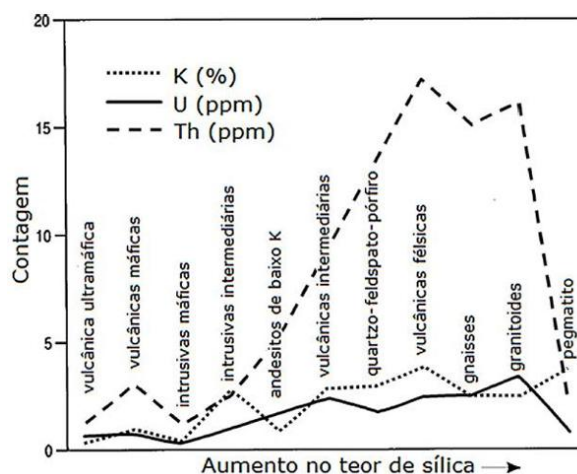


Figura 2.2: Variação dos teores de radioelementos (K, U e Th) de rochas ígneas em relação ao aumento do teor de sílica. Modificado de **Dickson & Scott (1997)**.

Os processos de decaimento radioativo dos radioisótopos de urânio (^{238}U e ^{235}U), tório (^{232}Th) e potássio (^{40}K) liberam energia cinética que, ao ser dissipada no meio circundante, converte-se em calor acumulado nas porções mais profundas da Terra. Esse calor, denominado de calor radiogênico, é transmitido à crosta continental predominantemente por condução

térmica.

Com base em uma extensa compilação de dados de litotipos sedimentares, metamórficos e ígneos (**Hasterok & Webb, 2017**), demonstrou-se que a taxa de produção de calor radiogênico apresenta tendência de aumento com o teor de SiO₂ e de elementos alcalinos. Os autores também identificaram comportamento similar entre rochas vulcânicas e plutônicas, sugerindo que a evolução composicional ao longo da diferenciação magmática — por cristalização fracionada ou fusão parcial — influencia esse parâmetro. Entretanto, a variação observada não pode ser atribuída exclusivamente a um único processo físico, pois a produção de calor radiogênico é também controlada por fatores como a composição das fontes magmáticas e a atuação de fluidos durante a evolução das rochas.

2.2. Geoquímica dos elementos radiométricos

Canadá e Austrália são reconhecidos como pioneiros na aquisição e processamento de dados gamaespectrométricos, sendo amplamente referenciados em estudos que adotam metodologias desenvolvidas nessas regiões (Ex: **Minty et al, 1997**; **Wilford et al, 1997**). Ambos os países apresentam regimes climáticos temperado e subtropical, respectivamente. No Brasil, o clima tropical contrasta significativamente com os regimes climáticos citados acima, caracterizado por elevadas taxas pluviométricas e acentuadas variações térmicas, resultando em intenso intemperismo físico e químico.

Essas condições tropicais influenciam diretamente a mobilidade dos elementos radiométricos, em especial do potássio, gerando padrões distintos em relação a regiões de clima mais árido ou temperado. Nesta perspectiva, destacam-se os principais radioelementos analisados por gamaespectrometria — potássio (K), tório (Th) e urânio (U) — com ênfase em sua distribuição e comportamento frente aos processos intempéricos, conforme discutido por **Ulbrich et al. (2009)**.

O potássio está predominantemente associado aos feldspatos potássicos, especialmente ortoclásio e microclina, que contêm aproximadamente 15 a 16% em peso de K₂O. Além disso, é comum em micas como biotita (8,0–9,35% K₂O), flogopita (9,80% K₂O) e muscovita (10–11% K₂O). Também pode ser encontrado em argilominerais formados por diagênese ou alteração hidrotermal, como a ilita (7,5% K₂O), frequentemente utilizada como indicador de zonas mineralizadas relacionadas a processos hidrotermais. Elevados teores de potássio são típicos de rochas vulcânicas félsicas (sienitoides e granitoides), de rochas

metamórficas ricas em micas e feldspatos, rochas alcalinas plutônicas, assim como de algumas rochas sedimentares (**Dickson & Scott, 1997**).

O potássio apresenta elevada mobilidade em ambientes submetidos à alteração hidrotermal e ao intemperismo químico. Em regiões com clima tropical a subtropical, caracterizadas por precipitações intensas e drenagem eficiente, ocorre a transformação dos feldspatos potássicos em caulinita. Em condições de drenagem parcial, há predomínio na formação de esmectita. Esses processos decorrem da hidrólise dos feldspatos, na qual os íons K^+ são liberados para a solução, facilitando a precipitação de silicatos hidratados de alumínio, como a caulinita (**McCarthy & Reynolds, 2001**). Tal processo é comum em ambientes tropicais ou com forte alteração hidrotermal.

Processos semelhantes ocorrem em rochas contendo álcali-feldspatos, bem como em biotita, a qual pode ser transformada em vermiculita sob condições específicas de intemperismo, ocasionando perda quase total de K (**White, 2002**). Em ambientes de clima árido, a alteração dos feldspatos é restrita, favorecendo sua preservação e a formação de rochas sedimentares feldspáticas enriquecidas em potássio, decorrentes da desagregação física e do transporte sedimentar.

O tório e o urânio concentram-se predominantemente em minerais acessórios presentes em rochas ígneas e metamórficas quartzo-feldspáticas (**Bea, 1996**). A formação desses minerais está frequentemente associada a processos pós-magmáticos, como o hidrotermalismo, que pode também promover a geração de sulfetos de interesse econômico (pirita, calcopirita e outros) concomitantemente aos minerais portadores de U e Th. Esses minerais geralmente ocorrem como grãos finos, incluídos em minerais constituintes da rocha, em bordas adjacentes a minerais acessórios maiores, ou como material intergranular (**Ulbrich et al, 2009**).

Entre os principais minerais que hospedam urânio e tório comumente encontrados em rochas ígneas e metamórficas destacam-se apatita, titanita, allanita, zircão e monazita. De modo geral, urânio e tório são considerados elementos “resistatos” ao intemperismo químico, em virtude da sua incorporação em minerais acessórios quimicamente estáveis. Contudo, em ambientes oxidantes, o urânio pode ocorrer na forma de íons uranila (UO_2^{2+}), considerado altamente solúvel em água, tornando-o suscetível à lixiviação por soluções intersticiais. Processos de mobilização de Th ocorrem com a desagregação mecânica de minerais ricos nesse

elemento, devido a sua alta resistência ao intemperismo químico.

2.3. Aquisição e processamento de dados gamaespectrométricos.

A aquisição de dados gamaespectrométricos, seja por meio de levantamentos aerogeofísicos ou em campo, deve contemplar variáveis como cobertura superficial, densidade da vegetação, umidade do solo e do ar, além de variações topográficas. Adicionalmente, parâmetros relacionados à configuração do levantamento — incluindo a distância sensor-superfície, o espaçamento entre linhas de voo e pontos de amostragem, bem como a altitude de voo — exercem influência direta sobre a qualidade e a resolução dos dados obtidos (**Ribeiro et al., 2013**). Conforme **Minty (1997)**, a geometria das rochas, o contraste nas propriedades físicas dos materiais e as características do detector utilizado impactam significativamente o processo de aquisição dos dados.

Assim como em outras metodologias geofísicas, a interpretação dos dados gamaespectrométricos requer atenção criteriosa e a aplicação de correções específicas, que considerem a natureza dos processos de decaimento radioativo, visando a obtenção de resultados representativos e confiáveis. Entre os principais fatores a serem considerados na interpretação, de acordo com **Minty (1997)**, destacam-se:

Desequilíbrio isotópico

O desequilíbrio isotópico na série de decaimento do urânio constitui uma fonte relevante de incerteza em análises gamaespectrométricas. O equilíbrio isotópico é caracterizado pela condição em que o isótopo filho, produto do decaimento do isótopo pai, apresenta meia-vida suficientemente curta para que sua taxa de decaimento seja equivalente à taxa de produção. O equilíbrio completo é alcançado quando essa condição se verifica para todos os isótopos filhos ao longo da cadeia de decaimento. O desequilíbrio ocorre quando um ou mais isótopos filhos são removidos ou mobilizados no sistema, exigindo um tempo variável — que pode abranger desde dias até anos — para que o equilíbrio seja restabelecido. Dentre os elementos monitorados por gamaespectrometria, o tório e o potássio raramente apresentam desequilíbrio, enquanto o urânio frequentemente o manifesta. Para mitigar esse problema, a estimativa do teor de urânio baseia-se na quantificação dos isótopos ^{214}Bi , isótopo filho gerado na cadeia de decaimento do ^{238}U .

Radiação de fundo

A radiação de fundo compreende todas as fontes de radiação que não têm origem geológica direta no solo e, portanto, devem ser descontadas dos dados adquiridos para garantir a qualidade e a precisão da interpretação. Entre essas fontes, destacam-se o radônio atmosférico, a radiação cósmica e a radiação residual resultante de eventos como explosões nucleares e acidentes radioativos.

O isótopo ^{222}Rn e seus produtos de decaimento apresentam elevada mobilidade, podendo migrar para a atmosfera através de fissuras no solo e nas rochas, influenciados por variações de pressão e temperatura. Na atmosfera, os radionuclídeos ^{214}Bi e ^{214}Pb adsorvem as partículas de poeira e aerossóis, sendo dispersos pelo vento, o que pode provocar variações temporais e espaciais na radiação detectada.

A radiação cósmica primária, proveniente do Sol e de fontes extrassolares, interage com a atmosfera e com o próprio detector, contribuindo para o nível de radiação de fundo registrado. Adicionalmente, componentes da aeronave ou do equipamento utilizado em levantamentos aerogeofísicos podem conter traços de elementos radioativos, gerando interferências nas medições.

Assim, torna-se imprescindível a aplicação de modelos matemáticos específicos para a correção dessas interferências e a remoção da radiação de fundo, assegurando a confiabilidade e a representatividade dos dados gamaespectrométricos obtidos.

Interação dos raios gama com a matéria

As interações da radiação gama com a matéria envolvem processos que afetam diretamente a aquisição e interpretação dos dados gamaespectrométricos, destacando-se três mecanismos principais:

Efeito fotoelétrico: ocorre quando um fóton gama transfere integralmente sua energia para um elétron orbital do átomo, promovendo sua ejeção. Este processo predomina em baixas energias de fótons e em materiais com elevado número atômico, contribuindo significativamente para a atenuação da radiação.

Espalhamento Compton: caracteriza-se pela colisão inelástica entre um fóton gama e um elétron livre ou fracamente ligado, resultando na transferência parcial da energia do fóton para o elétron e na consequente alteração da direção e diminuição da energia do fóton. Este

processo é dominante em energias intermediárias, típicas da radiação gama terrestre.

Produção de pares: manifesta-se quando fótons com energia superior a 1,022 MeV interagem com o campo eletromagnético de um núcleo atômico, convertendo-se em um par partícula-antipartícula (elétron e pósitron). Este mecanismo predomina em altas energias, sendo relevante para fótons gama acima desse limiar energético.

Correção de sobreposição espectral

Os espectros de energia provenientes de diferentes radionuclídeos frequentemente apresentam sobreposições, o que pode resultar na superestimação das concentrações desses elementos. Dessa forma, a calibração dos espectrômetros gama é fundamental para assegurar a precisão na identificação e quantificação dos radionuclídeos nas amostras.

A calibração energética estabelece a correlação entre os canais do detector e as energias dos fótons gama, utilizando fontes padrão com energias conhecidas e bem definidas. Paralelamente, a calibração de eficiência determina a capacidade do detector em registrar fótons em diferentes faixas energéticas, sendo realizada com amostras padrão que reproduzem as características das amostras analisadas.

Adicionalmente, o monitoramento contínuo da resolução espectral é imprescindível para garantir a adequada separação dos picos de energia, enquanto técnicas de deconvolução espectral são empregadas para discriminar e corrigir a sobreposição de picos. A realização periódica desses procedimentos é essencial para assegurar a confiabilidade e a reprodutibilidade dos resultados obtidos por meio da gamaespectrometria.

Características do levantamento

Parâmetros operacionais, como a altitude de voo e o tipo de equipamento empregado, exercem influência direta na qualidade da aquisição dos dados gamaespectrométricos. A intensidade da radiação gama sofre atenuação em função do aumento da altitude devido à absorção atmosférica, o que requer a aplicação de curvas de calibração e modelos exponenciais para corrigir esse efeito em levantamentos aerogeofísicos.

No que se refere ao equipamento, o intervalo entre o registro de um pulso gama e seu processamento, denominado tempo morto, corresponde ao período em que o sistema está indisponível para registrar novos eventos. A ocorrência de múltiplos pulsos em rápida sucessão

pode resultar em perdas de contagem, levando à subestimação dos níveis reais de radioatividade, o que demanda a implementação de correções específicas durante o processamento dos dados.

Após o processamento, os dados gamaespectrométricos são convertidos em produtos cartográficos, tais como mapas de contagem total em microRöntgen $\mu\text{R/h}$, mapas das concentrações individuais de eU, eTh e K, diagramas ternários e mapas das razões entre os elementos radiométricos. Entre as principais aplicações geológicas da gamaespectrometria destacam-se a caracterização de intrusões indiferenciadas (Ulbrich et al., 2009), a prospecção mineral (Carrino et al., 2007) e a identificação de afloramentos de corpos ígneos (Ribeiro et al., 2013).

3 REVISÃO TEMÁTICA

3.1. A Faixa Ribeira e o Terreno Cabo Frio

A Faixa Ribeira constitui um sistema orogênico de direção NE, se estendendo por cerca de 1400 km ao longo da costa sul e sudeste brasileira. Ele integra um sistema orogênico maior incluso na Província Mantiqueira, sendo limitada a N pela porção meridional do Cráton São Francisco, e a S pelo Cráton de Luiz Alves (Heilbron et al., 2016). Quatro terrenos tectonoestratigráficos constituem a faixa, quais sejam: o Terreno Ocidental, Terreno Oriental, Terreno Central e Terreno Cabo Frio. Tais terrenos são limitados por falhas e zonas de cisalhamento destrais (Schmitt et al., 2004).

