

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA MARINHA PÓS-
GRADUAÇÃO EM DINÂMICA DOS OCEANOS E DA TERRA

**INFLUÊNCIA DO GÁS RADÔNIO NA FORMAÇÃO DE AEROSSÓIS
ATMOSFÉRICOS NA ILHA DE TRINDADE**

Niterói (RJ), Julho de 2023



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
CURSO DE DOUTORADO ACADÊMICO EM
DINAMICA DOS OCEANOS E DA TERRA

INFLUÊNCIA DO GÁS RADÔNIO NA FORMAÇÃO DE AEROSSÓIS
ATMOSFÉRICOS NA ILHA DE TRINDADE

por

Kenji Freire Motoki

Tese de Doutorado apresentada
ao Programa de Pós-graduação em
Dinâmica dos Oceanos e da Terra da
Universidade Federal Fluminense, como
parte dos requisitos necessários à obtenção
do título de Doutor em Ciências.

Orientadora: Susanna Eleonora Sichel,
Doutora
Co-Orientador: Thomas Campos, Doutor

Ficha catalográfica automática - SDC/BIG
Gerada com informações fornecidas pelo autor

F866i Freire Motoki, Kenji
INFLUÊNCIA DO GÁS RADÔNIO NA FORMAÇÃO DE AEROSSÓIS
ATMOSFÉRICOS NA ILHA DE TRINDADE / Kenji Freire Motoki. - 2023.
81 p.: il.

Orientador: Susanna Eleonora Sichel.
Coorientador: Thomas Ferreira Campos.
Tese (doutorado)-Universidade Federal Fluminense, Instituto
de Geociências, Niterói, 2023.

1. Radônio. 2. Aerossóis atmosféricos. 3. Radiação de
raios Gama. 4. Samambaias gigantes, Ilha de Trindade. 5.
Produção intelectual. I. Eleonora Sichel, Susanna,
orientadora. II. Ferreira Campos, Thomas, coorientador. III.
Universidade Federal Fluminense. Instituto de Geociências.
IV. Título.

CDD - XXX



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
 Instituto de Geociências
 Departamento de Geologia e Geofísica
 Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra

Ata de defesa de Tese de Doutorado

Ao(s) seis dia(s) do mês de Julho de dois mil e vinte e três às 13:30h, no , reuniu-se a Banca Examinadora designada para arguir a defesa de Tese de Doutorado do(a) aluno(a) **KENJI FREIRE MOTOKI** sob o título:

"INFLUÊNCIA DO GÁS RADÔNIO NA FORMAÇÃO DE AEROSSÓIS ATMOSFÉRICOS NA ILHA DE TRINDADE."

A banca constituída pelos professores:

SUSANNA ELEONORA SICHEL, Dr (a). (PPGDOT-UFF) - Orientador(a)/Presidente
 THOMAS FERREIRA DA COSTA CAMPOS, Dr (a). (UFRN) - Co-orientador(a)
 CHRISTIANO MAGINI, Dr (a). (UFC)
 ESTEFAN MONTEIRO DA FONSECA, Dr (a). (UFF)
 ISA BREHME, Dr (a). (UFF)
 JOSE ANTONIO BAPTISTA NETO, Dr (a). (PPGDOT-UFF)
 MARCOS VINÍCIUS MORAES DOS SANTOS, Dr (a). (UFRJ)

deliberou pela aprovação do(a) candidato(a) de acordo com o seguinte parecer:

o doutorando Kenji F. Motoki deverá fazer as correções e incorporar as sugestões feitas pelos arguentes da banca examinadora à sua tese de doutorado. Após finalização, deverá fornecer cópias da Tese à secretaria da Pós-Graduação e aos membros da sua banca de doutorado.

06 de Julho de 2023

Orientador(a):	<u>Susanna Eleonora Sichel</u>	
Co-orientador(a):	<u>Thomas Ferreira da Costa Campos</u>	
Arguidor:	<u>Christiano Magini</u>	
Arguidor:	<u>Isa Brehme</u>	Documento assinado digitalmente gov.br ESTEFAN MONTEIRO DA FONSECA Data: 03/08/2023 11:24:10-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br
Arguidor:	_____	
Arguidor:	_____	
Arguidor:	<u>Jose Antonio Baptista Neto</u>	Documento assinado digitalmente gov.br JOSE ANTONIO BAPTISTA NETO Data: 10/08/2023 15:57:39-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br
Candidato(a):	<u>Kenji Freire Motoki</u>	

"Geology gave us the immensity of time and taught us how little of it our own species has occupied"

Stephen Jay Gould

AGRADECIMENTOS

Aos meus amigos espalhados por esse Brasil inteiro que me apoiaram nos momentos de fraqueza e me incentivaram a continuar nessa fase do doutorado.

A minha família por me apoiar independente do caminho que eu quisesse seguir.

A minha orientadora Susanna Eleonora Sichel por me ajudar durante toda a graduação e durante o mestrado e no doutorado me oferecendo oportunidade de conhecer e me aprofundar no mundo da geofísica.

Ao meu co-orientador Thomas Campos que me abriu as portas para aprender e me aprofundar no mundo acadêmico.

Agradeço a equipe embarcou comigo para a Ilha de Trindade e em especial aqueles que ficaram durante os dois meses foram esses Alex, Beatriz, Daniel, Isis, Gabriela e Marcio. onde pudemos ajudar uns nas pesquisas dos outros e melhorar como seres humanos no geral.

Aos mestres que conheci durante a vida passando seus conhecimentos e confiando que possamos nos tornar grandes cientistas e seres humanos durante nosso tempo de vida.

A UFF que me permitiu aprender e sempre continuar em um caminho onde a ciência é a prioridade e a busca por conhecimento sempre deve ser almejada.

RESUMO

A presente tese busca compreender a relação entre o particulado iônico com as emissões do radônio concomitantemente com o fluxo de calor gerado pelo decaimento radiogênico dos elementos radioativos presentes nas áreas de estudo através de medições de aglomerados de íons atmosférico por um contador de íons no ar, medições passivas de gás radônio na atmosfera baixa através de emanômetros portáteis, utilizou-se um espectrômetro Gama portátil para a quantificar os elementos radioativos presentes nas respectivas regiões estudadas. Com base em pesquisas realizadas em florestas continentais (duna e caatinga) e na Ilha Trindade, localizadas no Nordeste e Sudeste do Brasil, respectivamente, é apresentada uma análise da correlação entre partículas iônicas nas atmosferas florestais e a variação do teor de radônio nos dosséis. O estudo busca estabelecer uma conexão entre a produção de calor radiogênico e a presença de aerossóis atmosféricos na área em específico. Os dados referentes ao Radônio são atribuídos à liberação do mesmo para a atmosfera pela evapotranspiração das plantas, que geralmente ocorre durante o dia e especialmente a tarde. Já os dados espectrometria de raios Gama mostraram a produção de calor radiogênico superficial e associado ao mesmo na Ilha da Trindade tendo uma média mediana de 58,3 mW/m²s. A tendência do Radônio se mostra divergente do padrão comparado com outras áreas, o que é inesperado enquanto que o fluxo de calor se mostra bem condizente com a média do fluxo de calor calculado para o Brasil.

Palavra-chave: Radônio, aerossóis atmosféricos, radiação de raios Gama, Samambaias gigantes, Ilha de Trindade.

ABSTRACT

The present thesis aims to understand the relationship between ionic particulate matter and radon emissions, along with the heat flux generated by the radiogenic decay of radioactive elements present in the study areas. This was done through measurements of atmospheric ion clusters using an air ion counter, passive measurements of radon gas in the lower atmosphere using portable emanometers, and the utilization of a portable gamma spectrometer to quantify the radioactive elements present in the respective study regions. Based on research conducted in continental forests (dunes and caatinga) and on Trindade Island, located in the Northeast and Southeast of Brazil, respectively, an analysis is presented regarding the correlation between ionic particles in forest atmospheres and the variation of radon content in the canopies. The study seeks to establish a connection between radiogenic heat production and the presence of atmospheric aerosols in the specific area. The data related to radon are attributed to its release into the atmosphere through plant evapotranspiration, which generally occurs during the day, especially in the afternoon. Meanwhile, the Gamma spectrometry data showed surface radiogenic heat production associated with it on Trindade Island, with a median average of 58.3 mW/m²s. The trend of radon appears to diverge from the standard when compared to other areas, which is unexpected, while the heat flow aligns well with the calculated heat flow average for Brazil.

Keywords: Radon, Atmospheric aerosol, Gamma Ray Spectrometry Giant ferns, Trindade Island.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização da Ilha da Trindade e arquipélago Martim Vaz, Atlântico Sul, Brasil. Figura feita com o aplicativo GeoMapApp (GEOMAPAPP, 2022)..	10
Figura 2: Séries radioativas naturais com destaque no elemento isótopo de Radônio 222.	13
Figura 3: Modelo digital de elevação criado a partir de dados de LIDAR via Drone (Dados fornecidos por Nogueira).	16
Figura 4:Imagens da Ilha da Trindade: A) Visão geral da ilha; B) Complexo Trindade, pico Desejado (620 m), pico São Bonifácio (570 m) e pico Trindade (590 m); C) Pico monumento (270 m), neck fonolítico; D) Pico do Pão de Açúcar (392 m), neck fonolítico, próximo ao vulcão Paredão; E) Vulcão Paredão (217 m) e seu semicone vulcânico; F) Visão geral da vertente oeste do vulcão Paredão e do Pão de Açúcar, neck fonolítico.	18
Figura 5: Mapa geológico da Ilha da Trindade, Atlântico Sul, Brasil. Cores do mapa geológico de acordo com o United State Geological Survey (Modificado de Almeida, 1961).	19
Figura 6: Coluna estratigrafica da ilha de Trindade. Apud Santos et al. (2019)	21
Figura 7: Mapa geológico da região de Natal com ênfase no Parque das Dunas, Natal,RN.....	23
Figura 8: (a) Foto do AlphaGuard® PRO (GENITRON INC); b) Air Ions Counter da AlphaLab® medindo o gás Radônio e o íons na floresta de samambaias Trindade. (b) Esquema de funcionamento do AlphaGuard® PRO (SAPHYMO, 2009)	26
Figura 9: a) Foto do RS-230® (RADIATION SOLUTION INC.) (b) Foto mostrando o processo de medida dos elementos radioativos superficiais utilizando o espectrômetro Gama portátil.....	28
Figura 10: A) Variação dos íons Total (+ e -) ao longo do dia, em diferentes tipos de florestas; B) Variação do gás Radônio ao longo do dia, em diferentes tipos de florestas (Modificado de MOTOKI, 2020).	31
Figura 11: Amostragem: Localização de todas as amostras de rocha e pontos medidos por espectrometria Gama na Ilha da Trindade. Triângulo preto: Todas	