A área de estudo está inserida no Terreno Cabo Frio, caracterizado por possuir um embasamento ortognáissico de idade paleoproterozoicas (2.03 - 1,96 Ga) de composição granítica a granodiorítica, intercalado com uma sequência metassedimentar supracrustal de alto grau. Ele passou a integrar a faixa Ribeira em um estágio tardio da evolução tectônica (530 - 510 Ma) no episódio colisional chamado de Orogenia Búzios, caracterizado por ser o último evento orogenético brasileiro registrado na faixa. (Schmitt et al., 2004, Heilbron et al., 2016).

O embasamento da área é composto por duas unidades litológicas tectonicamente intercaladas:

- Unidade Região dos Lagos (Félsica): Dominada por metagranitoides monzograníticos, com intercalações de metaquartzo-dioritos e metatonalitos. Caracteriza-se por veios hololeucocráticos de composição variada.

- Unidade Forte de São Mateus (Máfica): Constituída por gnaisses anfibolíticos bandados e granada-anfibolitos homogêneos, ricos em granada e clinopiroxênio. Subdivide-se em anfibolito granatífero e gnaissse bandado rico em calcissilicatos.

Sobreposta a este embasamento, encontra-se uma sequência metassedimentar de alta temperatura (anfibolito alto a granulito) com espessura mínima de 500m, dividida em duas unidades com base na mineralogia metamórfica:

- Unidade Búzios: Caracterizada por cianita, é composta por gnaisses pelíticos aluminosos ricos em biotita, granada e cianita/silimanita. Apresenta intercalações com litotipos da Unidade Palmital e corpos máficos da Unidade Forte de São Mateus.
- Unidade Palmital: Definida pela ausência de cianita, é dominada por rochas metassedimentares quartzo-feldspáticas intercaladas com rochas aluminosas, calcissilicáticas e quartzitos feldspáticos. Diferencia-se pela ausência de corpos anfibolíticos ígneos.

Estudos de proveniência (**Fernandes et al., 2015**) indicam que os zircões detríticos das sequências supracrustais têm fontes predominantemente mesoproterozoicas e neoproterozoicas, com contribuições menores do Arqueano e Paleoproterozoico.

A evolução do terreno Cabo Frio também está ligada ao magmatismo, denotado pela abundância de intrusões graníticas e migmatitos na região (**Schmitt et al., 2004**). Essas rochas apresentam afinidades geoquímicas características de ambientes tectônicos compressivos e extensivos, correspondentes aos estágios iniciais e finais da orogenia Brasileira. Ocorrem também diques máficos de basalto e lamprófiros com afinidade geoquímica toleítica, cuja origem está ligada a eventos de magmatismo pós-tectônico durante a fragmentação do *Gondwana*.

3.2. Magmatismo Alcalino no Sudeste Brasileiro

Ocorrências de magmatismo alcalino são registradas na Terra desde o pré-Cambriano até os dias atuais, sendo associadas a distintos contextos tectônicos, como ambientes continentais (lineamentos e riftes), intraplaca oceânica (ilhas oceânicas) e zonas de colisão, tanto continentais quanto oceânicas (**Fagundes, 2020**). No sudeste do Brasil, destaca-se um conjunto expressivo de províncias alcalinas de idades correspondentes ao Cretáceo Superior e ao Paleoceno denominada Província Alcalina Serra do Mar (**Almeida, 1983**).

A origem do magmatismo alcalino cretáceo-paleoceno no Brasil permanece tema de debate na literatura. **Thompson et al. (1998)** e **Thomaz Filho & Rodriguez (1999)** propõem que essas ocorrências resultariam do deslocamento da Placa Litosférica Sul-Americana sobre um *hot-spot* vinculado à pluma de Trindade (**Thompson et al, 1998**). Contudo, dados geocronológicos disponíveis para unidades do MSJ indicam que não há correlação entre a progressão espacial do alinhamento e as idades atribuídas às intrusões alcalinas (**Fagundes, 2025**), enfraquecendo a hipótese de atuação do *hot-spot*.

Alternativamente, autores como **Riccomini et al. (2005)** e **Zalán & Oliveira (2005)** interpretam o magmatismo como resultado da reativação de antigos sistemas de falhas crustais, associada à evolução do Rift Continental do Sudeste do Brasil (**Riccomini, 1990**). Essa reativação teria promovido descompressão adiabática e consequente fusão parcial do manto sublitosférico, originando os magmas alcalinos (**Fagundes et al., 2025**).

A PASM é dividida em duas de acordo com o controle estrutural onde os corpos estão inseridos e variações geocronológicas, sendo elas (**Riccomini et al., 2005**):

- a) Serra do Mar Setor Norte: Constituído por maciços alcalinos distribuídos pela costa do estado de São Paulo, abrangendo também uma porção da Serra da Mantiqueira e a borda da bacia do Paraná;
- b) Alinhamento Alcalino Poços de Caldas - Cabo Frio (PCCF): Constituído por uma série de *plugs*, *stocks* e diques alcalinos alinhados com orientação W-E, se estendendo do sul do estado de Minas Gerais até o litoral do estado do Rio de Janeiro.

Os corpos alcalinos plutônicos da PCCF exibem, em sua maioria, volumes expressivos de rochas félsicas, destacando-se a ocorrência de diferentes fácies de sienito, álcali-feldspato sienito, pseudoleucita, nefelina sienito e fonolito (**Brotzu et al. 2007; Motoki et al., 2008; Mota, 2012**). Essas rochas são compostas majoritariamente por álcali-feldspatos, apresentando baixos volumes de plagioclásio e quantidades variáveis de nefelina, que usualmente é presente como mineral intersticial e minerais acessórios como piroxênios (**Brotzu et al., 2007, Mota, 2012**). Rochas máficas (ex: Hornblenda Gabro) possuem ocorrência escassa na maioria dos corpos alcalinos do PCCF, exceto no MSJ onde um volume significativo das mesmas pode ser observado (**Fagundes et al., 2025**).

3.3. O Maciço Alcalino do Morro de São João (MSJ)

O Maciço Alcalino do Morro de São João (MSJ) integra a PCCF, que abrange diversos corpos alcalinos localizados nos estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro (**Riccomini et al., 2005**). Posicionado no extremo leste do alinhamento, o MSJ representa a manifestação alcalina plutônica mais recente do alinhamento em área continental, com idade aproximada de 60,1 Ma (**Thomas Filho & Rodrigues, 1999**).

O MSJ está localizado no município de Casimiro de Abreu, no leste do estado do Rio de Janeiro. Trata-se de uma intrusão alcalina de formato circular, com cerca de 4 km de diâmetro, cujos litotipos afloram principalmente na forma de blocos e matacões de dimensões variadas. Petrologicamente, o maciço distingue-se de outros corpos do alinhamento estudado pela ocorrência significativa de rochas máficas, característica não observada em intrusões correlatas (**Mota, 2012; Fagundes et al., 2025**).

Segundo **Brotzu et al. (2007)**, o Maciço Alcalino do Morro de São João (MSJ) apresenta três grupos litológicos principais: ultramáficas, máficas e félsicas.

- **Rochas ultramáficas** – constituídas essencialmente por clinopiroxenitos, nos quais ocorrem clinopiroxênio, titanita, apatita e magnetita como fases cumuláticas, e biotita, anfibólio, álcalis-feldspato e nefelina como fases intercumuláticas.
- **Rochas máficas** – representadas por álcali-gabros, shonkinitos e melassienitos, que apresentam texturas e mineralogias distintas. Os melassienitos, por exemplo, são rochas de coloração cinza escura e granulação variável, compostas por clinopiroxênio, anfibólio, titanita, apatita e magnetita na fase cumulática, e por álcali-feldspato e nefelina na matriz intersticial, além de cristais isolados de pseudoleucita que podem atingir até 10 cm.
- **Rochas félsicas** – divididas em dois grupos principais:
 - **Álcali-sienitos**, predominantemente de granulação grossa e textura cumulática, embora variedades de granulação fina e textura hipidiomórfica também ocorram. São compostos majoritariamente por álcali-feldspatos (até 75%), com nefelina intersticial e minerais acessórios como apatita, titanita, granada e magnetita. Plagioclásio ocorre localmente, preservado como núcleo em cristais de álcali-feldspatos.

- **Nefelina-sienitos**, que apresentam textura hipidiomórfica e granulação fina a média, constituídos por álcali-feldspatos perítico (~50%), nefelina (25–35%), clinopiroxênio e anfibólio. Entre os minerais acessórios, destacam-se apatita, granada, titanita, magnetita e pseudoleucita, enquanto plagioclásio e biotita ocorrem de forma restrita.

Dados litogeoquímicos de amostras representativas dos três grupos litológicos do MSJ obtidas por **Fagundes (2020)** indicam um intervalo composicional que varia desde rochas alcalinas ultrabásicas (37,50–45,55 % em peso de SiO_2) até rochas alcalinas intermediárias (52,71–55,28 % em peso de SiO_2). Assim como em outros maciços pertencentes à PCCF, essas unidades apresentam teores elevados de potássio (K). No diagrama de classificação Total Alcalis X Sílica de **Cox et al. (1979)**, as amostras ultrabásicas se situam no campo dos ijolitos; as básicas, nos campos dos gabros e sienodioritos; e as intermediárias, nos campos dos nefelina-sienitos e sienitos (**Figura 3.1**). O índice agpático calculado para essas rochas indica caráter exclusivamente miaskítico (**Fagundes, 2020**).

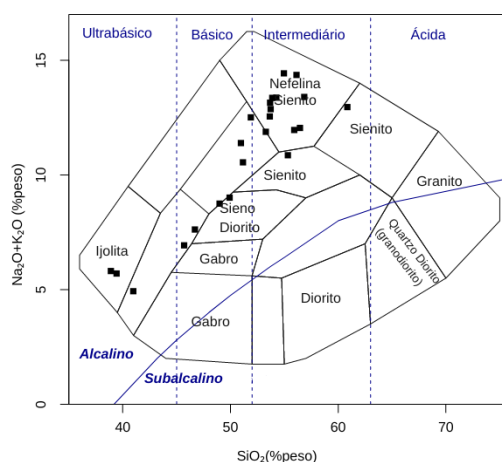


Figura 3.1: Diagrama TAS (Total Alcalis x Sílica) de classificação química de rochas de Cox *et al.* (1979) para as rochas ígneas do MSJ. A curva de discriminação das séries alcalina e subalcalina é baseada em modelo apresentados por Irvine & Barragar (1971).

A mineralogia normativa define três séries magmáticas principais (**Fagundes, 2020**): (i) saturada em sílica, com hiperstênio + olivina normativos; (ii) insaturada em sílica, com nefelina + diopsídio normativos; e (iii) insaturada em sílica, com nefelina + diopsídio + olivina normativos. A coexistência de suítes saturadas e insaturadas pode refletir distintos graus de assimilação crustal, padrão semelhante ao descrito em diques alcalinos da Serra da Mantiqueira (**Azzone et al., 2018**). Além disso, a ausência de hiatos composicionais nos diagramas de variação sugere a predominância de cristalização fracionada, possivelmente associada a

processos de assimilação crustal (AFC – *assimilation and fractional crystallization*).

Dados isotópicos de Nd e Sr obtidos por **Mota (2012)** revelam razões de $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ e $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ próximas ao reservatório EM-1, indicando uma fonte mantélica sublitosférica enriquecida. Datações $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ obtidas pelo mesmo autor situam a idade de intrusão em aproximadamente 64 Ma.

Até o presente estudo, a caracterização radiométrica do Maciço São João (MSJ) encontrada na literatura foi realizada exclusivamente baseado em dados aerogamaespectrométricos da série 1117, cedidos pelo Serviço Geológico do Brasil. A análise regional conduzida por **Sá et al. (2017)** permite a identificação do maciço, que se destaca em relação aos litotipos encaixantes em mapas de teores de potássio e contagem total. No entanto, os autores ressaltam que os valores radiométricos provavelmente são subestimados em função da densa cobertura vegetal, que atenua as contagens.

Fagundes (2024) destaca uma expressiva anomalia de potássio em toda a extensão do maciço, com concentrações mais elevadas associadas a regiões de maior altitude. Para o tório, são observadas altas concentrações na porção leste, coincidindo com áreas de baixo relevo, enquanto o urânio apresenta concentrações significativas nos setores norte, noroeste e centro-leste. A interpretação do mapa ternário permitiu a identificação de três principais assinaturas radiométricas, uma associada a elevados teores de potássio, outra vinculada a concentração conjunta dos três principais radioelementos naturais e uma terceira relacionada a baixa concentração conjunta de eU, eTh e K.

Além disso, no trabalho de **Fagundes (2024)** são apontados dois perfis gamaespectrométricos de direção N-S e E-W, que possibilitaram uma análise entre a topografia e a distribuição dos radioelementos. De modo geral, verifica-se um decréscimo nas concentrações de K, eU e eTh com a diminuição da altitude, com exceções notórias, como as altas concentrações de urânio na região norte, que ocorrem em áreas de menor elevação.

4 BASE DE DADOS

4.1. Gamaespectrometria aérea

Dados do Projeto Aerogeofísico Rio de Janeiro (Projeto 1117) foram adquiridos através do Serviço Geológico do Brasil (SGB), através de uma parceria institucional para

pesquisa científica. Esse projeto é composto de dados aerolevantados de gamaespectrometria e magnetometria no estado do Rio de Janeiro, obtidos entre os anos de 2011 e 2012. Os dados foram obtidos em linhas de voo de orientação N-S, com espaçamento de 500 m e linhas de controle de orientação E-W com espaçamento de 10 km. A altura nominal de voo foi fixada em 100 m. O equipamento utilizado para a aquisição de dados gamaespectrométricos foi um RS-500, de produção da Radiation Solutions Inc. Tal gamaespectrômetro possui um sensor equipado de cristais de iodeto de sódio ativado a tálio (NaI), com detectores *upward* e *downward*.