as amostras de rocha e pontos medidos espectrometria Gama. Diamante vermelho: amostras de CORDANI,1970.	32
Figura 12: Diagrama R1 versus R2 $\{[4Si-11(Na+K)-2(Fe+Ti)]$ versus $[6Ca+2Mg+Al]\}$ das rochas vulcânicas da Ilha da Trindade, Oceano Atlântico Sul, Brasil. Baseado em DE LA ROCHE (1986).....	35
Figura 13: Diagrama de Alkali Totais versus SiO ₂ das rochas vulcânicas da Ilha da Trindade, Oceano Atlântico Sul, Brasil. Baseado em BAS et al. (1986).....	36
Figura 14: Comparação entre AAN e ERG dos teores de Urânio, Tório e potássio das rochas vulcânicas da Ilha da Trindade, Oceano Atlântico Sul, Brasil: A) Rochas intermediárias; B) Rochas básicas; C) Rochas ultrabásicas.....	38
Figura 15: Diagrama de Ternário de Urânio x Tório x Potássio das vulcânicas da Ilha de Trindade, Oceano Atlantico Sul. (a) Amostra total; (b) Espectrometria Gama superficial.	39
Figura 16: Mapa de superfície demonstrando K (%) por análise química de rocha total, interpolado por Natural Neighbor. (A) e histograma (B) do EPSCR Potássio (A.eq. %) da Ilha da Trindade, Oceano Atlântico Sul, Brasil.	41
Figura 17: Mapa de superfície demonstrando Tório (ppm) por análise química de rocha total, interpolado por Natural Neighbor. (A) e histograma (B) do EPSCR Tório (ppm) da Ilha da Trindade, Oceano Atlântico Sul, Brasil.....	42
Figura 18: Mapa de superfície demonstrando o Urânio em ppm, interpolado por Natural Neighbor. (A) e do EPSCR Urânio (A.eq. ppm) por meio de análise química de rochas vulcânicas da Ilha da Trindade, Oceano Atlântico Sul, Brasil.	43
Figura 19: Mapa de superfície do interpolado pelo método Natural Neighbor (A) e histograma (B) da dose absorvida radioativa (nGy/h) obtida por análise química de rocha total de rochas vulcânicas da Ilha da Trindade, Oceano Atlântico Sul, Brasil.	44
Figura 20: Mapa de superfície demonstrando o K em %, interpolado por Natural Neighbor. (A) e do EPSCR Urânio (A.eq. %) e histograma (B) por meio da ERG de rochas vulcânicas da Ilha da Trindade, Oceano Atlântico Sul, Brasil.	46
Figura 21: Mapa de superfície demonstrando o Tório em ppm, interpolado Natural Neighbor. (A) e do EPSCR Tório (A.eq. ppm) e histograma (B) por meio da ERG de rochas vulcânicas da Ilha da Trindade, Oceano Atlântico Sul, Brasil.	47

Figura 22: Mapa de superfície demonstrando o Urânio em ppm, interpolado por Natural Neighbor. (A) e do EPSCR Urânio (A.eq. ppm) e histograma (B) por meio da ERG de rochas vulcânicas da Ilha da Trindade, Oceano Atlântico Sul, Brasil.	48
Figura 23: Mapa de superfície demonstrando a dose radioativa absorvida (nGy/h), interpolado pelo método Natural Neighbor. (A) e histograma (B) por meio da ERG de rochas vulcânicas da Ilha da Trindade, Oceano Atlântico Sul, Brasil.	49
Figura 24: Mapa de superfície demonstrando a produção de calor radiogênico superficial (PCRS) , interpolado por Natural Neighbor. (A) e histograma (B) por meio de análise química por rocha total e (C) e (D) por ERG de rochas vulcânicas da Ilha da Trindade, Oceano Atlântico Sul, Brasil.	53
Figura 25: Mapa de cores do método do natural neighbor para FCRS (Qsurf: mW/m ² s) e histograma das rochas vulcânicas da Ilha da Trindade, Oceano Atlântico Sul, Brasil: A) e B) por análise química de rocha total; C) e D) por espectrometria de raios Gama (ERG).	59
Figura 26: Modelo de litosfera oceânica e escudo continental, assumindo um fluxo constante a 200 km de profundidade. O fluxo de calor em diferentes níveis é indicado pelas flechas mais espessas. Modificado de SCLATER (1970; 1980).	60
Figura 27: Comparação entre Asur (μW/m ³) e Qsur (mW/m ²) de todas as rochas vulcânicas da Ilha da Trindade, Oceano Atlântico Sul, Brasil: A) por análise de rocha total; B) por espectrometria de Raios Gama (ERG).	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Síntese estatística de EPCS de rochas vulcânicas de Trindade: Ilha, Oceano Atlântico Sul, Brasil: A) por análise química de rocha total (AAN) e densidade, Ilha, Oceano Atlântico Sul, Brasil; B) por espectrometria de raios Gama e densidade.	34
Tabela 2: Coeficientes de regressão linear da análise de AAN versus ERG de U, Th e K de rochas vulcânicas da Ilha da Trindade, Oceano Atlântico Sul, Brasil, apresentados na Tabela 1.	37
Tabela 3: Síntese estatística do PCRS (A_{surf} : μWm^3) e a respectiva contribuição dos resultados de radioisótopos de rochas vulcânicas da Ilha Trindade, Oceano Atlântico Sul, Brasil: A) por análise de rocha total; B) por ERG.	51
Tabela 4: Síntese estatística dos resultados de FCRS (Q_{surf} : $\mu W/m^2$) das rochas vulcânicas da Ilha da Trindade, Oceano Atlântico Sul, Brasil: A) FCRS por análise de rochas total; B) FCRS por espectrometria de raios Gama.	55
Tabela 5: Síntese estatística dos resultados médios de PSCR (A_{surf} : mW/m^3) e FCRS (q_s : mW/m^2) de todas as rochas vulcânicas da Ilha da Trindade, Oceano Atlântico Sul, Brasil: FCRS por análise de ativação neutrônica de rocha total (n: 77) e por espectrometria de raios Gama (n: 481).	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ERG – Espectometria de raios Gama

NCN – Núcleos de condensação de nuvens

HPGe - Detector de germânio de alta pureza

ANN – Analise de ativação neutrônica

EPSCR - Elementos produtores de calor radiogênico

PCRS - Produção de calor radiogênico superficial

EPC – Elementos produtores de calor

FCRS – Fluxo de calor radiogênico superficial

PCR - Produção de calor radiogênico

FCR - Fluxo de calor radiogênico

SUMÁRIO

1. Introdução.....	9
1.1 Aerossóis Atmosféricos.....	10
1.2 Gás Radônio	12
1.3 Elementos radioativos e o fluxo de calor.....	13
2. Objetivo.....	15
3. Geologia Geral.....	15
3.1 A ilha de Trindade	15
3.2 Parque das Dunas, Natal	22
4. Caracterização do Problema	23
5. Metodologia	25
5.1 Gás Radônio e aglomerados iônicos.	25
5.2 Espectrometria de Radiação Gama e coleta de amostras	27
6. Desenvolvimento e Resultados	29
6.1 Assinatura do Gás Radônio e sua relação com a evapotranspiração.....	29
6.2 Comparação entre a Química de Rocha Total e a Espectrometria de Raios Gama in Situ.	32
6.3 Mapeamento dos Elementos Produtores de Calor Radioativo na Superfície por Análise Química de Rocha Total	40
6.4 Mapeamento de Elementos Radioativos Produtores de Calor de Superfície por Espectrometria de Raios Gama	45
6.5 Produção de Calor Radiogênico Superficial.....	50
6.6 Fluxo de Calor Radiogênico Superficial	54
7. Conclusões.....	64
8. Referências Bibliográficas	66

1. Introdução

As questões relacionadas aos aerossóis atmosféricos e sua influência no clima vem sendo abordadas com certa constância. Como esses particulados interagem com o meio ambiente e sua origem tanto natural como antrópica. Cerca de 50 % desses aerossóis são formados pela influência da desintegração do gás Radônio e seus descendentes radioativos na atmosfera baixa nas zonas florestais sendo consequência direta da evapotranspiração das plantas, que leva o gás Radônio dissolvido nas águas subterrâneas para o dossel das florestas (DIAS DE ALBUQUERQUE et al., 2022; MEGONIGAL, BREWER & KNEE, 2019; JAYRATNE & MORAWSKA, 2011; MARTENS et al., 2004; LANGENDÖRFER, 2002; USSLER III et al., 1994). Os estudos que correlacionam a formação dos aerossóis atmosféricos, as emissões do gás Radônio e a evapotranspiração das plantas são mundialmente escassos.

A presente tese aborda os aspectos gerais da relação do particulado iônico com as emissões do radônio, concomitantemente com o fluxo de calor gerado pelo decaimento radiogênicos dos elementos radioativos presentes na ilha de Trindade e numa área do Rio Grande do Norte, através de medições de aglomerados de íons atmosférico por um contador de íons no ar, medições passivas de gás radônio na atmosfera baixa através de emanômetros portáteis e um espectrômetro de radiação Gama portátil para identificar os elementos radioativos presentes nas áreas estudadas, iremos abordar a os aspectos gerais da ilha de Trindade a seguir.

A ilha de Trindade é uma pequena ilha vulcânica situada no oceano Atlântico Sul, a 1440 km do Estado do Rio de Janeiro, nas imediações do Arquipélago de Martim Vaz, este último composto por três ilhotas. Essas ilhas são uns dos pontos mais orientais do território brasileiro (Figura 1). A ilha de Trindade se encontra por volta de 5.000 metros acima do fundo submarino e constitui a parte emersa de uma estrutura denominada cadeia de Vitória-Trindade (ALMEIDA, 1961; 1965; ULBRICH, 1994; MARQUES ET AL., 1999), constituída de vários montes submarinos distribuídos na região pelágica quase de forma linear na direção Leste-Oeste.

A ilha da Trindade está localizada sobre uma crosta oceânica formada por volta de 90 milhões de anos (MÜLLER et al. 1997 apud SANTOS et al., 2019, 2008) muito antes do vulcanismo que gerou a cadeia.

Os dados geoquímicos e dados isotópicos mostram características tipo OIB (WEAVE, 1990; MARQUES et al., 1999; SIEBEL et al., 2000). As idades K-Ar para a ilha de Trindade indicam por volta de 3.6 e 2.7 Ma e para a ilha de Martim Vaz, mais recente que 1 Ma (CORDANI, 1970; VALENCIO & MENDÍA, 1974; MOTOKI, 2012; PIRES et al., 2016; SANTOS 2019).