O banco de dados resultante do projeto é disponibilizado com correções, como por exemplo correção de tempo morto, *parallax*, altimetria e o Efeito Compton. Tais correções são efetuadas de acordo com recomendações da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 2003). Os dados corrigidos para as concentrações de K (em %peso), eU (em ppm) e eTh (em ppm) foram processados no *software* Oasis Montaj Student Version (2023.2) para gerar mapas de distribuição dos elementos radiométricos (K, eU e eTh), mapas decontagem total e também mapas interpretativos e de composição RGB ternária. Os mapas foram gerados usando o método de interpolação de curvatura mínima, com um intervalo de 125m.

Outro produto derivado dos dados de gamaespectrometria é o Fator F (Gnojek and Prichytal, 1985), que expressa o enriquecimento de K e U em relação ao Th, sendo calculado usando a equação:

$$F = (K * eU)/eTh$$

Em que F = valor do Fator F, K = concentração de potássio expressa em %peso, eU e eTh = concentrações de urânio e tório expressas em ppm, respectivamente.

4.2. Gamaespectrometria de campo

Foram realizadas duas etapas de campo distintas no MSJ, com o intuito de adquirir dados de gamaespectrometria com equipamento portátil e também coletar amostras referentes aos litotipos do maciço. As medidas adquiridas foram obtidas principalmente em trilhas pré-existent e linhas de drenagem ao longo do maciço, devido à dificuldade de acesso ao interior do maciço oriunda da declividade e da densa cobertura vegetal. Um total de 242 medidas foi realizada no maciço, tanto em áreas com presença de blocos alcalinos quanto em áreas que possuíam apenas cobertura do solo. 78 amostras representativas dos litotipos leucocráticos,

mesocráticos e melanocráticos do maciço foram coletadas para análises laboratoriais.

A primeira etapa de campo foi realizada com um gamaespectrômetro portátil RS-125 Super Spec, equipado com um detector de NaL(Tl) de 2" X 2" fabricado pela *Radiation Solutions Inc.* No total, foram coletadas 212 medidas ao longo de 187 pontos distintos, sendo que em alguns pontos com alto volume de rochas alcalinas foram realizadas mais de uma medida. A segunda etapa de campo teve como intuito adquirir dados de gamaespectrometria de pontos não acessados na primeira etapa, totalizando 30 medidas ao longo de 30 pontos. O equipamento utilizado na segunda etapa foi um gamaespectrômetro portátil RS-230 Super Spec, com detector de germanato de bismuto (BGO). Para ambas as etapas, o tempo de aquisição definido foi de 120 segundos.

Os dados adquiridos em campo foram exportados para uma tabela, que posteriormente foi tratada para definir os teores de K (%), eU (ppm) e eTh (ppm) de campo. Os dados foram processados no *software* Oasis Montaj Student Version (2023.2) para gerar mapas de distribuição dos elementos radiométricos (K, eU e eTh), mapas de radiação total emitida e também mapas interpretativos, como os de razões isotópicas e de fator F. O método de interpolação adotado para os dados de campo foi o de kriging.

Os teores de K, eU e eTh de campo foram utilizados para estimar as taxas de produção de calor radiogênico (expressa em $\mu\text{W}/\text{m}^3$), de acordo com a equação proposta por **Rybach (1986)**:

$$A = 10^{-5} \rho (9.52 CU + 2.56 CTh + 3.48 CK)$$

Em que ρ representa a densidade das rochas (kg/m^3), e CK, CU e CTh representam as concentrações de potássio, urânio e tório respectivamente.

4.3. Gamaespectrometria de laboratório

Um total de 35 amostras coletadas na etapa de campo foram selecionadas para determinação da concentração de radioelementos em laboratório. Esse total de amostras foi subdividido de acordo com o índice de cor, permitindo sua classificação em leucocráticas (compostas principalmente de nefelina e álcali-sienitos), mesocráticas (rochas híbridas caracterizadas pela interação de fases máficas e félsicas) e melanocráticas (álcali-gabros e clinopiroxenitos) (**Figura 4.1**).

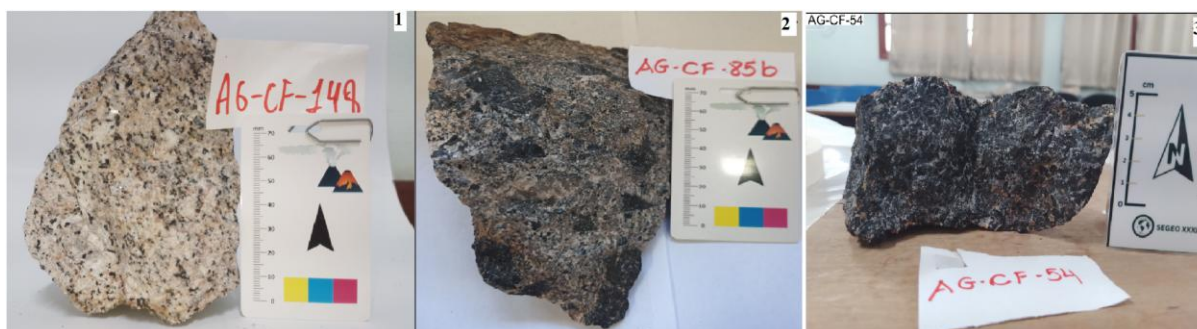


Figura 4.1: Amostras coletadas na etapa de campo no MSJ. Legenda: 1: Amostra leucocrática, félsica. 2: Amostra mesocrática, com presença de fases félsicas e máficas. 3: Amostra melanocrática, máfica.

As análises de laboratório foram realizadas no Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD), através de gamaespetrometria de alta resolução. O equipamento utilizado foi um gamaespectrômetro Canberra BE5030-2, equipado com um detector de germânio de alta pureza (HPGe). Tal equipamento permitiu determinar precisamente a contagem total e as atividades específicas do ^{40}K , ^{238}U e ^{232}Th contido nas amostras.

Para as análises, as amostras foram pulverizadas manualmente a uma granulação inferior a 200 mesh, sendo depositadas em recipientes de plástico com raio de 33,5 cm. Cada recipiente foi preenchido até alcançar uma altura mínima de 1 centímetro para garantir um volume adequado de amostra para as análises de gamaespectrometria. Previamente aos levantamentos, todas as amostras foram armazenadas por 40 dias para garantir o equilíbrio isotópico entre o ^{226}Ra e seus isótopos filhos, contidos na série de decaimento do ^{238}U . Os resultados para as concentrações de K, eU e eTh foram expressos em Bq/Kg. Fatores de conversão determinados pela IAEA (1989) foram utilizados para gerar resultados em % e ppm.

5 ARTIGO CIENTÍFICO: RADIOMETRIC CHARACTERIZATION OF THE MORRO DE SÃO JOÃO ALKALINE MASSIF, RIO DE JANEIRO, BRAZIL.

5.1. Abstract

Understanding the distribution of radiogenic elements in alkaline massifs is crucial for unravelling magmatic differentiation processes in intraplate tectonic settings. This study characterizes the spatial distribution of potassium (K), equivalent uranium (eU), and equivalent thorium (eTh) in the Morro de São João Alkaline Massif (MSJ) in Casemiro de Abreu, Rio de Janeiro, southeastern Brazil. An integrated, multi-scale approach combining airborne gamma-ray spectrometry from the Rio de Janeiro Aerogeophysical Project (1117), ground-based

surveys and laboratory analyses was used. Our main objective is to correlate radioelement concentrations with lithological variations and massif morphology, and to quantify radiogenic heat production rates for the MSJ. The results reveal a systematic geochemical control over the distribution of radioelements: felsic rocks exhibit markedly higher K–eTh–eU content and enhanced radiogenic heat production, whereas mafic rocks remain comparatively depleted in these elements. These trends reflect the concentration of incompatible elements during late-stage magmatic differentiation. This work presents the first comprehensive radiometric characterization of the MSJ, providing novel insights into the evolution of alkaline magmatism along the Poços de Caldas–Cabo Frio Alignment.

KEYWORDS: gamma-ray spectrometry, radiogenic heat, alkaline magmatism, Morro de São João Alkaline Massif.

5.2. Introduction

Brazilian alkaline magmatism has long attracted scientific interest due to its remarkable compositional diversity, complex evolutionary history, and tectonic significance (Sonoki and Garda, 1988; Gibson et al., 1997; Thomaz Filho and Rodriguez, 1999). The Poços de Caldas–Cabo Frio Alignment (PCCF) (Riccomini et al., 2005), one of its most prominent expressions, stands out as a large-scale magmatic corridor within the Ribeira Belt, extending from Minas Gerais to eastern Rio de Janeiro state. This alignment is predominantly composed of felsic intrusive bodies, mainly syenites and nepheline syenites, occurring as plugs, stocks, and dikes.

The Morro de São João Alkaline Massif (MSJ), dated at ≈ 65 Ma (Mota, 2013), is a nearly circular intrusion measuring ≈ 4 km in diameter. The site is situated in the municipality of Casimiro de Abreu, in the coastal lowlands of the state of Rio de Janeiro. Despite the genetic correlation with the PCCF, the MSJ exhibits substantial disparities from other intrusions, attributable to the volumetric significance of its mafic lithotypes and its remarkable lithological diversity. Such variability, emphasized by Brotzu et al. (2007), Mota (2013), and Fagundes et al. (2025a), renders the MSJ a pivotal natural laboratory for investigating magmatic differentiation processes and assessing the broader tectonic implications of Brazilian alkaline magmatism on the South American Platform.

Conventional lithostratigraphic mapping of the MSJ is strongly limited by dense vegetation cover and restricted accessibility, which hinders direct field observations and

sampling. In this context, high-resolution geophysical methods — particularly gamma-ray spectrometry — offer valuable alternatives, as they enable indirect inference of lithological variations through the detection of natural gamma radiation emitted by potassium (K), equivalent uranium (eU), and equivalent thorium (eTh). As demonstrated in previous studies (e.g., **Silva and Ferreira, 2021; Motoki et al., 2025**), the application of gamma-ray spectrometry has proven effective in delineating lithological boundaries, detecting compositional heterogeneities, and characterizing post-magmatic overprints such as hydrothermal alteration, in intrusive and volcanic alkaline complexes (**Ribeiro et al., 2013; Silva and Ferreira, 2021**).

The MSJ has demonstrated the capacity for enhanced refinement of prevailing models of its internal architecture and magmatic evolution through the integration of gamma spectrometric data. In addition to lithological discrimination, gamma spectrometry facilitates the quantification of radiogenic heat production (RHP) from K, eTh, and eU abundances (**Rybach, 1986; IAEA, 2003**), offering insights into thermal anomalies and their petrogenetic significance.

This study presents the initial integrated, multi-scale radiometric characterization of the MSJ, combining airborne surveys, ground-based measurements, and laboratory analyses. Specifically, the concentrations of K, eTh, and eU across the main lithotypes are determined, their spatial distribution is mapped, and their relationship with the existing lithological framework is evaluated. Finally, the implications of these results for the evolution of Brazilian alkaline magmatism are discussed, with particular emphasis on the role of radiogenic heat production in controlling the thermal regime of intraplate magmatic systems.

5.3. Simplified Geological Context of the Morro de São João Alkaline Massif

The South American Platform is host to a considerable number of alkaline magmatism occurrences, which are associated with the Gondwana break-up and the South Atlantic Ocean opening (**Sonoki and Garda, 1988; Thompson et al., 1998; Thomaz Filho and Rodriguez, 1999; Riccomini et al., 2005**). A notable feature within this context is the Poços de Caldas–Cabo Frio Alkaline Alignment (PCCF), which extends from the southern part of the state of Minas Gerais to the state of Rio de Janeiro (**Riccomini et al., 2005**).

The focus of this study is the MSJ, a circular intrusion belonging to the PCCF with a diameter of approximately 4 km, located in the city of Casimiro de Abreu, Rio de Janeiro,

Brazil (**Marins, 2012; Mota, 2013; Fagundes, 2020**) (Figure 1). The MSJ intrudes the gneissic basement of the Cabo Frio Terrane (Ribeira Belt) (**Heilbron et al., 2016**), and is surrounded by Quaternary alluvial deposits. The massif constitutes a high-elevation topographic feature, with a maximum height of 728 meters. In contrast to other massifs classified within the PCCF, the MSJ's rocks are exposed as metric-scale boulders and talus deposits, exhibiting an absence of conventional alkaline outcrops (**Fagundes et al., 2025b**).

As demonstrated in the works of **Brotzu et al. (2007)** and **Fagundes et al. (2025b)**, macroscopic and microscopic petrographic analyses indicate that the MSJ is composed of rocks of various mineralogical classifications, including ultramafic, mafic, and felsic rocks. Illustrative examples of these rock types include alkali gabbros and nepheline syenites. The MSJ distinguishes itself from other alkaline bodies within the PCCF, given its substantial presence of mafic rocks, a characteristic that is absent in other alkaline bodies within the province (**Fagundes et al., 2025b**).

The ultramafic rocks are predominantly composed of biotite-rich clinopyroxenes, while the mafic rocks comprise alkali-gabbros and melasyenites with high nepheline content. The felsic lithotypes described by **Brotzu et al. (2007)** include syenites that are rich in alkaline feldspars and nepheline, with accessory apatite, titanite, and pseudo-leucite.

Geochemical analysis of nepheline syenite samples from the MSJ has revealed a silica-undersaturated alkaline series, indicating a progressive increase in alkali content with magmatic evolution (**Fagundes et al., 2025b**). The results of the isotopic analysis of $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios, as reported by **Mota (2012)** for the MSJ rocks, indicate that the origin of these rocks is related to the sublithospheric mantle, from a reservoir enriched with low values of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ values. Ar-Ar dates provide an age of 64 Ma for the massif.

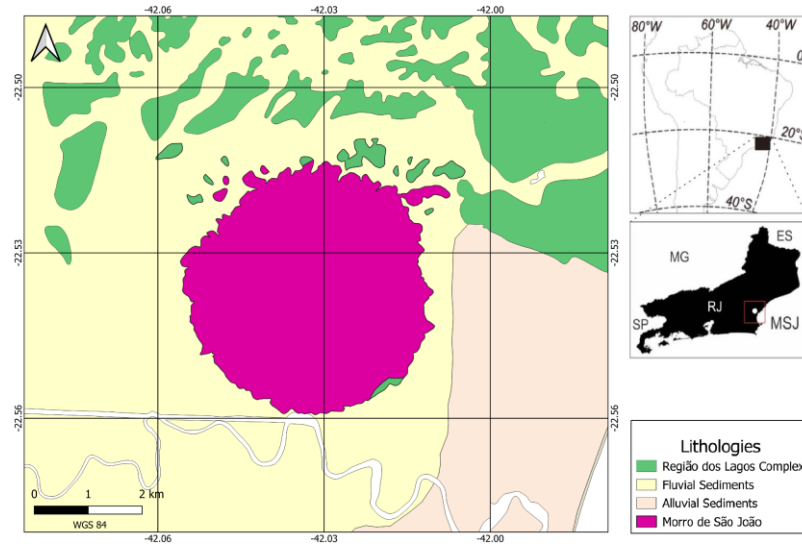


Figure 5.1: Lithological map of the Morro de São João Alkaline Massif, Casimiro de Abreu, RJ, Brazil. Modified from Heilbron et al. (2016) and Fagundes et al. (2025b).

5.4. Geophysical Dataset and Methodology

5.4.1. Airborne Gamma-Ray Spectrometry

Airborne geophysical data from the Rio de Janeiro Aerogeophysical Project (Project 1117) were acquired from the Geological Survey of Brazil (SBG/CPRM) under an institutional agreement for academic purposes. The survey, conducted between 2011 and 2012, comprises high-resolution airborne gamma-ray spectrometry and magnetometry datasets covering the state of Rio de Janeiro, southeastern Brazil. The data were collected using NS flight lines, which were spaced 500 m apart, and control lines with an E-W orientation, which were spaced 10 km apart. The nominal flight altitude was set at 100 m. According to the descriptive report, the acquisition of gamma spectrometry data was conducted using an RS-500 gamma spectrometer from Radiation Solutions Inc., which was equipped with sodium iodide (NaI) crystals, both downward and upward-looking detectors. The measurements were performed at regular intervals of one second, corresponding to approximately 75 meters on the ground.

The acquired dataset had undergone preliminary processing prior to the commencement of this study, including corrections for dead time, parallax, altimetry, and the Compton effect. The processing was carried out in accordance with the recommendations of the IAEA (2003), with a view to minimizing variations in the measured natural gamma radiation.

The data was processed in the Oasis Montaj Software (Version 2025.1) with minimum

curvature interpolation method, adopting a spatial resolution of 125 m (1/4 of the distance between flight lines). The interpolation procedure created regular grid results representing K (%), eTh (ppm) and eU (ppm), and the combination of these grids was used to obtain the RGB-Ternary Image. More details about the minimum curvature interpolation method applied to airborne gamma-ray analysis are discussed in **Briggs (1974)** and **IAEA (2003)**.

The F parameter (Gnojek and Prichystal, 1985), used to accentuate the enrichment of potassium and uranium relative to thorium, was calculated using Equation 2:

$$F = (K * eU)/eTh$$

where F = F parameter value; K = K content expressed in %; eU = eU content expressed in ppm; eTh = eTh content expressed in ppm.

5.4.2. Gamma Ray Spectrometry at Ground and Lab scale

Ground gamma-ray spectrometric measurements were conducted along predefined survey trails across the massif, independent of outcrop availability. A total of 242 measurement stations were established, and 78 representative samples of the exposed igneous lithotypes were systematically collected for laboratory analysis.

Initial ground gamma-ray measurements were acquired using the portable RS-125 Super-Spec spectrometer (Radiation Solutions Inc.), equipped with a 2" × 2" NaI(Tl) scintillation detector. The instrument was factory-calibrated for the purpose of determining equivalent uranium (eU), equivalent thorium (eTh), and potassium (K) concentrations. This was achieved by using International Atomic Energy Agency (**IAEA, 2003**) certified reference standards.

In a subsequent survey, an RS-230 Super-Spec spectrometer with a bismuth germanate (BGO) detector was employed to extend the spatial coverage to areas not included in the first campaign. The sampling interval was set at 120 seconds per point for both datasets.

The results of the radiometric measurements are expressed in terms of % weight for K, parts per million (ppm) for eU and eTh. At each site, at least one measurement was taken, with additional measurements recorded at locations exhibiting a high prevalence of alkaline occurrences. The Oasis Montaj software (version 2025.1) was used to process the ground data with kriging interpolation method with a spatial resolution of 80 m (**IAEA, 2003**). The

interpolation generated grids representing ground (%), eU (ppm) and eTh (ppm) contents. These grids were used to generate other interpretative grids, such as radiogenic elements ratio, F parameter and radiogenic heat production and flow.

A total of 35 samples were selected and prepared for laboratory gamma spectrometry analysis. The lithotypes were grouped based on their colour index, with the leucocratic group comprising primarily nepheline syenites and alkali feldspar syenites. The melanocratic group is constituted by hybrid rocks (melasyenites) that have been formed by the interaction between felsic and mafic magmatic phases.

The quantification of K, eTh, and eU concentrations in MSJ rock samples was conducted at the Institute of Radiation Protection and Dosimetry (IRD) through the utilization of high-resolution gamma spectrometry. Analyses were conducted with a Canberra BE5030-2 gamma-ray spectrometer equipped with a high-purity germanium (HPGe) detector. This configuration enabled precise measurement of total gamma activity and the specific activities of ^{40}K , ^{238}U , and ^{232}Th .

Rock samples were pulverized to a grain size finer than 200 mesh and subsequently packed into circular polyethylene containers with a radius of 33.5 mm. Each container was filled to a minimum height of 1 cm to ensure adequate sample volume for gamma spectrometric analysis. The filled containers were weighed to determine the bulk density of each sample. In order to facilitate secular equilibrium between ^{226}Ra and its daughter isotopes within the ^{238}U decay series, all samples were hermetically sealed and stored for a period of 40 days prior to analysis.

The abundances of ^{40}K are measured directly from the decay of the isotope in the 1.46 MeV window. However, the measurement of the isotopes ^{232}Th and ^{238}U is not directly quantifiable. The occurrence of disparate emission peaks is indicative of the presence of ^{226}Ra (product of the ^{238}U decay series, 1.76 MeV) and ^{228}Ra (product of the ^{232}Th decay series, 2.614 MeV), which are used to estimate Th and U concentrations. Therefore, the concentrations of Th and U are typically expressed in units of ppm: eTh and eU, respectively.

The laboratory gamma spectrometry analysis generated results expressed in Bq/Kg. These were then converted to K, eTh and eU concentrations using the conversion factors determined by **IAEA (1989)**. The concentration data for MSJ rocks of the elements eU, eTh and K, obtained from both ground measurements and laboratory analysis, were used to estimate

the radiogenic heat production ($\mu\text{W}/\text{m}^3$). This estimation was made possible by the equation proposed by **Rybach (1986)**:

$$A=10^{-5} \rho (9.52 C_U + 2.56 C_{Th} + 3.48 C_K)$$

where ρ represents rock density (in kg/m^3), and K, T, and U represent the concentrations of K, eTh, and eU, respectively.

5.5. Results and Discussion

5.5.1. Radiometric Characterization of the MSJ

5.5.1.1. Regional Characterization

The utilization of airborne gamma-ray spectrometric data was instrumental in the characterization of the regional distribution of natural gamma radiation and the spatial variability of radiometric elements. The data presented in **figure 5.2** illustrate the concentration of potassium (% weight), the uranium and thorium content (ppm), and the total radiogenic count (cps).

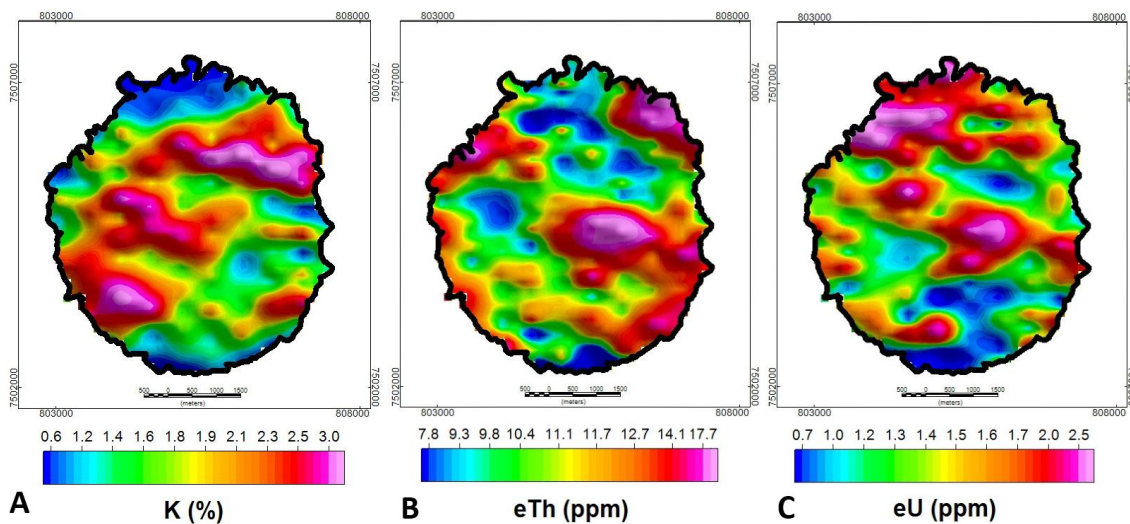


Figure 5.2: Airborne data total count and radiogenic element distribution maps. (A) K distribution map; (C) eTh distribution map; (D) eU distribution map. The black line delineates the massif limits.

As demonstrated in **Figure 5.2C**, the northwestern and central sectors of the massif have been recorded as having the highest eTh concentrations, with values reaching up to 21 ppm. Elevated levels of eTh have also been observed in the western and southeastern sectors, with local concentrations reaching 14 ppm. The eU distribution pattern (**Figure 5.2D**) indicates

that the greatest concentrations, approximately 3 ppm, are localized within the northern, northwestern, and central portions of the massif.

The spatial distribution of radioelements is controlled by a combination of geological and geomorphological factors, including bulk chemical composition, terrain morphology, and structural framework (**Minty, 1997; Ulbrich et al., 2009; Ferreira et al., 2014**). In addition to these factors, weathering exerts a significant influence due to its capacity to remobilize elements through both chemical leaching and mechanical disintegration of their host minerals. Among the radioelements, potassium exhibits the highest susceptibility to weathering processes, being readily leached from rocks enriched in the element. The process under discussion leads to the alteration of potassium feldspars into kaolinite and other secondary clay minerals (**Wilford, 2012**). Uranium is typically regarded as being resistant to chemical alteration under reducing conditions; however, it has been observed to become highly mobile when subjected to oxidizing environments (**Ulbrich et al., 2009**).

In the MSJ, alkaline lithologies manifest as metric-sized boulders exhibiting variable morphologies. The presence of boulders of varying dimensions is attributed to the high mechanical and chemical weathering resistance attributed to syenites. This phenomenon has been documented in the Mendanha Alkaline Massif (MEN) (**Motoki et al., 2008**).

The durability of nepheline syenites is primarily determined by the extent of chemical alteration of K-bearing minerals (e.g., alkali feldspar) into clay minerals. The process of mineral decomposition also releases silicon, which reacts with clay minerals to form a superficial impermeable layer. This layer has been shown to impede the percolation of meteoric water into the rock mass, thereby constraining the progression of deeper weathering processes (**Motoki et al., 2008**).

An analogous weathering mechanism operates within the alkaline bodies of the MSJ, ultimately producing meter-scale boulders with ellipsoidal, prismatic, and irregular morphologies. As these blocks remain largely in situ with insignificant displacement, elevated K–eTh–eU concentrations are observed both at lower, medium, and higher elevations of the massif (**Figure 5.3**).

Radiometric profiles provide a means to correlate K–eTh–eU activity with the massif's morphology and elevation (**Figure 5.4**). At the highest elevation, radioelement concentrations show a marked decrease, while K and eU concentrations present an abrupt

decrease in the massif border. This reduction reflects the broad sampling footprint of airborne surveys, which incorporates surrounding lithologies and thus contrasts with the gamma-spectrometry signature of the MSJ.

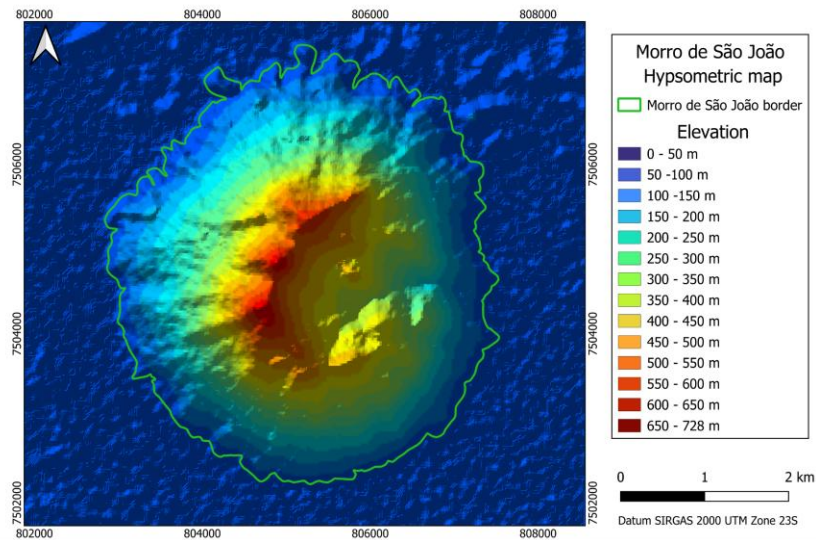


Figure 5.3: Hypsometric map of the Morro de São João Alkaline Massif.