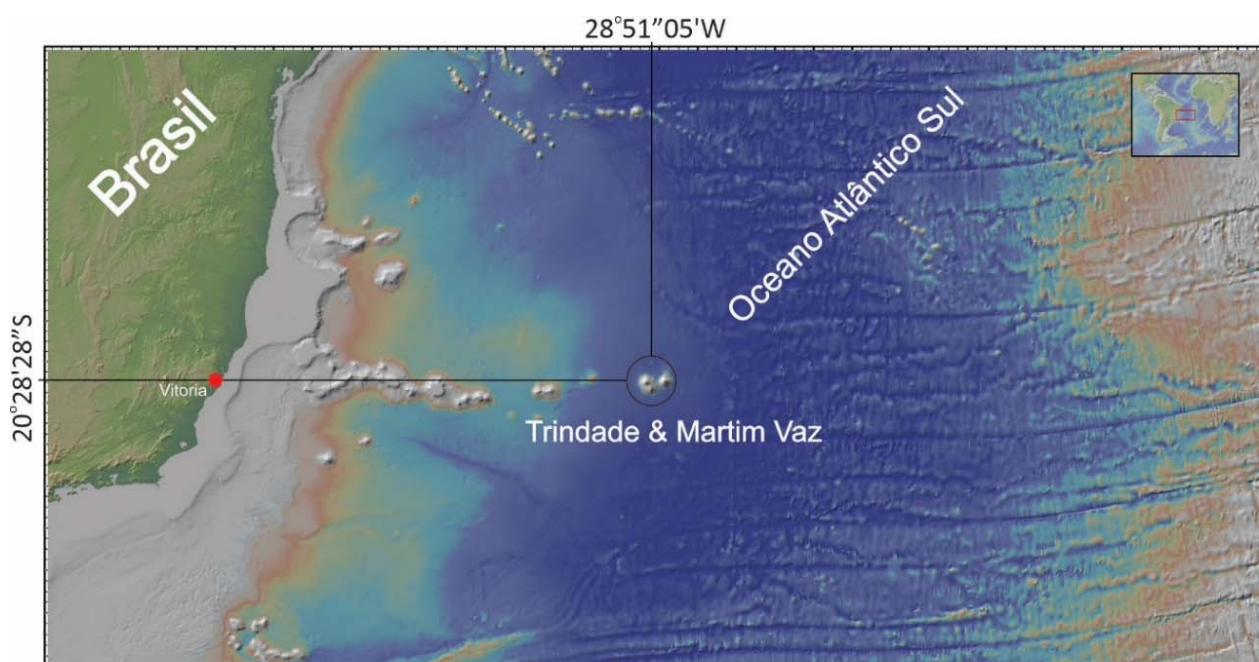


Figura 1: Localização da Ilha da Trindade e arquipélago Martim Vaz, Atlântico Sul, Brasil.
Figura feita com o aplicativo GeoMapApp (GEOMAPAPP, 2022).

1.1 Aerossóis Atmosféricos

Segundo Seinfeld et al. (2016), por definição aerossóis atmosféricos são partículas presentes na atmosfera provenientes de fontes naturais, como poeira transportada pelo vento, aerossóis marinhos e vulcões, e de atividades humanas, como a queima de combustíveis. Embora um aerossol seja tecnicamente definido como uma suspensão de partículas sólidas ou líquidas

finas em um gás, o termo comumente utilizado refere-se apenas à fração particulada. Os aerossóis atmosféricos, que consistem em partículas com diâmetro que varia de alguns nanômetros (nm) a várias dezenas de micrômetros (μm), são formados diretamente como partículas (aerossol primário) ou por meio de processos de conversão de gás para partícula na atmosfera (aerossol secundário). Após serem emitidas, as partículas podem modificar suas dimensões e composição por meio de condensação de espécies de vapor ou por evaporação, por aglomeração com outras partículas, por reação química ou por ativação em condições de supersaturação de água, transformando-se em gotículas de névoa e nuvem. Partículas com diâmetro inferior a $1 \mu\text{m}$ normalmente apresentam concentrações na atmosfera na faixa de cerca de dez a vários mil por cm^3 ; aquelas com diâmetro superior a $1 \mu\text{m}$ são encontradas em concentrações inferiores a 1cm^3 .

As partículas são eliminadas da atmosfera por meio de dois processos: deposição na superfície terrestre (deposição seca) e incorporação em gotículas de nuvem/chuva durante a formação de precipitação (deposição úmida). Devido ao fato de que a deposição seca e úmida resulta em tempos de residência relativamente curtos na troposfera e à distribuição geográfica das fontes de partículas ser altamente heterogênea, a concentração e composição dos aerossóis troposféricos variam consideravelmente ao redor do globo. Enquanto os gases traços atmosféricos têm tempos de vida que variam de menos de um segundo a mais de um século, os tempos de residência das partículas na troposfera variam de alguns dias a algumas semanas.

Os aerossóis atmosféricos podem afetar a pluviosidade local de várias maneiras. Em geral, os aerossóis reduzem a quantidade de luz solar que atinge a superfície da Terra, o que pode levar a uma diminuição da evaporação e, conseqüentemente, da formação de nuvens. Além disso, os aerossóis podem atuar como núcleos de condensação de nuvens, influenciando o tamanho, a distribuição e a duração das nuvens.

Esses núcleos de condensação de nuvens (NCN) podem influenciar o tamanho, a distribuição e a duração das nuvens. Porém, a presença de grandes concentrações de aerossóis antropogênicos pode ter efeitos divergentes na

chuva, tanto diminuindo quanto aumentando a precipitação, devido às suas atividades radiativas e de NCN (ROSENFELD, 2008; ANDREAE, 2008). Em nuvens tropicais primitivas com baixas concentrações de NCN, por exemplo, a precipitação pode ocorrer rapidamente, sem amadurecer em nuvens de longa duração, enquanto em outras condições, a redução da evaporação devido à presença de aerossóis pode levar à diminuição da formação de nuvens e, conseqüentemente, da pluviosidade local (TWOMEY, 1977).

No entanto, é importante notar que os efeitos dos aerossóis atmosféricos na pluviosidade local são altamente dependentes do clima e das condições atmosféricas locais. Além disso, os aerossóis também podem ter efeitos negativos na qualidade do ar e na saúde humana, tornando importante reduzir as emissões de aerossóis antropogênicos e monitorar cuidadosamente seus efeitos na atmosfera.

1.2 Gás Radônio

O Radônio é um gás nobre radioativo, denso, incolor, inodoro, insípido, solúvel na água e em fluidos orgânicos (e.g.: azeite de oliva, propano e etano). Existem três isótopos de Radônio com tempo de meia-vida que apesar de pequeno, pode afetar a saúde humana, temos o Radônio 222 referente a série do Urânio, o Radônio 219 da família dos actínídeos e o Radônio 220 da família do Tório, esses possuem meia vida de 3,82 dias, 3,96 segundos e 55,6 segundos respectivamente (Figura 2). O isótopo mais importante e potencialmente mais perigoso é o Radônio 222 que devido a sua meia-vida em relação aos outros isótopos e tem a capacidade de se concentrar em ambientes com baixa circulação de ar. Nos casos onde o Radônio 222 consegue se concentrar, sua ação cancerígena é extremamente alta, pois apesar de sua curta meia-vida, o mesmo, depois de absorvido pelo organismo através dos pulmões, se desintegrará através da emissão de partículas alfa, gerando assim os seus descendentes radioativos sólidos no interior do organismo humano, e que no seu conjunto são nocivos às células humanas e que desencadeiam os processos carcinogênicos através da quebra da molécula do DNA celular (WHO ,2009;

ICRP, 2010). O Radônio 222 apresenta alta atividade quando está associado com grandes concentrações de Urânio, Tório e da presença de rádio, seus descendentes. As rochas ígneas como granitos e pegmatitos, rochas sedimentares fosfatadas ricas em matéria orgânica e rochas metagranitóides e metasedimentares e seus respectivos solos podem conter mais que 100 ppm de Urânio (FAURE, 1986)

Nas rochas formadoras, uma fração de Urânio-Tório geralmente é dissolvida mais facilmente pela água subterrânea contaminando assim aquíferos com sais de Urânio e Rádio (GABELMAN, 1977; TIET, 1975; ADAMS et al., 1959)

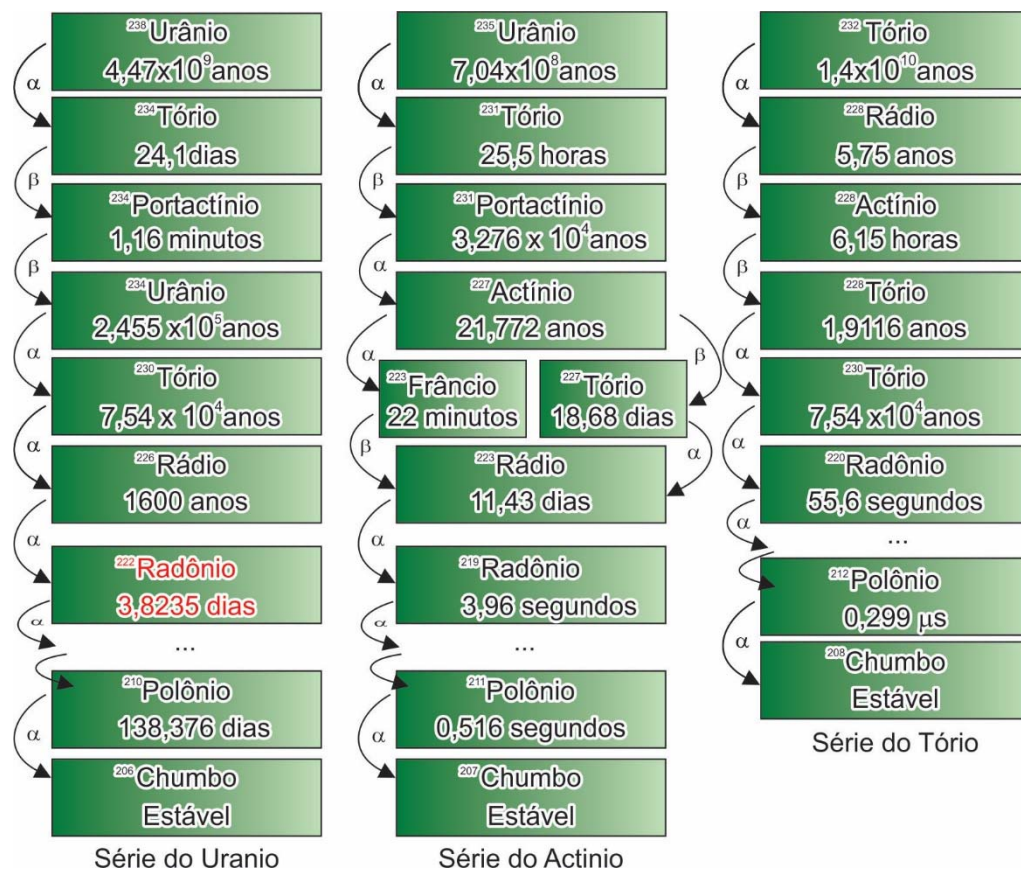


Figura 2: Séries radioativas naturais com destaque no elemento isótopo de Radônio 222.