The RGB-ternary concentration map reveals zones with comparatively elevated concentrations of K, eTh, and eU (illustrated by the white tonalities) within the central sector of the MSJ (**Figure 5.5A**), as well as along its northeastern and western margins. The F parameter, calculated for the MSJ, reinforces the potassium-enriched radiometric signature of the massif (**Figure 5.5B**), corroborating the observations previously reported by **Sá et al. (2017)**.

K-means clustering is a widely applied unsupervised classification algorithm in which the number of clusters is defined a priori. The method partitions data by minimizing the distance between each observation and its corresponding cluster centroid, thereby enabling the identification of patterns and similarities within multivariate datasets. Its application to aerogeophysical radiometric data has been extensively documented in the literature (**de Lima and Marfurt, 2018; Weihermann et al., 2021; Bastos et al., 2023**).

For the present dataset, the silhouette coefficient indicates that three clusters represent the optimal partition. K-means clustering was implemented in QGIS software (version 3.40), with a maximum of 10 iterations (**Figure 5.5 C**). Descriptive statistics for K, eTh, and eU concentrations within each cluster are summarized in **Table 5.1**.

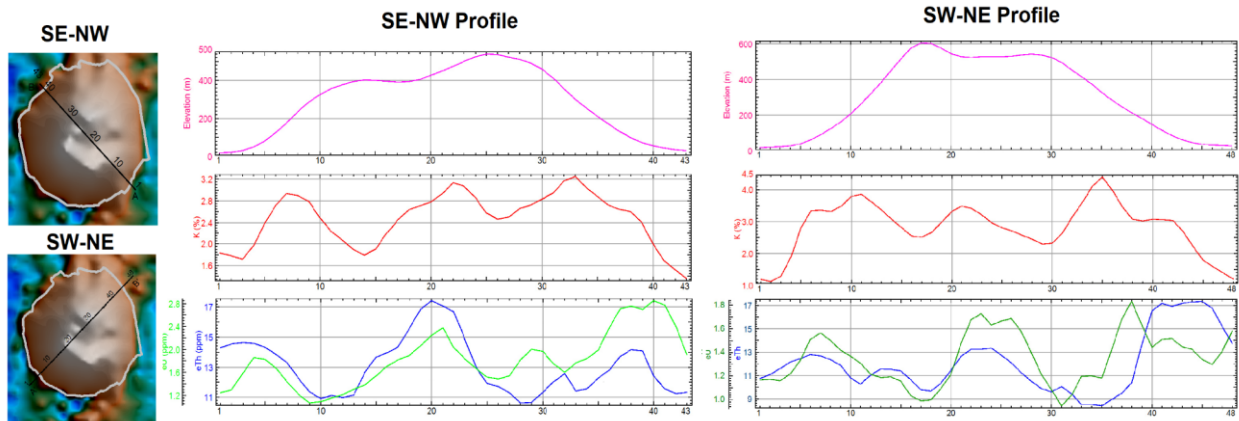


Figure 5.4: Geographical profiles traced in the study area, indicating the main variations in: (a) elevation (pink line); (b) potassium (red line); (c) thorium (blue line) and uranium (green line) along the SE-NW and SW-NE axes.

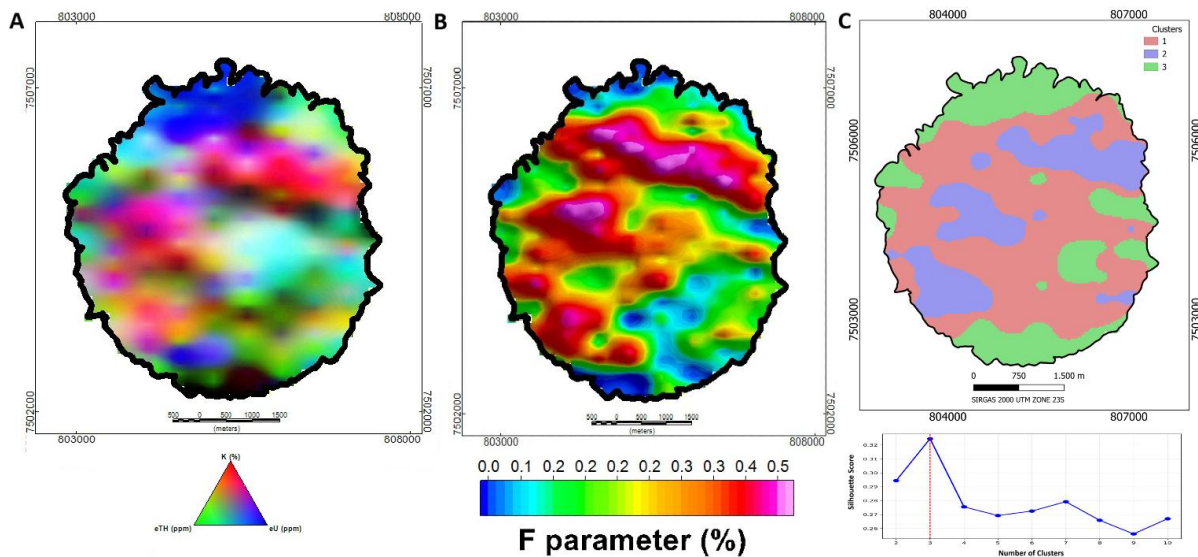


Figure 5.5: Interpretative radiogenic maps of the MSJ obtained by airborne gamma spectrometry: (A) RGB-ternary concentration; (B) distribution of F parameter; (C) Results of the K-means clustering and corresponding silhouette coefficient used to assess cluster separation.

Table 5.1: Statistical synthesis of K, eTh and eU concentrations for the three clusters obtained from the K-means classification. eU denotes equivalent uranium (ppm); eTh denotes equivalent thorium (ppm); and K denotes potassium (%). σ is used to denote standard deviation.

Group	Statistic	K	eU	eTh
Cluster 1	Max	2.92	3.41	22.00
	Min	2.06	0.37	4.50
	Mean	2.47	1.55	12.20
	σ	0.23	0.46	2.53
Cluster 2	Max	5.51	2.93	18.74
	Min	2.92	0.58	7.04
	Mean	3.37	1.51	11.04
	σ	0.38	0.32	1.92
Cluster 3	Max	2.06	3.46	20.39
	Min	0.49	0.01	4.41
	Mean	1.65	1.65	10.98
	σ	0.33	0.61	2.50

5.5.1.2. Local Characterization

Ground radiometric surveys were predominantly conducted along accessible pathways, including trails and drainage channels, due to the restrictive dense vegetation limiting direct access to the massif's interior. The mean concentrations of radioelements obtained by ground measurements are thus established as 2.08% for K, 15.31 ppm for eTh, and 2.26 ppm for eU (**Table 5.2**).

The distribution maps of ground-measured concentrations of K, eTh, and eU are presented in **Figure 5.6**. Ground gamma spectrometry reveals consistently elevated K

concentrations across the massif, with a localized low-K anomaly extending from the central area toward its northern sector (**Figure 5.6A**). In agreement with airborne data, the relatively high K values recorded in ground measurements highlight the alkaline nature and mineralogical composition of the massif rocks.

Table 5.2: Statistical synthesis of K, eTh, and eU obtained by in situ measurements. K: potassium (%); eTh: equivalent thorium (ppm); eU: equivalent uranium (ppm). σ = standard deviation.

Statistic	K (%)	eTh (ppm)	eU(ppm)
Max	10.20	32.50	6.40
Min	0.10	4.80	0.10
Mean	2.08	15.31	2.26
ρ	1.46	4.18	1.34

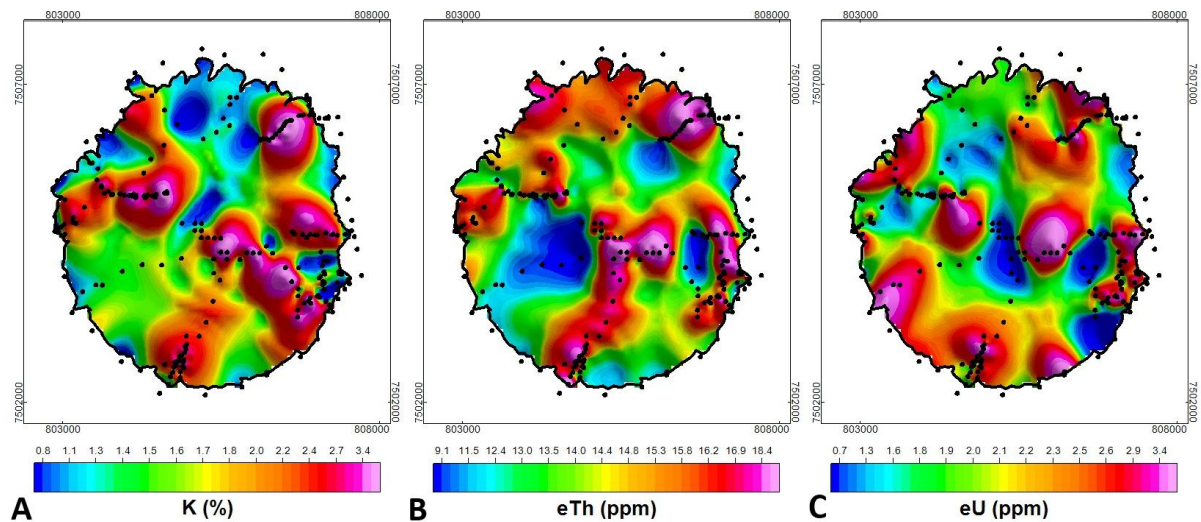


Figure 5.6: Ground radiogenic element distribution maps: (A) K distribution map; (B) eTh distribution map and (C) eU distribution map. The black line represents the massif limits, and the dots represent ground measurement points.

A comparison of the eTh maps reveals elevated concentrations extending from the central region of the massif towards the southwestern sector, as delineated by ground-based measurements (**Figure 5.6B**). A remarkable discrepancy is evident at the northern margin, where airborne data indicate medium to low concentrations, while ground measurements register higher values. Despite the aforementioned inconsistencies, both datasets are broadly concordant in delineating zones of eTh enrichment in the central region, and the eastern, northeastern, and western margins of the massif.

Concerning eU distribution, a marked discrepancy is observed along the northern sector of the massif: ground gamma spectrometric measurements indicate low to moderate eU concentrations, whereas airborne radiometric data reveal elevated concentrations in the same sector (**Figure 5.6C**). A comparable inconsistency is apparent along the southern margin, where airborne surveys delineate low eU contents, contrasting with medium to high concentrations recorded in ground-based measurements. Despite these divergences, both datasets consistently indicate elevated eU content within the central portion of the massif.

The discrepancies observed between K–eTh–eU maps obtained from aerial and ground-based spectrometers can be attributed to the disparity in spatial resolution. The ground-based spectrometers, with their superior resolution and proximity to the source, are capable of detecting localized geophysical variations that are often spatially averaged or attenuated in airborne datasets.

Ratio maps derived from the individual radioelement concentrations (eU/K and eTh/K, **Figure 5.7A and 5.7B**) provide valuable insights into the geochemical variability within igneous complexes. Despite being products of the same magmatic event, intrusive bodies commonly exhibit heterogeneous distributions of radiometric elements due to differential partitioning behaviours during magmatic differentiation and crystallization processes. It is evident (**Ribeiro et al., 2013**) that these ratio maps are effective tools for delineating lithological variations and geochemical zoning across the massif. Moreover, the F parameter obtained by ground gamma spectrometry, calculated to reflect the relative enrichment of K and eU concerning eTh, functions as a complementary discriminator for differentiating lithological domains (**Figure 5.7C**)

The integration of data obtained by the radiometric distribution maps — including K, eTh and eU concentrations, F parameter, and isotopic ratios in both airborne and ground gamma spectrometry — with detailed field mapping facilitated the interpretation of the geological framework represented in **Figure 5.8**. This approach facilitated the delineation of domains characterized by contrasting radiometric signatures, enabling the classification of the mapped units into two primary lithotypes:

- **Alkali/Nepheline Syenite:** this lithological unit represents the leucocratic end-member of the MSJ and comprises nepheline syenites and alkali syenites. These rocks occur as intrusive bodies of variable dimensions, morphology, and mineralogical composition.

Their mineralogy is dominated by alkali feldspars and nepheline as the main felsic phases (**Figure 5.9A**).

- **Hybrid rocks:** this group includes the mesocratic and melanocratic lithotypes of the MSJ, notably melasyenites and alkali gabbros occurring as microgranular enclaves within a syenitic matrix. Their textural and compositional characteristics indicate hybridization processes, likely associated with magma mingling or mixing during emplacement (**Figure 5.9B**).