1.3 Elementos radioativos e o fluxo de calor

A perda de calor por condução do interior da Terra controla os regimes térmicos litosféricos, que refletem tanto o calor das correntes de convecção do manto, quanto o calor gerado pelo decaimento radioativo. Esse é também

fornecido pelo calor primordial acumulado durante a acreção planetária inicial, subsequente segregação e cristalização do manto-núcleo terrestre e pelo decaimento radioativo de seus elementos produtores de calor radiogênico (EPCR) [POLLACK et. Al., 1993]. Atualmente, o fluxo global de calor radiogênico (FGCR) na superfície terrestre é devido aos EPCR, que têm meia-vida de desintegração semelhante à idade da Terra, que mesmo contribuem para o fluxo de calor geral do interior da Terra. Nomeadamente a série de decaimento radioativo de U-238 (meia-vida $\approx 4,5$ Ga), Th-232 (meia-vida ≈ 14 Ga) e K-40 (meia-vida $\approx 1,3$ Ga). Estes três radioisótopos são responsáveis por 98% da produção atual de calor terrestre. U-235 (meia-vida $\approx 0,7$ Ga) é outro isótopo de Urânio que também contribui para a produção de calor da Terra, mas devido à sua meia-vida mais curta, sua massa residual é inferior a 0,7% do Urânio total existente na Terra. A contribuição de isótopos radioativos de longa duração, como Rb-87 (meia-vida ≈ 49 Ga) e Sm-147 (meia-vida ≈ 106 Ga), é negligenciável para o calor global da Terra, devido às suas taxas de decaimento radioativo serem maiores que a idade da Terra. No entanto, na Terra primitiva havia isótopos radioativos com meia-vida curta (por exemplo: Al-26; Fe-60; Nb-92), que contribuíram significativamente para o calor radioativo, mas atualmente são indetectáveis (FAURE, 1986). As cordilheiras meso-oceânicas durante a formação da litosfera oceânica desempenham um papel significativo no fluxo de calor oceânico global, dissipando-o por convecção e solidificação magmática. Essa perda de calor da cordilheira oceânica é da ordem de 45% do fluxo de calor total da Terra. Por sua vez, a perda de calor através dos continentes é estimada em variar de 30 a 40% (MCKENZIE et al., 1969; SLEEP, 1969; POLLACK, 1977; VITORELLO, 1980; ARTEMIEVA et al., 2001; GOESA et al., 2020).

A maioria das ilhas vulcânicas oceânicas está associada a atividades de pontos quentes. Esses pontos quentes são alimentados por uma região profunda no manto da Terra, de onde o calor sobe por correntes de convecção. Esse calor facilita a fusão de rochas na base da litosfera, onde a parte superior e quebradiça do manto encontra a crosta terrestre, gerando magmas, que muitas vezes ultrapassam a superfície da crosta oceânica e continental, por meio de fraturas, gerando vulcões (KOPPERS, 2021).

Essa tese foi confeccionada a partir do desenvolvimento dos artigos publicados durante os anos de 2020 – 2023. Foram estes “A influência da desintegração do Radônio transportado pela evapotranspiração das plantas na formação de aerossóis atmosféricos em ambiente de florestas continental e insular.” (BJRS), “Gamma radiation of the street corners from South zone of Natal city, Rio Grande do Norte, Brazil.” (BJRS), e “Mapping of Surface Radiogenic Heat Production from Chemical Data and Gamma Ray Spectrometry of volcanic rocks from the Trindade Island, South Atlantic Ocean, Brazil.” (Submetido, AABC).

2. Objetivo

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de metodologia para avaliar o impacto climático da formação de aerossóis atmosféricos gerados por indução iônica devido à desintegração radioativa do gás Radônio e seus descendentes. Através da execução do levantamento Radôniométrico e dos aglomerados iônicos (na atmosfera baixa de áreas de floresta natural e desmatada), com a finalidade avaliar distribuição de Radônio no referidos compartimentos ambientais, como a sua influência na formação dos aglomerados iônicos existentes em áreas insulares e continentais com e sem cobertura florestal, bem como o levantamento superficial da Radiação Gama nas diferentes formações rochosas das áreas estudadas, a fim de se calcular o fluxo do calor radiogênico ilha de Trindade.

3. Geologia Geral

3.1 A ilha de Trindade

A ilha de Trindade fica a 1.140 km da costa brasileira, localizada em 20°28'28 "S e 28°51'05"O está a cerca de 48 km a oeste do Arquipélago de Martim Vaz (Figura 1) e possui cerca de 600 m de elevação acima do nível do mar (Figura 3). Esta ilha vulcânica é um marco geológico importante do Brasil,

pois preserva a atividade vulcânica alcalina sub-saturada mais jovem da idade do Plio-Pleistoceno e apresenta diferentes estruturas piroclásticas (Figura 4). Nesta ilha, é exposto o único cone vulcânico preservado do Brasil: o vulcão Paredão (CORDANI, 1970; ALMEIDA, 1961).

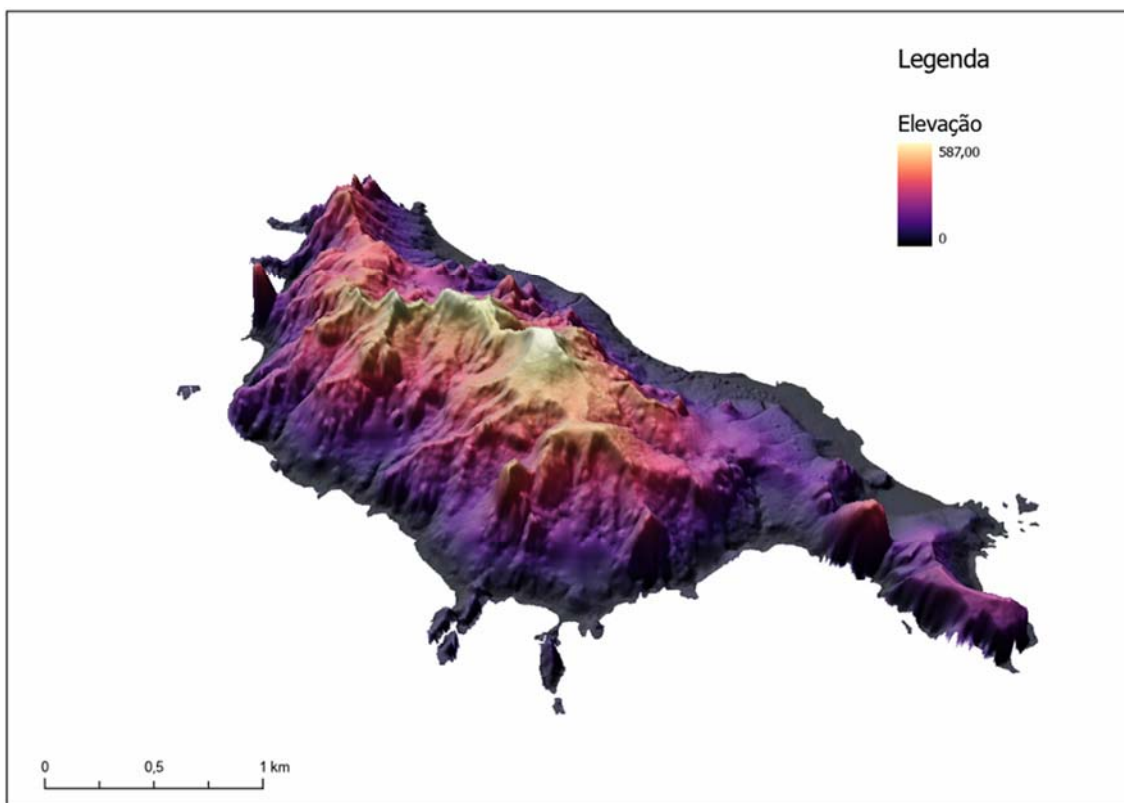


Figura 3: Modelo digital de elevação criado a partir de dados de LIDAR via Drone (Dados fornecidos por Nogueira).

A descoberta da Ilha da Trindade e do Arquipélago de Martim Vaz (Figura 1) ocorreu em 1501. O nome da Ilha da Trindade aparece pela primeira vez na carta náutica do italiano Vesconte di Maggiolo, datada de cerca de 1504. No entanto, devido às dificuldades de calcular a longitude naquela época, no mapa de Kunstmann III, datado de cerca de 1507, a localização da ilha de Trindade aparece em duas posições e com os nomes Acensam e At'nidade, e a Ilha de Martim Vaz aparece nesse mapa em três posições como Martim Vas, V. Queschon e Santa Maria d'Agosto (ALVES et al., 2016; ALVES, 1998).

Por volta de 1700, o capitão Edmond Halley, famoso astrônomo e matemático inglês, reivindicou a ilha como posse britânica em nome do rei William III da Inglaterra, Escócia e Irlanda, e foi a primeira expedição a desembarcar na ilha durante sua navegação. Sir Edmond Halley, sem as devidas

intenções, gerou até os dias atuais o primeiro desastre ecológico brasileiro, pois ao deixar a ilha, ele desembarcou cabras e porcos para servir como alimento para navegadores ou náufragos que desembarcassem na ilha, uma prática comum na época. Ao longo dos trezentos anos de vida selvagem, esse rebanho de cabras se tornou o maior problema ecológico, pois devastou grande parte da flora nativa e contribuiu para a erosão em várias partes da ilha. A situação é tão grave que em algumas áreas o solo já foi completamente lixiviado pelas chuvas, formando enormes fendas, sulcos e causando um certo impacto na paisagem da ilha. A última cabra foi abatida pela Marinha do Brasil em meados do século XX (SILVA et al.,2011; SECIRM, 2017).

Devido a esse desastre ecológico, as rochas ficaram expostas na superfície possibilitando o estudo das mesmas com maior acessibilidade, porém acelerando o processo erosivo do local.

A ilha de Trindade é constituída por cinco formações geológicas. A Formação Trindade, a mais antiga, é constituída por dois tipos de erupção, a mais antiga é constituída por piroclastos olivina-nefelínico e diques fonolíticos e a mais recente por piroclastos e diques fonolíticos, de idades entre 3,9 Ma e 2,77 Ma com cerca de 500 metros de espessura. Sequencialmente, temos a Formação Desejado, que erupuiu entre 2,77 e 1,1 Ma, com cerca de 300 metros de espessura, e se localiza nas partes mais altas da ilha. Esta formação é constituída por lavas nefelínicas e depósitos piroclásticos. Essas idades foram obtidas por diversos autores utilizando datações K-Ar e Ar-Ar (CORDANI, 1970; VALENCIO & MENDÍA, 1974; MOTOKI, 2012; PIRES, 2016).

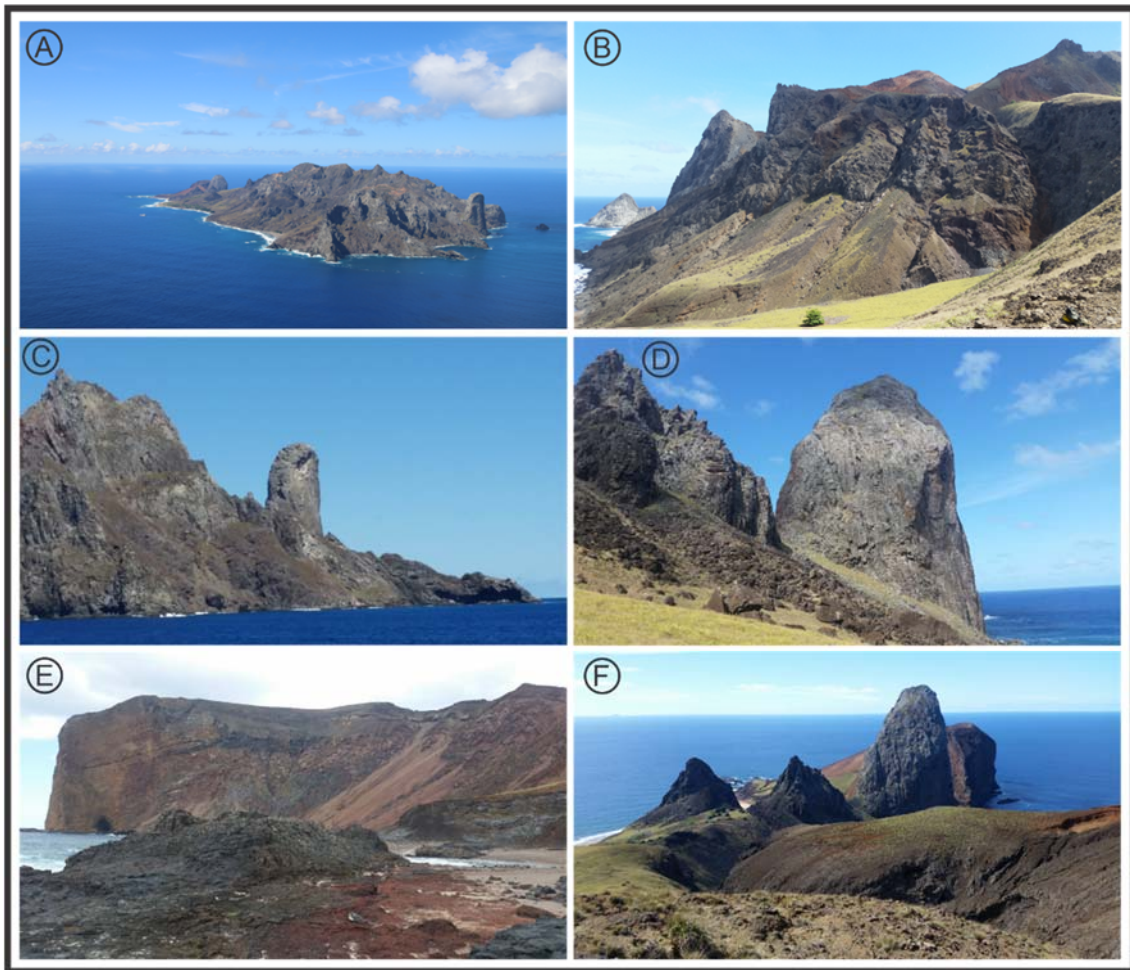
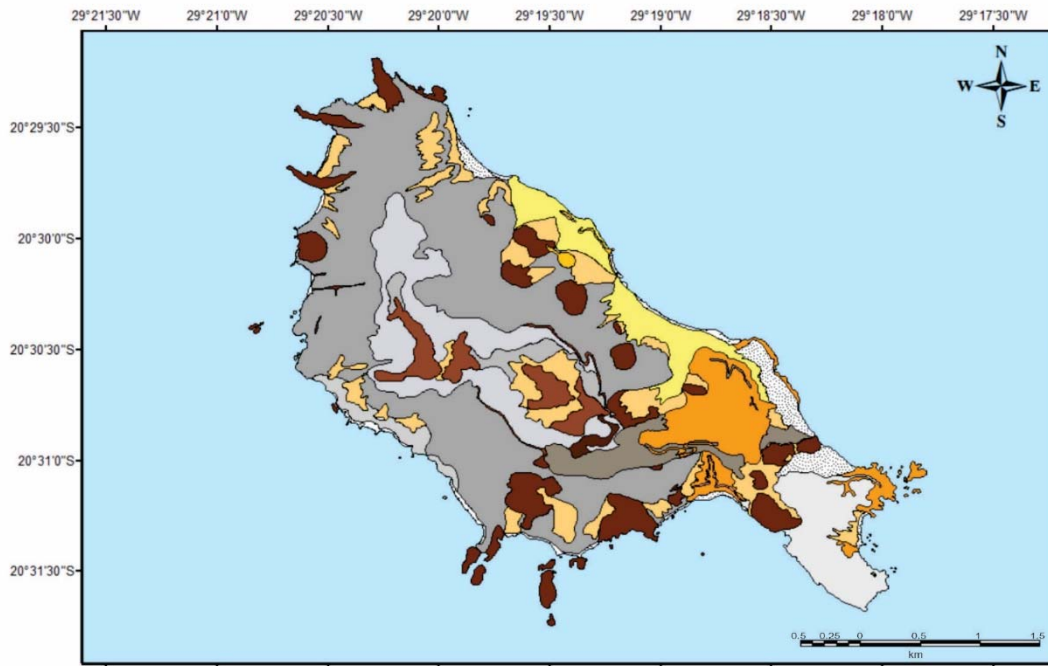






Figura 4:Imagens da Ilha da Trindade: A) Visão geral da ilha; B) Complexo Trindade, pico Desejado (620 m), pico São Bonifácio (570 m) e pico Trindade (590 m); C) Pico monumento (270 m), neck fonolítico; D) Pico do Pão de Açúcar (392 m), neck fonolítico, próximo ao vulcão Paredão; E) Vulcão Paredão (217 m) e seu semicone vulcânico; F) Visão geral da vertente oeste do vulcão Paredão e do Pão de Açúcar, neck fonolítico.





Legenda

Litologia



Rochas sedimentares

-  - Talude
-  - Aluvião
-  - Cascalho e conglomerado
-  - Areia e calcarenito




Formação Vulcão do Paredão

-  - Depósitos piroclástico de olivina-nefelina
-  - Depósitos efusivos de olivina-nefelina





Formação Valado

-  - Tufos
-  - Nefelinas ricas em olivina

Formação Morro vermelho

-  - Tufos
-  - Depósitos piroclástico olivina-nefelítico
-  - Depósitos efusivos ricos em olivina-nefelina

Formação Desejado

-  - Depósitos piroclásticos não diferenciados
-  - Depósitos piroclásticos e efusivos de nefelina sem olivina
-  - Depósitos efusivos fonolito-nefelínico
-  - Depósitos e domos de fonolito efusivo

Formação Trindade




-  - Neck fonolítico
-  - Depósito piroclástico nefelina rico em olivina
-  - Depósito piroclástico fonolítico

Figura 5: Mapa geológico da Ilha da Trindade, Atlântico Sul, Brasil. Cores do mapa geológico de acordo com o United State Geological Survey (Modificado de Almeida, 1961).

Depositado mais acima das formações anteriores temos a Formação Valado, formada por vulcanismo melilita-olivina nefelínico e tufos vulcânicos, a menor em quesito de deposição com aproximadamente 60 metros de espessura. Após esse vulcanismo da Formação Valado, temos a Formação Morro Vermelho, que é constituída por lavas basálticas ricas em olivina. E por fim, temos a Formação Vulcão do Paredão, constituída por tufos, tufos estratificados, lavas

ricas em olivinas e pumíces ambas formações com espessura em torno de 250 metros (Figuras 5 e 6).

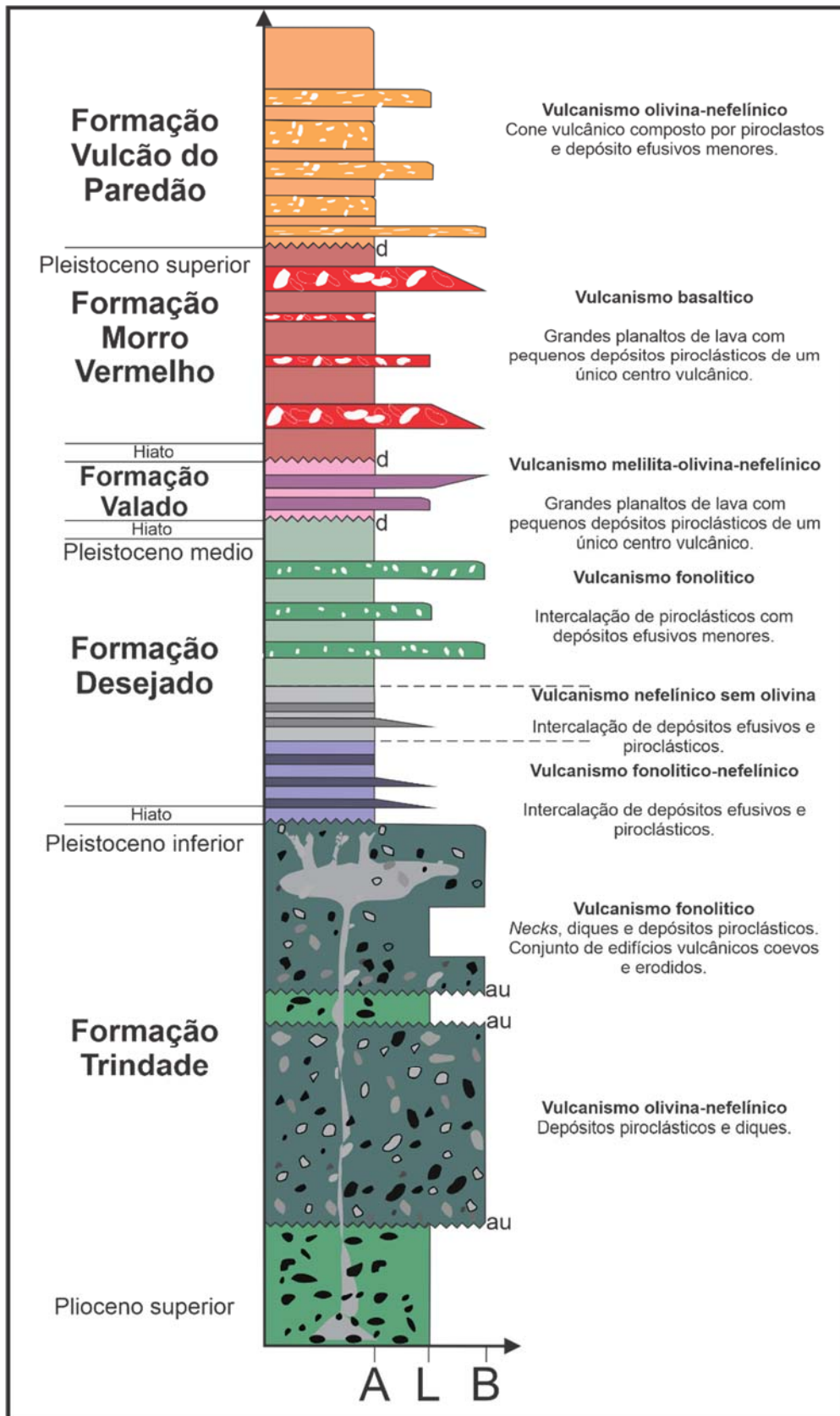


Figura 6: Coluna estratigrafica da ilha de Trindade. Apud Santos et al. (2019)

O clima da ilha Trindade é do tipo oceânico tropical, com temperatura média anual de 25°C, sendo o mês de fevereiro o mais quente (30°C) e o de agosto o mais frio, com temperatura em torno de 17°C, de abril a outubro a ilha sofre invasão periódica de frentes frias provindas do Sul, a precipitação média anual é de 923 mm, mas muito variável, o seu sistema de drenagem é pouco expressivo, com baixa vazão, devido a rala cobertura vegetal e de solo. Este fato faz com que seus vales sejam formados por ravinas íngremes devido à forte ação erosiva das chuvas torrenciais esporádicas conhecidas localmente como “piraquês”.