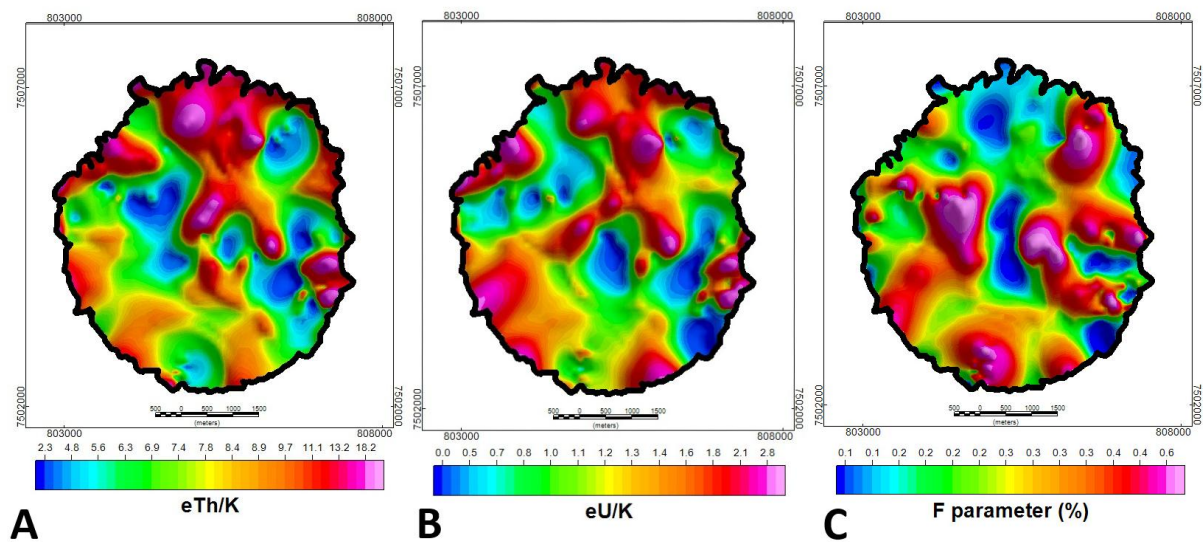


Figure 5.7: Isotopic ratios (A and B) and F parameter (C) distribution map for ground gamma spectrometry. The black line represents the massif limits.

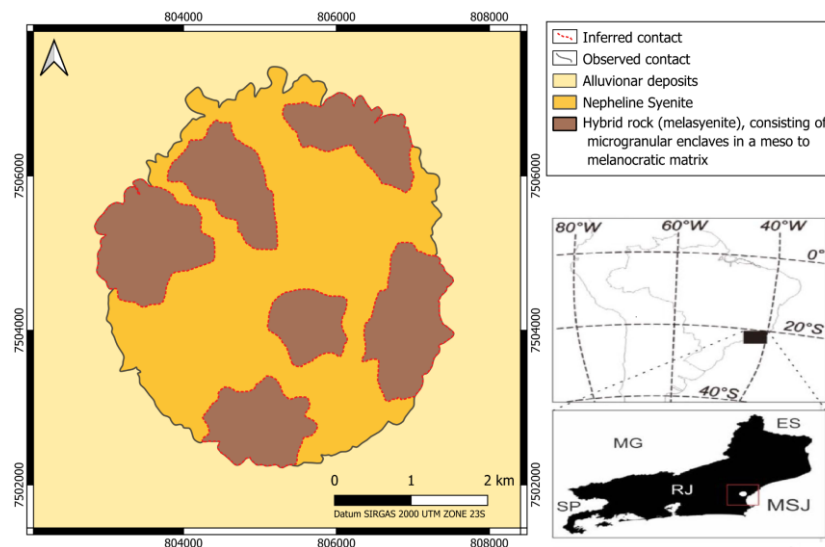


Figure 5.8: Geological map of the MSJ, inferred from the integration of multi-scale gamma spectrometry data and field interpretations.

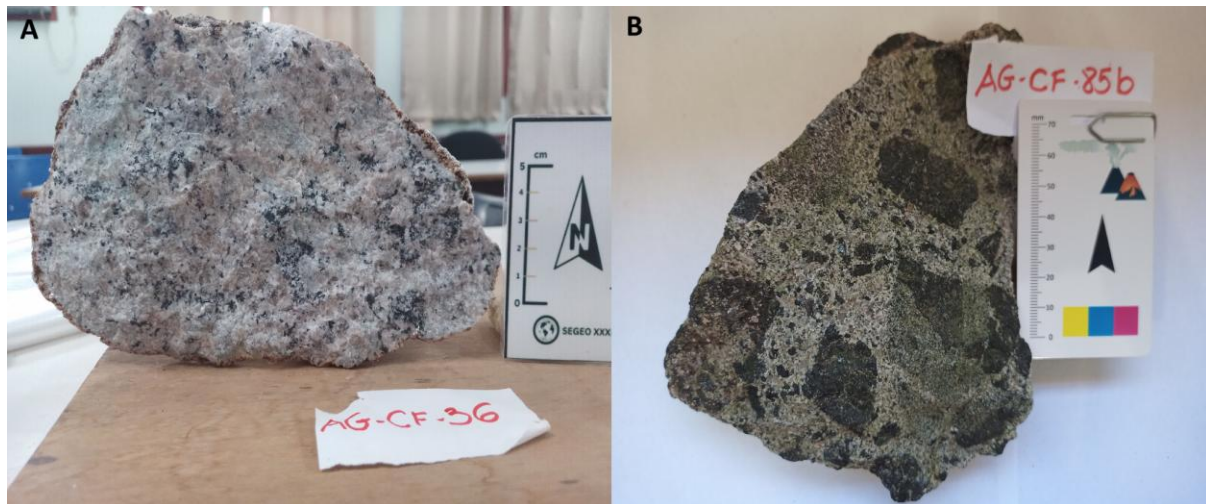


Figure 5.9: Examples of MSJ samples classified as nephelyne sienites (A) and hybrid rocks (B).

5.5.1.3. Laboratory Radiometric Analysis

The analysis of 35 samples from MSJ in a laboratory setting using gamma spectrometry enabled the ascertainment of the radiogenic elemental composition. The mean concentrations obtained were 4.91% for K, 10.38 ppm for eTh and 2.30 ppm for eU (**Table 5.3**).

Table 5.4 summarizes the concentrations of K, eU, and eTh in samples, grouped according to the colour index. Nepheline syenites and alkali syenites are classified as leucocratic due to their high proportion of felsic minerals. In contrast, alkali gabbros are classified as melanocratic. The mesocratic classification is applied to rocks that exhibit evidence of interaction between syenitic and gabbroic magmas, a result of magmatic mixing processes within the MSJ (**Figure 5.9B**) (**Fagundes et al., 2025a**).

The potassium content displays a systematic decrease in accordance with the increasing content of mafic minerals. The average values are as follows: 6.35% in leucocratic rocks ($n = 15$ samples), 4.24% in mesocratic rocks ($n = 13$ samples), and 3.06% in melanocratic varieties ($n = 7$ samples) (**Figure 5.10A**).

eTh concentrations demonstrate a similar trend, with mesocratic and leucocratic samples exhibiting mean values of 10.57 ppm. In contrast, eU concentrations tend to decrease in conjunction with diminishing felsic mineral content; nonetheless, melanocratic samples

exhibit a slightly higher mean value (2.03 ppm) compared to mesocratic ones (1.98 ppm). Overall, the K–eTh–eU contents of each lithotype align with the distribution pattern observed in **Dickson and Scott (1997)**, with felsic rocks (silica-enriched) presenting higher contents than mafic rocks (silica-depleted).

The MSJ petrogenesis is linked to the sequential melting of a heterogeneous mantle source, generating multiple magma batches (**Fagundes et al., 2025a**). Variations in textures and mineral assemblages within differentiated alkaline rocks are evidence of open-system processes, such as crustal assimilation and magma mixing (**Fagundes et al., 2025b**). These are interpreted as key processes in the magmatic evolution of the massif. K–eTh–eU average contents observed in mesocratic rocks can be interpreted as a result of mafic (depleted) and felsic (enriched) members interaction, generating contents that are interpreted as the mean values between the felsic and mafic rocks.

Table 5.3: A statistical synthesis of K, eTh and eU obtained by means of laboratory gamma spectrometry analysis in 35 samples from the MSJ. eU denotes equivalent uranium (ppm); eTh denotes equivalent thorium (ppm) and K denotes potassium (%). The σ is used to denote standard deviation.

Statistic	K (%)	eTh (ppm)	eU(ppm)
Max	10.95	33.32	7.30
Min	0.08	0.49	0.09
Mean	4.91	10.38	2.30
ρ	2.82	6.29	1.56

Table 5.4: A statistical synthesis of K, eTh and eU obtained by means of laboratory gamma spectrometry analysis in 35 samples from the MSJ. eU denotes equivalent uranium (ppm); eTh denotes equivalent thorium (ppm) and K denotes potassium (%). The samples were then grouped according to their colour index. The σ denotes by standard deviation of a set of data.

Group	Statistic	K	eU	eTh
Leucocratic	Max	10.95	7.30	33.32
	Min	0.35	0.11	0.49
	Mean	6.34	2.70	10.57
	ρ	2.92	1.90	7.99
Mesocratic	Max	8.93	4.79	18.92
	Min	0.08	0.09	0.88

	Mean	4.24	1.98	10.57
	ρ	2.71	1.39	5.91
Melanocratic	Max	3.86	3.44	13.18
	Min	2.19	1.27	7.74
	Mean	3.06	2.03	9.60
	ρ	0.54	0.94	2.16

5.5.1.4. Comparison between Airborne, Ground and laboratory gamma ray spectrometry

Concentrations of K, eU, and eTh vary significantly across the three investigation scales (**Figure 5.10B**). For K, the maximum value from ground gamma spectrometry (10.95%) is 119% higher than the maximum from aerial surveys (5.00%) and 7% higher than the maximum from laboratory analyses (10.20%). However, the opposite trend is observed for average values: laboratory analyses yield the highest mean (4.91%), followed by ground surveys (2.08%) and aerial surveys (1.85%). These discrepancies may reflect the high geochemical mobility of potassium in surface environments, as well as the broader spatial averaging inherent in aerial surveys.

For eU, maximum laboratory concentrations (7.30 ppm) exceed aerial maximum by 113% (3.42 ppm) and ground maximum by 14% (6.40 ppm). Average eU contents follow the same order: laboratory (2.30 ppm) > ground (2.26 ppm) > aerial (1.30 ppm). The lower aerial values are likely due to atmospheric and vegetative attenuation of the gamma-ray signal.

For eTh, maximum ground (32.50 ppm) and laboratory values (33.32 ppm) are comparable, whereas aerial maximum values are notably lower (21.81 ppm). In contrast, average eTh is highest in ground surveys (15.32 ppm), exceeding aerial (11.66 ppm) and laboratory (10.38 ppm) averages by 33% and 47%, respectively. eTh is the only element for which laboratory averages are lower than those from airborne measurements.

In summary, laboratory gamma spectrometry generally records the highest concentrations of K and eU, reflecting the analysis of selected, representative samples. Ground surveys yield intermediate averages, while aerial surveys systematically return the lowest values for K and eU, consistent with signal attenuation and the larger effective sampling

footprint of airborne methods. eTh shows lower average values for laboratory analysis, in contrast with K and eU.

The correlation coefficients calculated between the datasets were low for all elements ($-0.32 < r < 0.13$; **Table 5.5**), indicating the absence of any significant linear relationship between the acquisition scales. Correlations between airborne and ground measurements ranged from -0.10 to $+0.01$, while ground and laboratory data also showed weak values ($-0.19 < r < 0.09$). The comparison between airborne and laboratory datasets exhibited the largest deviations ($-0.32 < r < 0.13$). These results reflect the strong differences in sampling footprint among the methods, the atmospheric attenuation affecting airborne gamma-ray surveys, and the intrinsic spatial heterogeneity of radiogenic elements. Consequently, the datasets do not show point-to-point linear correspondence, which is expected given the multiscale nature of the measurements and the characteristics of each acquisition technique.

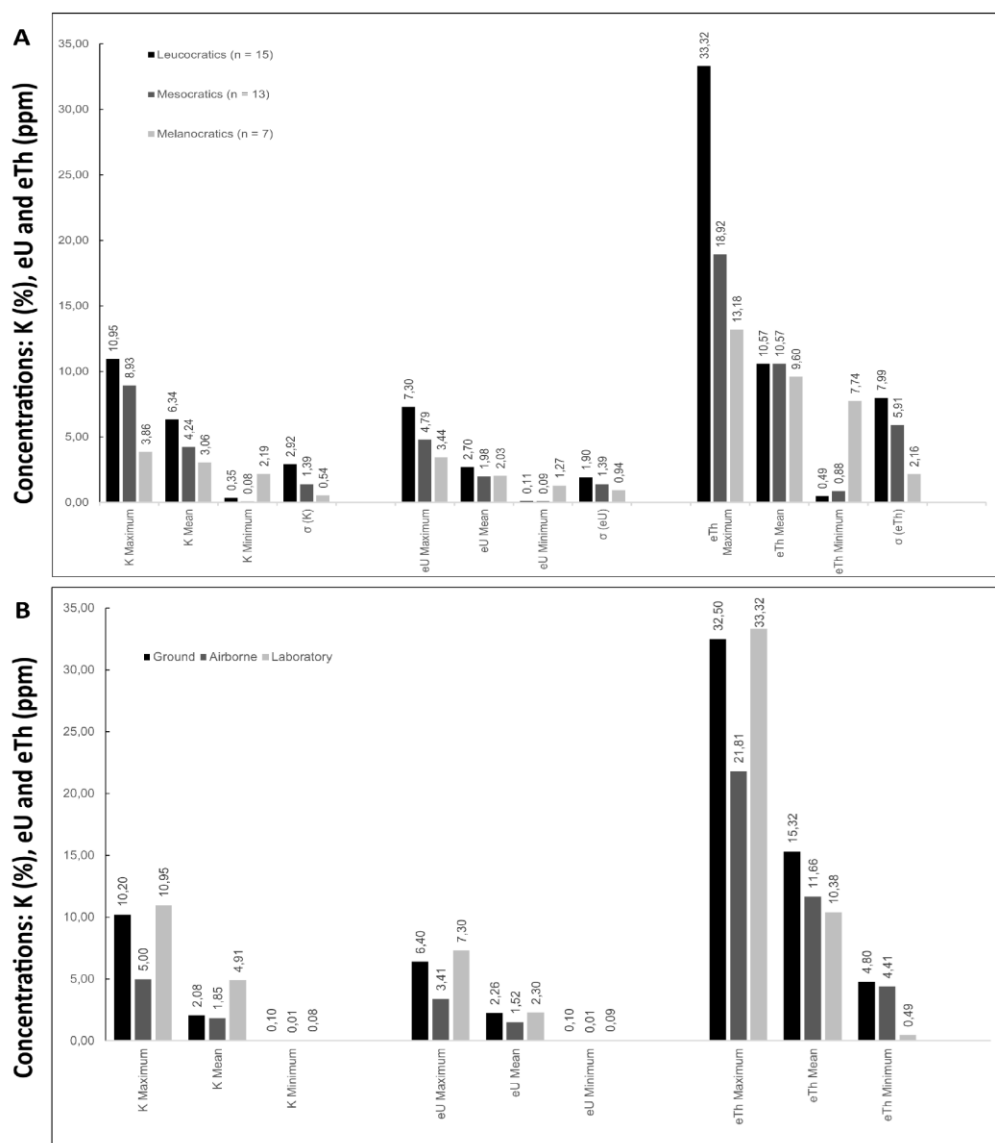


Figure 5.10: Maximum, mean, minimum and standard deviation values K, eTh and eU contents obtained by means of laboratory gamma spectrometry analysis in 35 samples from the MSJ (A) and maximum, mean and minimum values of K, eTh and eU regarding airborne, ground and laboratory gamma ray measurements (B). σ is used to denote standard deviation, n represents the number of samples.

Table 5.5: Correlation coefficients (r) between airborne (Air), ground and laboratory (Lab) methods for K, eTh, and eU.

	Air X Ground	Ground X Lab	Air X Lab
K	-0.098	-0.194	-0.123
eTh	0.009	-0.152	-0.323
eU	-0.095	0.093	0.129

5.5.2. Radiogenic heat analysis

5.5.2.1. Radiogenic heat production

The radiogenic heat producing (RHP) elements content (K-Th-U), as determined by ground measurements and laboratory analysis, was used to calculate the heat production emitted by the nuclear disintegration of these samples. The RHP used is described in **Rybach (1986)**, employing the radiometric elemental compositions and densities obtained for each sample. The density obtained for the MSJ samples increases with the mafic mineral index, with the melanocratic group showing the highest mean density (approximately 2.6 g/cm^3). The results were separated according to the sample colour index and are displayed in **Table 5.6**.

The mean RHP rate for leucocratic rocks is $1.70 \text{ } (\mu\text{W/m}^3)$, which is higher than the mean rate for mesocratic ($1.50 \text{ } \mu\text{W/m}^3$) and melanocratic rocks ($1.28 \text{ } \mu\text{W/m}^3$). This phenomenon can be interpreted as indicative of the progressive enrichment of incompatible elements, particularly K, Th and U, within more evolved lithotypes. The observed correlation between RHP and lithological composition lends support to a petrogenetic framework within which radiogenic heat generation is positively associated with increasing silica and alkali content (**Hasterok and Webb, 2017**). The following essay will provide a comprehensive overview of the relevant literature on the subject.

Table 5.6: A statistical synthesis of radiogenic heat ($\mu\text{W/m}^3$) production and mean density (g/Cm^3) obtained by means of laboratory gamma spectrometry data, which had been grouped according to the samples colour index. The σ denotes the standard deviation.

Statistic	Leucocratic	Mesocratic	Melanocratic
n	15	13	7
Max	3.58	2.65	1.85
Min	0.13	0.11	0.98
Mean	1.70	1.50	1.28
σ	0.83	0.80	0.29
Mean density	2.39	2.41	2.60

In order to estimate RHP for ground measurements, a bulk density value of 2367 kg/m^3 was assigned for the Morro de São João (MSJ), obtained by calculating the arithmetic mean of all measured sample densities. The average RHP ascertained by in situ measurements is $1.61 \text{ } (\mu\text{W/m}^3)$, which is consistent with the values determined through laboratory-scale

gamma spectrometry of rock samples. The range of RHP values is from 0.42 to 3.68 ($\mu\text{W}/\text{m}^3$). The spatial correlation between elevated heat production zones and regions enriched in K-U-Th is notable, particularly in the central, eastern, southern, northeastern, and northwestern sectors of the massif (**Figure 5.11 A**).

5.5.2.1. Radiogenic heat flow

The existing body of literature demonstrates a well-established linear relationship between surface radiogenic heat flow (SRHF) and RHP in the upper crust, as evidenced by **Hasterok and Chapman (2011)** and **Campos et al. (2023)**. The correlation is expressed by Equation 3:

$$q_s = q_r + A_0 D$$

Where q_r is the reduced heat flow and represents the basal contribution from the mantle of Moho, A_0 is the RHP of the surface, and D is the effective thickness of the upper crust layer contributing to heat generation. The Equation 3 enables the partitioning of the total observed surface heat flow into a deep, non radiogenic component (q_r), and a crustal radiogenic component (A_0), derived from the concentration of heat producing elements within the upper crust.

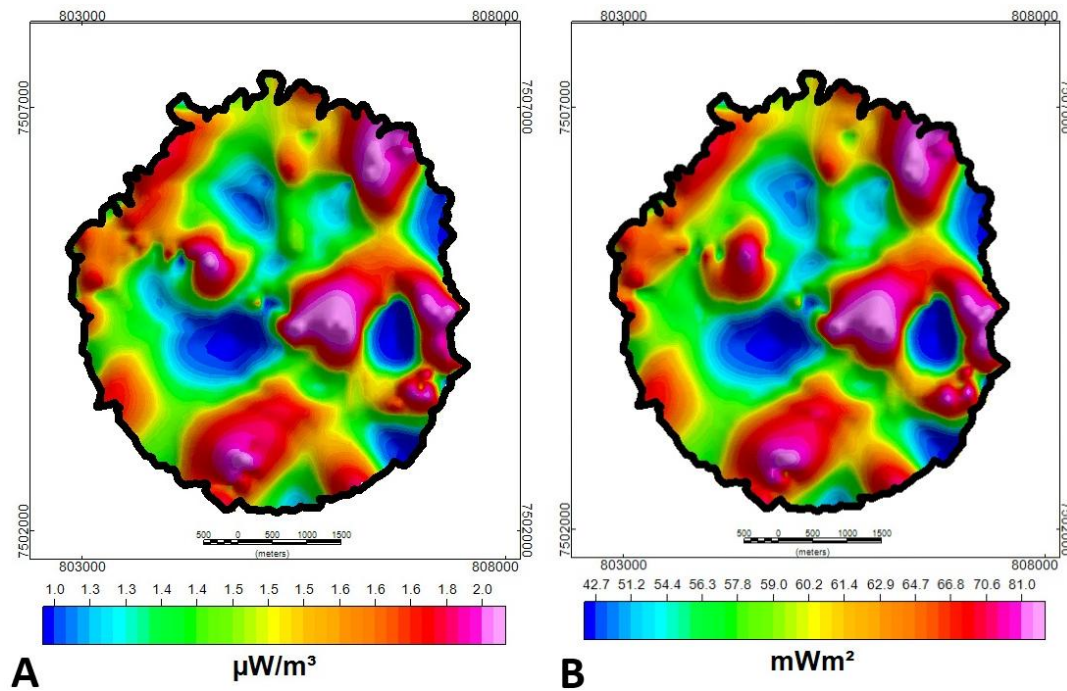


Figure 5.11: Maps of (A) radiogenic heat production and (B) radiogenic heat flow calculated from ground gamma-ray spectrometry data. The black line delineates the boundaries of the Morro de São João (MSJ) alkaline massif.

In order to estimate the surface heat flow of the MSJ, the Sclater–Francheteau model for continental lithosphere structure and reduced heat flow (q_r) was adopted (**Sclater and Francheteau, 1970**). According to the model under consideration, in the event of a lithospheric thickness of 40 km, the reduced heat flow is equivalent to $4.4 \times 10^{-5} \text{ mW/m}^2$. It was determined that an additional value of 550 meters should be allocated to the lithospheric thickness, with this adjustment made on the basis of the elevation generated by the massif.

Subsequently to the calculation of surface heat flow based on the RHP estimated at each gamma spectrometry measurement point, a continuous heat flow map was generated through the use of Kriging interpolation (**Figure 5.11 B**). In the context of the MSJ, the values of A_0 are indicative of a substantial contribution of heat-producing elements within the upper crust to the local thermal regime. Consequently, the thermal anomaly observed in the area can be primarily attributed to the elevated concentrations of radiogenic elements hosted by the MSJ lithotypes.

The surface heat flow distribution exhibits a congruence with the RHP distribution pattern. As demonstrated in **Table 5.7**, the alkaline rocks of the MSJ exhibit a range of values for the heat flow, with a mean of $65 \pm 20 \text{ mW/m}^2$. The range of values indicates a significant variation in the heat flow of the rocks, with values ranging from 18.56 to 149.38 mW/m^2 .

This average is consistent with the surface heat flow estimated for the state of Rio de Janeiro by **Gomes and Hamza (2005)**, who reported a mean value of $64 \pm 30 \text{ mW/m}^2$. However, the authors highlight that areas with higher heat flow values ($> 80 \text{ mW/m}^2$), particularly in the western region of the state, are commonly associated with residual thermal anomalies generated by tertiary alkaline magmatism. The comparatively lower heat flow estimated for the MSJ may be a consequence of adopting the Sclater–Francheteau model, which assumes a constant reduced heat flow from the mantle and does not account for localized contributions of residual magmatic heat. This simplification may result in an underestimation of the total surface heat flow in regions influenced by recent or subvolcanic alkaline magmatism, such as the MSJ.

Studies conducted in alkaline provinces indicate that residual magmatic heat can increase surface heat flow by approximately 20 to 50 mW/m^2 above the regional level. **Blackwell (1971)** and **Smith and Shaw (1975)** documented persistent thermal increments associated with shallow intrusions and young magmatic systems, while **Gomes and Hamza**

(2005) identified anomalies greater than 80 mW/m² in the state of Rio de Janeiro related to tertiary alkaline magmatism. These values provide a plausible range for a preliminary sensitivity analysis, suggesting that the use of the Sclater–Francheteau model may lead to an underestimation of heat flow in areas where magmatic heat input has not yet been fully dissipated. The adoption of alternative lithospheric structure models or regional estimates of mantle heat flux may improve the characterization of the thermal regime of the MSJ.

Table 5.7: Statistical synthesis of MSJ surface heat flow obtained from in situ gamma spectrometry measurements. σ denotes the standard deviation.

Statistic	mW/m ²
Max	149.38
Min	17.21
Mean	65.26
σ	18.57

5.6. Conclusions

It has been demonstrated unequivocally by gamma-ray spectrometric analyses that the Morro de São João Alkaline Massif (MSJ) is geochemically enriched in potassium, a defining characteristic of alkaline magmatism. This signature is consistently captured across multiple scales, including regional airborne datasets, local distribution maps, and laboratory-based measurements, thereby underscoring the robustness of the results.

The integration of airborne and ground-based surveys reveals a strong spatial correlation of radiometric elements, while also highlighting the advantages of higher-resolution ground measurements in detecting subtle geochemical variations. These fine-scale heterogeneities provide critical insights into lithological complexity that would otherwise remain undetected.

Elemental concentrations, as determined by spectrometric analyses, have been shown to establish a clear link with felsic mineral content. Melanocratic rocks are depleted in K–eTh–eU contents, whereas leucocratic rocks exhibit marked enrichment. Mesocratic rocks are interpreted as products of magma mixing processes, resulting in hybrid lithologies. Consequently, the intermediate K–eTh–eU contents observed for these rocks likely represent an average between the concentrations characteristic of the melanocratic and leucocratic end

members.

This trend is reflected in the radiogenic heat production (RHP) of the rocks. Leucocratic lithologies exhibit higher RHP values ($1.70 \pm 0.83 \mu\text{W}/\text{m}^3$) despite their lower density, while melanocratic rocks demonstrate the opposite trend. Such patterns serve to reinforce the interpretation of radiogenic heat production elements as a reliable tracer of magma mixing processes in the massif.

The surface heat flow estimated for the MSJ is consistent with the regional averages reported for the state of Rio de Janeiro (**Hamza et al., 2005**). However, it is important to note that the values obtained in this study are likely to be conservative. This is because the modelling does not incorporate the residual thermal contribution of Tertiary alkaline magmatism associated with the massif.

This study provides the first comprehensive, multi-scale radiometric characterization of the MSJ. Beyond refining the understanding of its internal architecture and magmatic evolution, the results expand the current knowledge of radiogenic heat generation in Brazilian alkaline provinces and contribute to broader discussions on the thermal and tectonic significance of intraplate magmatism along the South American Platform

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise multiescalar da distribuição de K, eU e eTh no Maciço Alcalino do Morro de São João demonstrou que a integração entre levantamentos aerogeofísicos e gamaespectrometria in situ constitui uma ferramenta altamente eficaz para a caracterização de litotipos em complexos alcalinos. Os resultados obtidos reforçam o papel dos elementos radiogênicos como indicadores confiáveis da evolução magmática, evidenciado pelo enriquecimento progressivo de K, U e Th à medida que o magmatismo avançou para estágios mais diferenciados.

A comparação entre os levantamentos aéreos e terrestres revelou diferenças significativas, especialmente no que se refere à resolução espacial e à capacidade de discriminar variações locais. Enquanto os dados de campo permitiram detalhar heterogeneidades internas ao maciço, os aerolevantamentos forneceram uma visão regional mais homogênea, adequada para delimitar tendências gerais. Esse contraste destaca a importância da integração metodológica entre diferentes escalas de análise, evidenciando que limitações instrumentais e

parâmetros de aquisição influenciam diretamente a interpretação geofísica e a inferência sobre os processos magmáticos. Assim, em estudos de complexos alcalinos similares, a utilização combinada de técnicas multiescalares se mostra imprescindível para uma caracterização mais robusta e confiável dos litotipos.

As estimativas de produção de calor radiogênico confirmaram uma correlação direta com o índice de evolução magmática, sugerindo que os litotipos mais diferenciados do maciço podem desempenhar um papel relevante no balanço térmico local. No entanto, os valores de fluxo de calor obtidos devem ser interpretados com cautela, uma vez que a adoção de um valor fixo para a contribuição mantélica pode ter levado à subestimação do fluxo real. Essa limitação metodológica ressalta a necessidade de futuros estudos que incorporem abordagens mais refinadas, capazes de separar de forma precisa as contribuições crustais e mantélicas, sobretudo considerando o histórico magmático terciário da região.