3.2 Parque das Dunas, Natal

A cidade de Natal está localizada no Rio Grande do Norte, Brasil (05° 47' 42" S, 35° 12' 34" O) possuindo cerca de 896,708 habitantes (IBGE, 2021). A cidade foi construída sobre um terreno de dunas que cobrem a Formação Barreiras, esse composto, em sua maioria, por rochas sedimentares não consolidadas e raramente por frações consolidadas. Em geral são facilmente transportados por ações eólicas e são bastante frágeis. Um terreno de dunas da Formação Barreiras As dunas não fazem parte da Formação Barreiras, elas são recentes e provem de areias de todo o Atlântico!

A Formação Barreiras é notável por suas falésias e recifes costeiros cobertos por depósitos de arenitos com incrustações de algas calcárias, briozoários e corais. Esses recifes costeiros atuam como uma barreira natural, protegendo a costa da força das ondas e criando praias calmas e piscinas naturais. Além disso, as áreas de lagunas e estuários ao longo deste trecho do litoral abrigam manguezais e cristas de praias moldadas pelos ventos do sudeste, formando campos de dunas. Vale destacar que a formação de recifes costeiros é limitada na região mais ao sul devido à presença de sedimentos em suspensão, transportados pelo Rio São Francisco (DA CUNHA E GUERRA, 1998 apud FRACASSO, 2005).

O parque das Dunas (Figura 7) se localiza na cidade de Natal e foi fundado em 1977 como a primeira Unidade de Conservação no estado do Rio

proveniente da desintegração do Radônio presente no solo, ele não pode contribuir diretamente para as concentrações de aerossóis na atmosfera florestal, o que sugere a existência de outro mecanismo que transporta o Radônio dos solos para a atmosfera baixa. Nesse caso JAYARATNE, LING & MORAWSKA (2011) sugeriram que o Radônio e seus descendentes são transportados a partir das águas subterrâneas pela evapotranspiração das árvores e plantas para a atmosfera baixa. Por tudo isso, a pesquisa apresentada nesse trabalho, baseia-se na premissa de que existe uma correlação intrínseca entre a formação dos aerossóis atmosféricos e a radiação ionizante proveniente da desintegração do Radônio em áreas com cobertura vegetal, e que essa correlação ocorre em qualquer parte da Terra onde existe cobertura florestal (DANTAS et al., 2022; MEGONIGAL, BREWER & KNEE, 2019; JAYRATTNE & MORAWSKA, 2011; MARTENS et al., 2004; USSLER III *et al.*, 1994).

5. Metodologia

5.1 Gás Radônio e aglomerados iônicos.

A geobiodisponibilidade do gás Radônio e sua emissão se encontram intimamente ligada ao estado de alterabilidade da matriz rochosa e dos sedimentos dela derivados. Fato este que desempenha um grande papel na produção do referido gás e na sua participação nos gases de solos, que por sua vez se encontra intimamente associada à concentração e distribuição de seus progenitores (Rádios 228 e 226). Todas as medições foram executadas em dois períodos do ano, nomeadamente durante as estações seca e a úmida, e estão restringidas as horas diurnas, de modo a se evitar a marcada diferença entre as concentrações de aglomerados iônicos e da exalação de gás Radônio entre o período diurno e noturno. Estas medições atmosféricas foram realizadas a um metro da superfície dos solos, em condições de bom tempo e temperaturas entre 20 e 30° C.

Os dados de gás Radônio, aglomerados iônicos e Radiação Gama superficial foram coletados na floresta de samambaias gigantes da ilha de Trindade e na mata Atlântica dunar nos municípios de Parnamerim, no Rio Grande do Norte.

Para a emanotria do gás Radônio foi utilizado o emanômetro AlphaGuard® PRO da GENITRON (Figura 8) Esse instrumento mede e registra a concentração de Radônio no ar, tanto no modo passivo, como no ativo, simultaneamente com a leitura da umidade relativa do ar, da temperatura ambiente e da pressão atmosférica, usando seus sensores integrados. O AlphaGuard tem a capacidade de medir Radônio na atmosfera, na água, no solo, nos materiais de construção,

A coleta foi feita na floresta das samambaias na ilha de Trindade a 600 metros acima do nível do mar e na mata dunar atlântica 100 m acima do nível do mar, utilizando-se da função de medição passiva, que deixa o ar entrar no aparelho por difusão através da câmara localizada na parte de trás do aparelho, assim medindo a quantidade de gás Radônio que interage com o aparelho (Bq/cm^3). Simultaneamente, foi feita a medição dos aglomerados iônicos na atmosfera.

Para tal, usou-se dois contadores de íons atmosféricos, modelo Air-Ions Counter da AlphaLab® para medir os aglomerados de íons. Um dos aparelhos ficava responsável pela aquisição dos íons positivos (Cations) e outro pelos íons negativos (Anions) (Figura 8a).

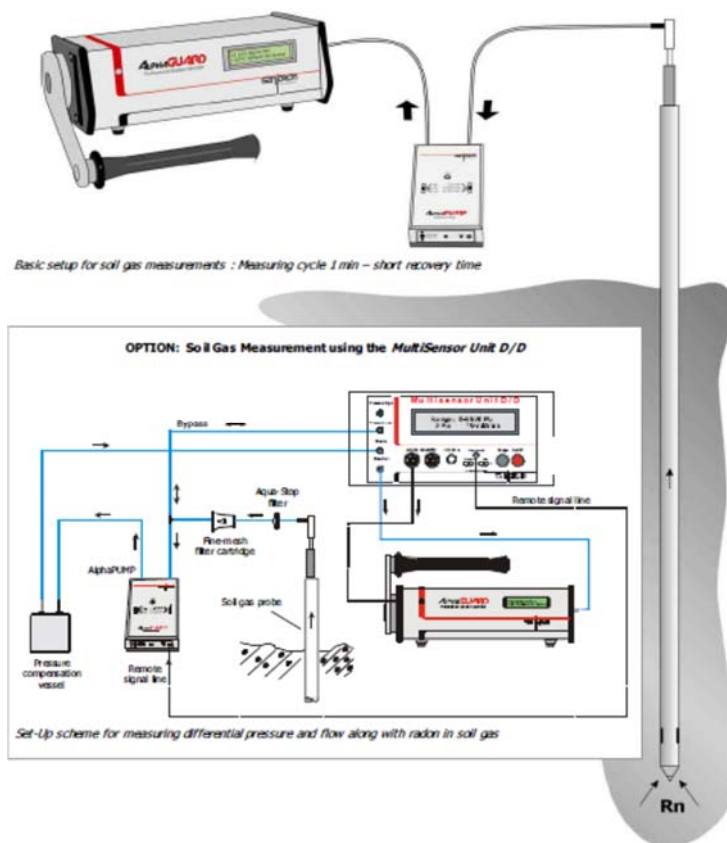


Figura 8: (a) Foto do AlphaGuard® PRO (GENITRON INC); b) Air Ions Counter da AlphaLab® medindo o gás Radônio e o íons na floresta de samambaias Trindade. (b) Esquema de funcionamento do AlphaGuard® PRO (SAPHYMO, 2009)

Essas medidas foram realizadas ao longo de cinco dias. Os dados sobre os íons e Radônio aqui analisados foram restritos ao período permitido pela Marinha do Brasil (trabalhos diurnos). Este fato não alterou a presente pesquisa, visto que a evapotranspiração das plantas só ocorre no período diurno (MEGONIGAL, BREWER & KNEE, 2019; TRUMBORE et al., 1990 JAYARATNE et al., 2011)., em condições climáticas favoráveis, com a temperatura do ar entre 20 e 30°C, de modo a se evitar as conhecidas variações diurnas acentuadas nas concentrações do Radônio e dos íons atmosféricos.

5.2 Espectrometria de Radiação Gama e coleta de amostras

Para medir a Radiação Gama superficial foi utilizado o espectrômetro portátil de raios Gama RS-230® (com cristal de Germanato de Bismuto: BGO) da RADIATION SOLUTION (Figura 9).

Com o RS-230®, foram medidos 481 pontos a cerca de 80 cm acima da superfície rochosa, com um tempo de amostragem de 360 s seguindo as metodologias recomendadas pela Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) para afloramentos de baixa radioatividade. A partir do valor da Radiação Gama total medida em desintegração por minuto ou dose total nGy/h, o instrumento discrimina quais são os isótopos radioativos maiores responsáveis por ela, nomeadamente, Urânio, Tório e Potássio 40, os teores são dados em atividade equivalente em partes por milhão (ppm) para o U e Th, e em porcentagem (%) pra o K-40.

Por fim, foram coletadas 77 amostras de rocha vulcânica de forma aleatória, a 10 a 20 cm abaixo da superfície, para reduzir os efeitos da alteração meteórica. Foi efetuada a espectrometria Gama em pontos amostrais e também em outras áreas da Ilha da Trindade e são representativas de todas as litologias vulcânicas presentes na ilha (n: 481). Como referência foram usadas as amostras de CORDANI, 1970.

A análise em laboratório foi executada com detector de germânio de alta pureza (HPGe) modelo GC-3020 da Canberra (modelo de blindagem 747, câmara de 252 cm³ e 10 cm de chumbo de baixo fundo, superfície interna

revestida com 1 mm de lâmina de estanho e 1,6 mm de lâmina de cobre, exterior de blindagem revestido com 9,5 mm de aço com baixo percentual de carbono). O tempo de contagem (tempo de vida útil) utilizado para obter os espectros de atividade de fundo e de amostra foi de 8 horas. O sistema multicanal utilizado foi o DSA 1000 (Analisador de Espectro Digital), com 8192 canais, com faixa de energia de 50 KeV a 2 MeV. A calibração de energia foi realizada com a ajuda do software de análise de raios Gama Genie 2K, utilizando fontes radioativas certificadas, totalizando cinco pontos experimentais correspondentes aos picos do ^{137}Cs (0,6617 MeV), ^{60}Co (1,17 e 1,33 MeV) e ^{152}Eu (0,1218 e 0,3443 MeV). As análises químicas de rocha total foram realizadas no laboratório ALS-CHEMEX (Vancouver, Canadá) e as concentrações de elementos traço por ICP-AES (Varian/Vista) e ICP-MS (Perkin-Elmer/ELAN-800). As densidades específicas de rocha total foram medidas pelo QUANTACHROME ULTRAPYC 1200E com célula de 10 cm³ (Precisão: $< \pm 0,03\%$ g/cm³; Repetibilidade $< \pm 0,015\%$ g/cm³). As coordenadas das medições são registradas automaticamente pelo RS-230, via bluetooth ligado um GPS externo.