Em uma perspectiva mais ampla, os resultados alcançados reforçam a relevância do Maciço Alcalino do Morro de São João como um laboratório natural para investigações sobre a evolução de sistemas alcalinos, oferecendo contribuições valiosas para a compreensão do regime térmico da Plataforma Sul-Americana. Além de seu valor científico, a caracterização radiométrica detalhada possui potencial de aplicação prática, seja no planejamento de futuros levantamentos geofísicos regionais, seja na prospecção e avaliação de recursos minerais associados a ambientes alcalinos.

Por fim, este estudo contribui significativamente para o avanço do conhecimento geológico do Maciço do Morro de São João, consolidando o uso integrado de métodos radiométricos em diferentes escalas de análise. Além disso, abre perspectivas promissoras para pesquisas futuras que explorem a relação entre evolução magmática, distribuição de elementos radiogênicos e regime térmico crustal, fornecendo uma base sólida para o desenvolvimento de modelos geotérmicos e geodinâmicos mais detalhados de complexos alcalinos.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BASTOS, B. P.; PINHEIRO, H. S. K.; CARVALHO JUNIOR, W.; ANJOS, L. H. C.; FERREIRA, F. J. F. Clustering airborne gamma-ray spectrometry data in Nova Friburgo, State of Rio de Janeiro, southeastern Brazil. **Journal of Applied Geophysics**, v. 209, p. 104900, 2023.

ALMEIDA, F. F. M.. Relacoes tectonicas das rochas alcalinas mesozóicas da regio meridional da plataforma Sul-Americana. **Revista Brasileira de Geociências**, v.13(3), p. 139-158, 1983

ALMEIDA, J. C.; HEILBRON, M.; GUEDES, E.; NEUBAUER, F.; MANDRED, B.; KLAUSEN, M.B.; VALERIANO, C.M.; BRUNO, H.; GIRO, J.P.; MCMASTER, M.; TETZNER, W. Pre-to-synrift tholeiitic magmatism in a transtensive hyperextended continental margin: onshore and offshore magmatism of the Campos Basin, SE Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 108, p. 103218, 2021.

AZZONE, R. G.; 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. **Brazilian Journal of Geology**, v. 48(2), p. 373-390, 2018.

BEA, F. Residence of REE, Y, Th and U in granites and crustal protoliths; implications for the chemistry of crustal melts. **Journal of Petrology**, v. 37, p. 521-552, 1996.

BLACKWELL, D. D. The thermal structure of the continental crust. **The structure and physical properties of the earth's crust**, v. 14, p. 169–184, 1971.

BRIGGS, I. I. C. Machine contouring using minimum curvature. **Geophysics**, v. 39, n. 1, p. 39–48, 1974.

BROTZU, P.; MELLUSO, L.; BENNIO, L.; GOMES, C.; LUSTRINO, M.; MORBIDELLI, L.; MORRA, V.; RUBERTI, E.; TASSINARI, C.; D'ANTONIO, M. 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.

CAMPOS, T. F. de C.; ARAUJO, J. H.; SICHEL, S. E.; SILVA PASTURA, V. F. da;

MOTOKI, K. F.; BARÃO, L. M.; MAIA, M.; FONSECA, E. M. da; NAVONI, J.; VARGAS, T.; et al. Mapping of surface radiogenic heat production from in situ gamma spectrometry and chemical data of exhumed mantle peridotites at the St. Peter and St. Paul archipelago (equatorial Atlantic). **Applied Radiation and Isotopes**, v. 192, p. 110608, 2023.

COX, K. G.; BELL, J. D.; PANKHURAT, R. J. - **The interpretation of igneous rocks**. London: George, Allen and Unwin. 450p, 1979.

DICKSON, B. L.; SCOTT, K. M. Interpretation of aerial gamma-ray surveys: adding the geochemical factors. **Australian Journal of Geology and Geophysics**, v. 17, p. 187-200, 1997.

FAGUNDES, M. B. **Caracterização petrográfica e geoquímica do complexo alcalino do Morro de São João, Casimiro de Abreu-RJ**. (Dissertação) – Faculdade de Geologia, Centro de Tecnologia e Ciências, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 107 p., 2020.

FAGUNDES, M. B. **Petrogênese, evolução magmática do complexo alcalino do Morro de São João, sudeste do Brasil, e suas implicações na evolução da plataforma Sul-Americana**. (Tese) - Faculdade de Geologia, Centro de Tecnologia e Ciências, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 352 p., 2024.

FAGUNDES, M. B.; SANTOS, A.; GERALDES, M.; VALENTE, S. C.; GUEDES, E.; BARBOSA, T. R. P.; LOPES, J. Petrological implications of melanite in the rocks of the Morro de São João Alkaline Complex, Casimiro de Abreu, Rio de Janeiro, Brazil. **Brazilian Journal of Geology**, v. 54, p. 16, 2025b.

FERREIRA, F.; NETO, L.; SZAMEITAT, L.; GUIMARÃES, G.; MARTIN, V.; PRAZERES FILHO, H.; ULBRICH, H. Gamma-ray spectrometry as a tool for mapping petrographic domains in granitoids: the examples of the Cunhaporanga and Três Córregos granitic complexes, Paraná state, Southern Brazil. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 32, p. 465-479, 2014.

FERNANDES, G. L. F.; SCHMITT, R. da S.; BONGIOLO, E. M.; BASEI, M. A. S.; MENDES, J. C. - Unraveling the tectonic evolution of a Neoproterozoic-Cambrian active margin in the Ribeira Orogen (SE Brazil): U-Pb and Lu-Hf provenance data. **Precambrian**

Research, v. 266, p. 337-360, 2015.

GIBSON, S. A.; THOMPSON, R. N.; WESKA, P. K.; DICKIN, A. P.; LEONARDOS, O. H. Late Cretaceous rift-related upwelling and melting of the Trindade starting mantle plume head beneath western Brazil. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, v. 126, p. 303-314, 1997.

GNOJEK, I.; PRICHYTAL, A. A new zinc mineralization detected by airborne gamma-ray spectrometry in northern Moravia (Czechoslovakia). **Geoexploration**, v. 23, p. 491-502, 1985.

GOMES, A. J. L.; HAMZA, V. M. Geothermal gradient and heat flow of the state of Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 23, p. 325-347, 2005.

HAMZA, V. M.; CARDOSO, R. A.; GOMES, A. J. L. Gradiente e fluxo geotérmico na região sudeste: indícios de calor residual do magmatismo alcalino e implicações para maturação térmica de sedimentos na plataforma continental. In: **SIMPÓSIO DE VULCANISMO E AMBIENTES ASSOCIADOS**, Cabo Frio, Brasil, 2005.

HASTEROK, D.; CHAPMAN, D. S. Heat production and geotherms for the continental lithosphere. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 307, n. 1-2, p. 59-70, 2011.

HASTEROK, D.; WEBB, J. On the radiogenic heat production of igneous rocks. **Geoscience Frontiers**, v. 8, p. 919-940, 2017.

HEILBRON, M.; EIRADO, L. G.; ALMEIDA, J. **Mapa Geológico e de recursos minerais do Estado do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: Serviço Geológico do Brasil – CPRM, 2016

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). **Measurement of radionuclides in food and the environment**. Vienna: IAEA, 1989.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). **Guidelines for radioelement mapping using gamma-ray spectrometry data**. Vienna: IAEA, 2003.

LIMA, R. P.; MARFURT, K. J. Principal component analysis and K-means analysis of airborne gamma-ray spectrometry surveys. In: **SEG Technical Program Expanded Abstracts 2018**. p. 2277–2281, 2018.

LØVBORG, L. and MOSE, E. Counting statistics in radioelement assaying with a portable

spectrometer. **Geophysics**, v. 52.4, p. 555-563, 1987.

MARINS, G. M. **Estudo do magmatismo máfico de complexos alcalinos do sudeste do Brasil. Dissertação** (Dissertação) – Faculdade de Geologia, Centro de Tecnologia e Ciências, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

MCCARTHY, D. K.; REYNOLDS JR., R. C. Three-dimensional crystal structures of illite-smectite minerals in paleozoic K-bentonites from the Appalachian Basin. **Clay and Clay Minerals**, v. 49, p. 24-35, 2001.

MINTY, B. R. S. Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry. **AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics**, v. 17, p. 39-50, 1997.

MOTA, C. E. M. **Petrogênese e geocronologia das intrusões alcalinas de Morro Redondo, Mendanha e Morro de São João: caracterização do magmatismo alcalino do Estado do Rio de Janeiro e implicações geodinâmicas.** (Tese) – Faculdade de Geologia, Centro de Tecnologia e Ciências, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

MOTOKI, A.; SILVA, S. da; 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. **Geosciences = Geociências**, v. 33, n. 1, p. 11-25, 2014.

MOTOKI, A.; PETRAKIS, G. H.; SICHEL, S. E.; CARDOSO, C. E.; MELO, R. C.; SOARES, R. S.; MOTOKI, K. F. Landform origin of the Mendanha massif, state of Rio de Janeiro, Brazil, based on the geomorphological analyses by summit level map technique. **Geociências**, v. 27, n. 1, p. 99-115, 2008.

MOTOKI, K. F.; CAMPOS, T. F. C.; ARAUJO, J. H.; SANTOS, A. C.; GOMES, M. E. P.; SICHEL, S. E.; FONSECA, E. M.; MONTEIRO, L. G. P.; NOGUEIRA, G. S. Assessment of surface radiogenic heat flow in volcanic rocks of Trindade Island, South Atlantic Ocean, Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 97, n. 3, e20240353, 2025.

RIBEIRO, V. B.; MANTOVANI, M. S. V.; LOURO, V. H. A. Aerogamaespectrometria e suas aplicações no mapeamento geológico. **Terrae Didática**, v. 10, p. 29-51, 2013.

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

RICCOMINI, C.; FERNANDEZ, V. V.; GOMES, C. B. Tectonic controls of the Mesozoic and Cenozoic alkaline magmatism in central-southeastern Brazilian Platform. **São Paulo: Edusp**, p. 32-55, 2005.

RYBACH, L. Amount and significance of radioactive heat sources in sediments. In: *THERMAL MODELLING IN SEDIMENTARY BASINS*. Paris: **Editions Technip**, p. 311-322, 1986.

SCLATER, J. G.; FRANCHETEAU, J. The implications of terrestrial heat flow observations on current tectonic and geochemical models of the crust and upper mantle of the Earth. **Geophysical Journal International**, v. 20, n. 5, p. 509-542, 1970.

SCHMITT, R. S., TROUW, R. A. J., VAN SCHMUS, W. R., PASSCHIER, C. W., 2008. Cambrian orogeny in the Ribeira Belt (SE Brazil) and correlations within West Gondwana: ties that bind underwater. **Journal of Geological Society**, p. 279–296.

SILVA, V. A. F.; FERREIRA, F. J. F. Magnetic and radiometric signatures of alkaline rocks and gabbros from the Ponta Grossa Arch, southeastern Paraná Basin, Brazil. **Brazilian Journal of Geology**, v. 51, n. 3, e20200051, 2021.

SMITH, R. L.; SHAW, H. R. Igneous-related geothermal systems. **US Geol. Surv. Circ**, v. 726, p. 58–83, 1975.

SONOKI, I. K.; GARDA, G. M. Idades K-Ar de rochas do Brasil meridional e Paraguai oriental: compilação e adaptação a novas constantes de decaimento. **Boletim IG – USP**, v. 19, p. 63-85, 1988.

SÁ, C. B.; RIBEIRO, A. S.; SANTOS, H. S.; FREITAS, F. B. V. Processamento de dados aerogamaespectrométricos e sua contribuição para o conhecimento da geologia da região de Casimiro de Abreu. **Revista de Engenharias da Faculdade Salesiana**, v. 5, p. 27-36, 2017.

THOMAZ FILHO, A.; RODRIGUEZ, A. O alinhamento de rochas alcalinas Poços de Caldas

– Cabo Frio e sua continuidade na cadeia de Vitória-Trindade. **Brazilian Journal of Geology**, v. 29, p. 189-194, 1999.

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 Plume? **Journal of Petrology**, v. 39, p. 1493-1526, 1998.

ULBRICH, H. H. G. J.; ULBRICH, M. N. C.; FERREIRA, F. J. F.; ALVES, L. S.; GUIMARÃES, G. B.; FRUTCHING, A. Levantamentos gamaespectrométricos em granitos diferenciados. I: Revisão da metodologia e do comportamento geoquímico dos elementos K, Th e U. **Geologia USP – Série Científica**, v. 9, p. 33-53, 2009.

WEIHERMANN, J. D.; FERREIRA, M. P.; CASTRO, L. G.; FERREIRA, F. J. F.; SILVA, A. M. Retrieving geological units with unsupervised clustering of gamma-ray spectrometry data. **Journal of Applied Geophysics**, v. 184, p. 104225, 2021.

WHITE, A. R. Determining mineral weathering rates based on solid and solute weathering gradients and velocities: application to biotite weathering in saprolites. **Chemical Geology**, v. 190, p. 69-89, 2002.

WILFORD, J.; BIERWIRTH, P. N.; CRAIG, M. A. Application of airborne gamma-ray spectrometry in soil/ regolith mapping and applied geomorphology. **AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics**, v. 17, n. 2, p. 201-216, 1997.

WILFORD, J. A weathering intensity index for the Australian continent using airborne gamma-ray spectrometry and digital terrain analysis. **Geoderma**, v. 183, p. 124-142, 2012.

ZALAN, P. V.; OLIVEIRA, J. A. B. Origem e evolução estrutural do Sistema de Riftes Cenozoicos do Sudeste do Brasil. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 13, 2005.