Figura 9: a) Foto do RS-230® (RADIATION SOLUTION INC.) (b) Foto mostrando o processo de medida dos elementos radioativos superficiais utilizando o espectrômetro Gama portátil.

Considerando o período de execução do programa de doutorado e as nossas restrições metodológicas de campo, realizou-se três expedições para a ilha de Trindade, duas de curta duração (cerca de uma semana) e uma durante o período de 2 meses, assim como várias idas a Parnamerim, no Rio Grande do Norte.

6. Desenvolvimento e Resultados

6.1 Assinatura do Gás Radônio e sua relação com a evapotranspiração

Os dados coletados de íons e gás Radônio foram plotados em dois gráficos e comparados com outras duas áreas para mostrar as peculiaridades da área de estudo. Devido a cobertura de solo ser fina na ilha de Trindade e a rocha ígnea estar a poucos metros de profundidade. Os dados de Radônio se mostram mais altos que os da literatura devido a geologia do local, seu solo e tipo da vegetação da área. Entretanto os resultados das variações tanto de Radônio quanto de íons totais foram similares aos da literatura seguindo uma tendência de crescimento no início da manhã e uma leve queda após o meio dia e segue crescendo até o final do dia.

Os dados foram projetados graficamente, onde se observa as variações diurnas dos níveis e íons derivadas e de emissão de gás Radônio em observações nos diferentes tipos de florestas (dentro e fora delas): floresta atlântica do Parque das Dunas (Natal-RN) no Nordeste do Brasil, floresta de samambaias gigantes da Ilha Trindade e no Sudeste do Brasil (ES). A título de comparação, nesses gráficos também projetamos dados sobre florestas de eucaliptos localizada na Austrália e da floresta amazônica brasileira. Todas as curvas apresentam tendência de crescimento de Radônio esperado pela manhã. No entanto, para o caso dos dados do Parque das Dunas podemos ver que há outra ascensão na parte da tarde (Figura 10).

Para o caso específico dos íons é notável um crescimento bem mais acentuado nos dados de floresta das samambaias em Trindade tendo uma

tendência de crescimento continua dentro do intervalo medido no campo. Essa se repete fora de floresta de samambaias, entretanto de forma muito mais amenizada indicando que são da desintegração do Radônio e seus descendentes radioativos. Os dados coletados de íons atmosféricos relativos ao Parque das Dunas demonstraram baixas tendências comparados as áreas de referências, isso se deve ao regime de ventos da região que dispersam os aerossóis presentes na área (MOTOKI et al., 2020).

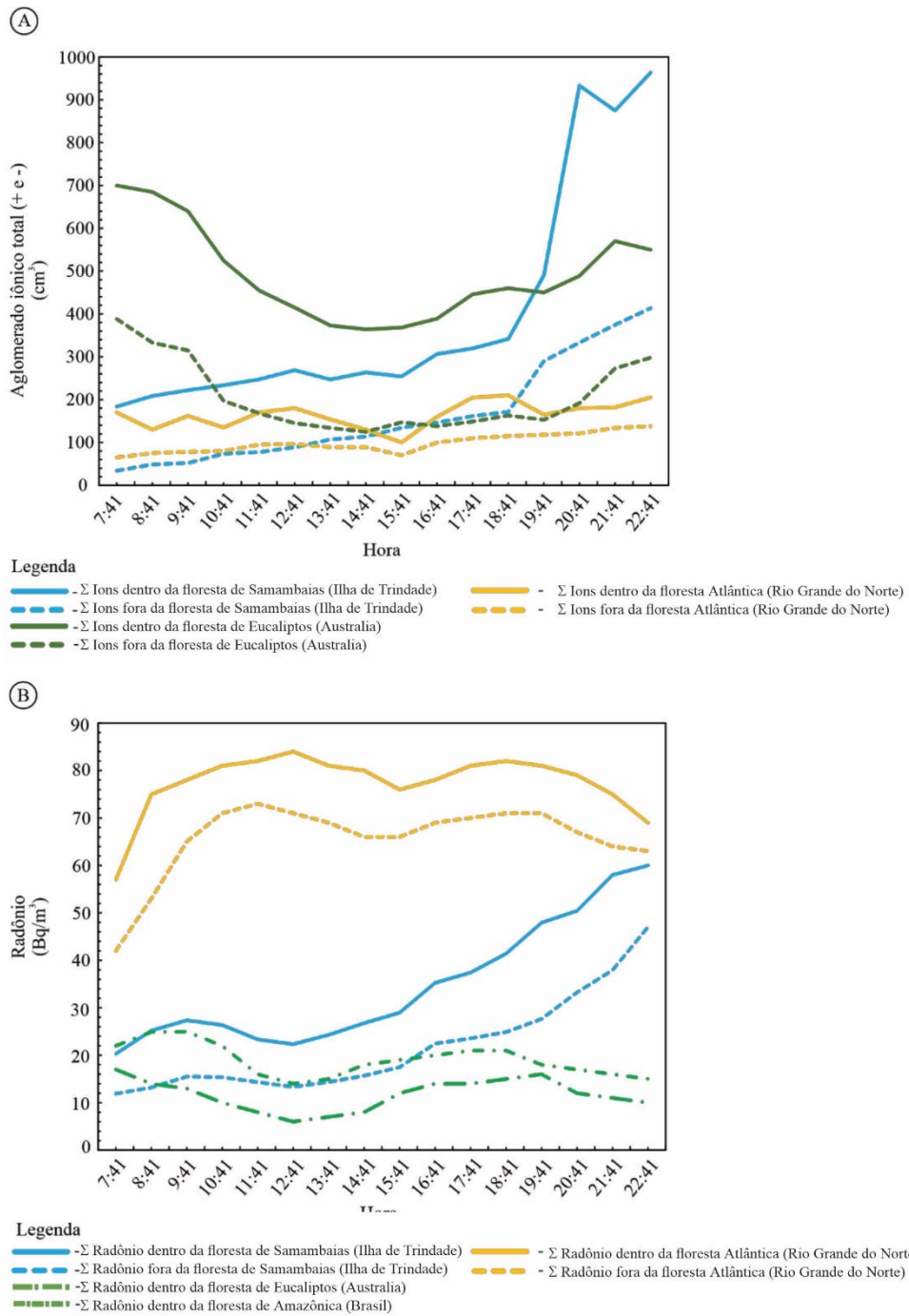


Figura 10: A) Variação dos íons Total (+ e -) ao longo do dia, em diferentes tipos de florestas; B) Variação do gás Radônio ao longo do dia, em diferentes tipos de florestas (Modificado de MOTOKI, 2020).

6.2 Comparação entre a Química de Rocha Total e a Espectrometria de Raios Gama in Situ.

Os dados da espectrometria de Radiação Gama superficial e os dados provenientes das amostras coletadas foram analisados e distribuídos no mapa da ilha de Trindade conforme as coordenadas individuais de cada ponto para efeito de comparação as amostras de CORDANI, 1970 também foram colocadas juntamente com os dados de campo (Figura 11).

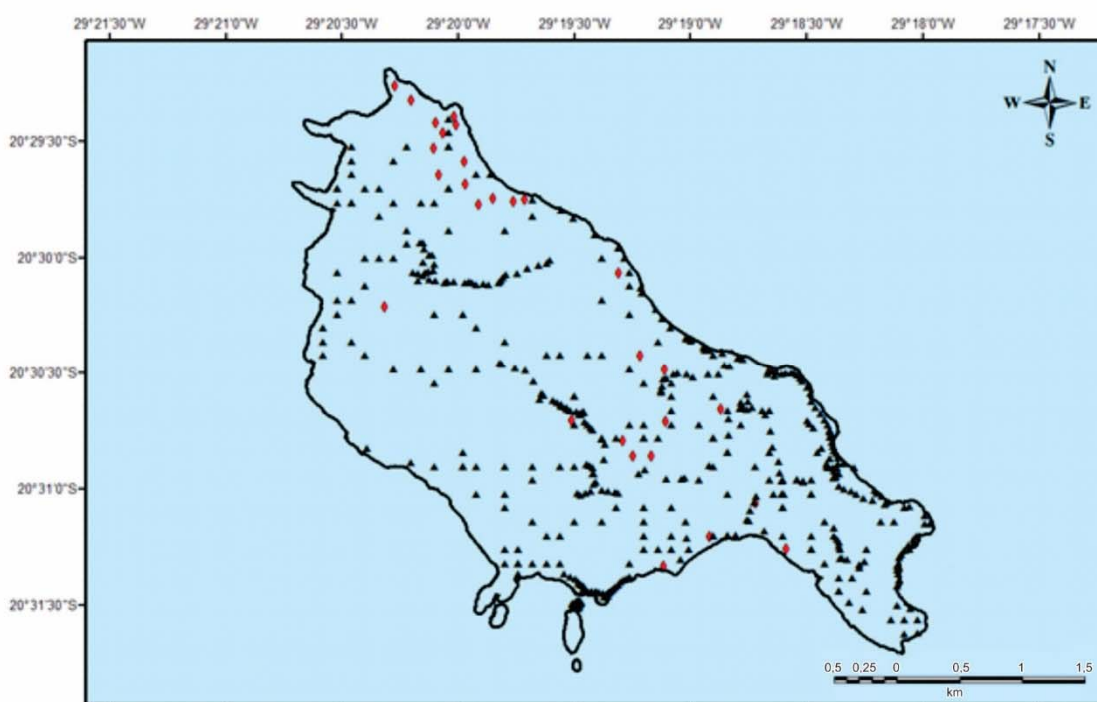


Figura 11: Amostragem: Localização de todas as amostras de rocha e pontos medidos por espectrometria Gama na Ilha da Trindade. Triângulo preto: Todas as amostras de rocha e pontos medidos espectrometria Gama. Diamante vermelho: amostras de CORDANI, 1970.

A Tabela 1 apresenta a produção de calor na superfície (PCS) por análise química de rochas inteiras e por espectrometria de raios Gama (ERG) de rochas vulcânicas da Ilha Trindade, Oceano Atlântico Sul, Brasil. A taxa de dose em nGy/h foi calculada usando a relação descrita por BECK, 1972.

As Figuras 11 e 12 mostram a classificação petrologica baseada na composição dos principais elementos, R1 x R2 (DE LA ROCHE, 1980) e Alcalis Totais x SiO₂ (BAS, 1986) respectivamente.

A comparação dos resultados da análise de ativação neutrônica de rocha total (AAN) e espectrometria de raios Gama (ERG) é apresentada na Tabela 2 e representada nos Figuras 13 e 14. Todas as rochas apresentam uma boa correlação linear entre os radionuclídeos medidos, com intercepção próxima de zero, exceto o potássio em rochas intermediárias, que apresentam dados de ERG mais altos do que os valores de AAN (Figuras 13 e 14). Os teores de Urânio e Tório das amostras e a relação Th/U são variáveis e estão abaixo da média crustal de 3,9 (PALME, H. & O'NEILL, 2014) sendo os teores de Tório e Urânio responsáveis por mais de 50% da radiação Gama superficial na Ilha da Trindade, com a radiação Gama do Tório predominando sobre os outros dois isótopos analisados (Figura 15).

A justificativa para tais diferenças é geológica uma vez que a camada de solo presente na ilha de trindade é bastante fina. Utilizando o mapa geológico como base podemos fazer uma análise de intensidade de assinaturas e combinando com os histogramas temos a frequência de ocorrência para cada formação.

Tabela 1: Síntese estatística de EPCS de rochas vulcânicas de Trindade: Ilha, Oceano Atlântico Sul, Brasil: A) por análise química de rocha total (AAN) e densidade, Ilha, Oceano Atlântico Sul, Brasil; B) por espectrometria de raios Gama e densidade.

(A)

Tipo de rocha Vulcanica	Classificação Petrologica		U (ppm)	Th (ppm)	K (ppm)	ρ (Kg/m ³)
Intermediario	Fonolito, Fonolito Peralcalino, Traqui-Fonolito (n: 48)	Max	18.00	42.00	7.14	2760
		Mín	1.30	11.40	5.11	2440
		Med	6.70	22.50	6.18	2680
		MG	6.04	23.23	6.16	2631
		σ	4.03	6.01	0.48	108
Basico	Fonotefrito, Tefrito (n: 6)	Max	9.40	28.30	5.57	3000
		Mín	1.17	6.30	0.33	2777
		Med	4.15	12.40	2.85	2965
		MG	3.78	12.75	1.87	2913
		σ	2.94	7.86	1.92	91
Ultrabásico	Basanita, Nefelina, Ankaratrito (n: 23)	Max	11.20	12.30	4.62	3330
		Mín	0.63	2.80	0.26	2770
		Med	1.90	6.80	1.55	3140
		MG	2.02	6.87	1.16	3122
		σ	2.67	2.70	1.32	128

ANN: Análise de ativação neutronica ; Max: Maximo; Mín: Mínimo; Med: Mediana; MG: Média Geometrica; σ : Desvio padrão

(B)

Tipo de rocha Vulcanica	Classificação Petrologica		U (A.eq)	Th (A.eq)	K (A.eq)	ρ (Kg/m ³)
Intermediario	Fonolito, Fonolito Peralcalino, Traqui-Fonolito (n: 48)	Max	18.33	42.20	7.36	2760
		Mín	1.54	11.55	5.22	2440
		Med	6.99	22.73	6.36	2680
		MG	6.40	23.38	6.32	2631
		σ	4.01	5.97	0.49	108
Basico	Fonotefrito, Tefrito (n: 6)	Max	9.55	28.40	5.66	3000
		Mín	1.32	6.46	0.58	2777
		Med	4.40	12.60	3.00	2965
		MG	4.03	12.96	2.25	2913
		σ	2.78	7.45	1.91	91
Ultrabásico	Basanita, Nefelina, Ankaratrito (n: 23)	Max	11.45	12.50	4.88	3330
		Mín	9.53	3.08	0.51	2770
		Med	1.75	6.97	1.72	3140
		MG	1.83	7.13	1.51	3122
		σ	2.64	2.63	1.28	128

ERG: Espectrometria de raios Gama ,A eq: Atividade equivalente; Max: Maximo; Mín: Mínimo; Med: Mediana; MG: Média Geometrica; σ : Desvio padrão

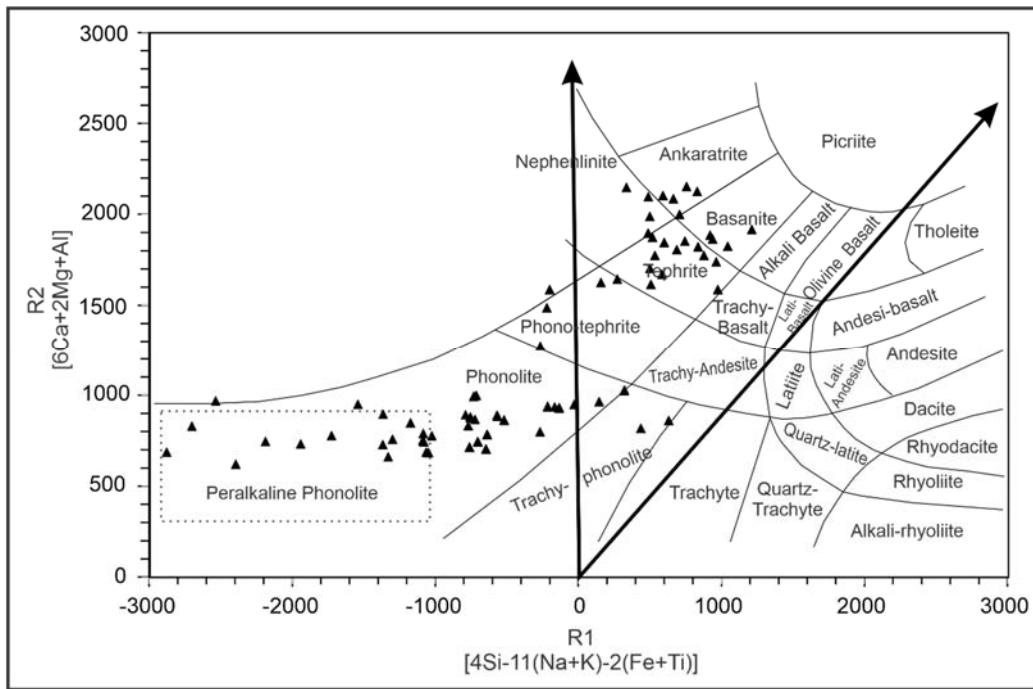


Figura 12: Diagrama R1 versus R2 {[4Si-11(Na+K)-2(Fe+Ti)] versus [6Ca+2Mg+Al]} das ro vulcânicas da Ilha da Trindade, Oceano Atlântico Sul, Brasil. Baseado em DE LA RO (1986).

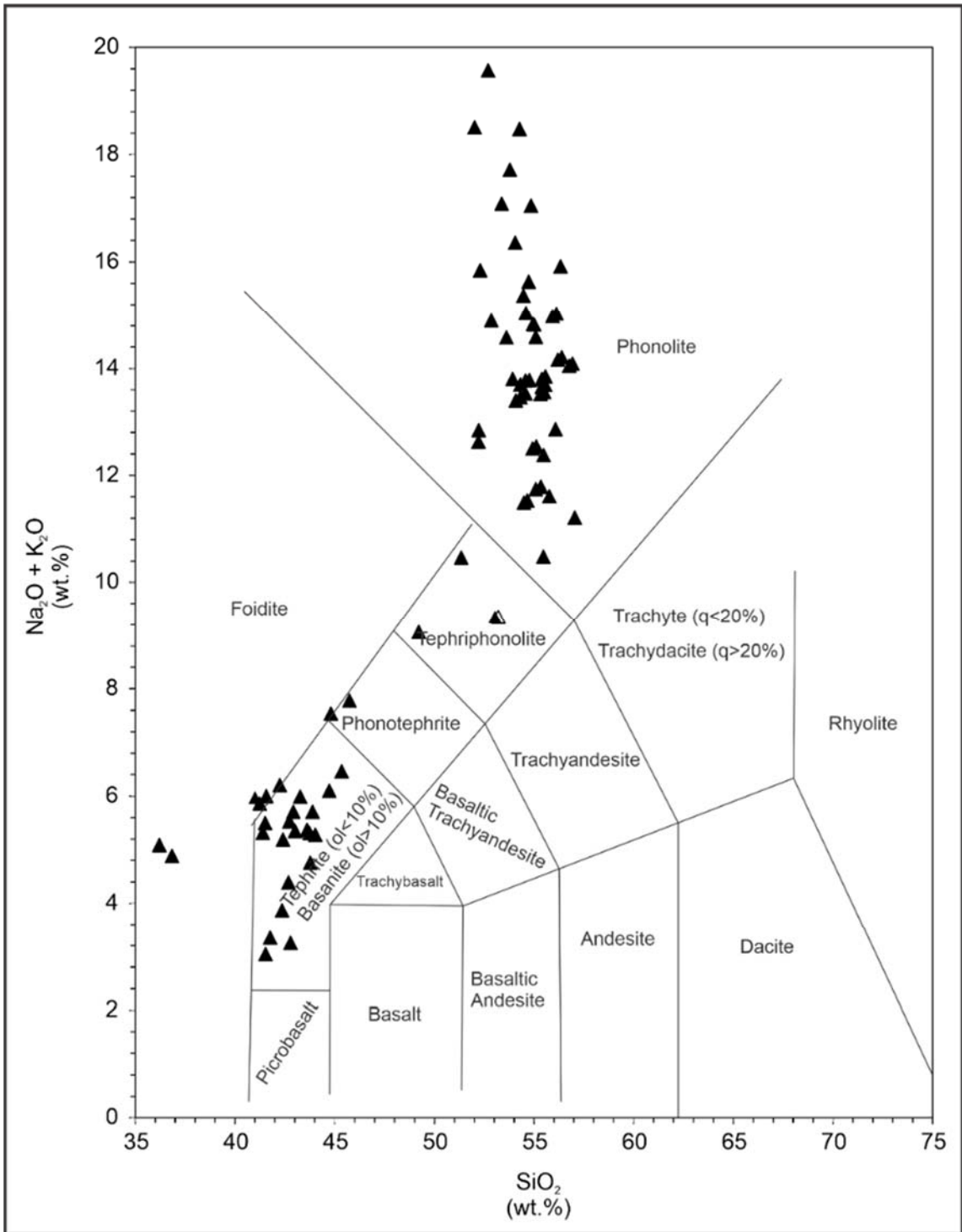


Figura 13: Diagrama de Alkali Totais versus SiO_2 das rochas vulcânicas da Ilha da Trindade, Oceano Atlântico Sul, Brasil. Baseado em BAS et al. (1986).

Tabela 2: Coeficientes de regressão linear de AAN versus ERG de U, Th e K de rochas vulcânicas da Ilha da Trindade, Oceano Atlântico Sul, Brasil, apresentados na Tabela 1.

Tipo de Rocha	Correlação	Interceptação	Declividade	R²
Intermediario	$U_{ANN} \times U_{ERG}$	0,261	1,0035	0,9998
	$Th_{ANN} \times Th_{ERG}$	0,1262	1,0012	1,0000
	$K_{ANN} \times K_{ERG}$	0,0766	1,0140	0,9930
Basico	$U_{ANN} \times U_{ERG}$	0,2285	0,9975	0,9997
	$Th_{ANN} \times Th_{ERG}$	0,2629	0,9953	0,9999
	$K_{ANN} \times K_{ERG}$	0,0942	1,0027	0,9991
Ultrabásico	$U_{ANN} \times U_{ERG}$	0,1648	1,0016	0,9994
	$Th_{ANN} \times Th_{ERG}$	0,2691	0,9952	0,9997
	$K_{ANN} \times K_{ERG}$	0,246	0,9868	0,9991

AAN: Análise de Ativação Neutrônica; ERG: Espectrometria de Raios Gama

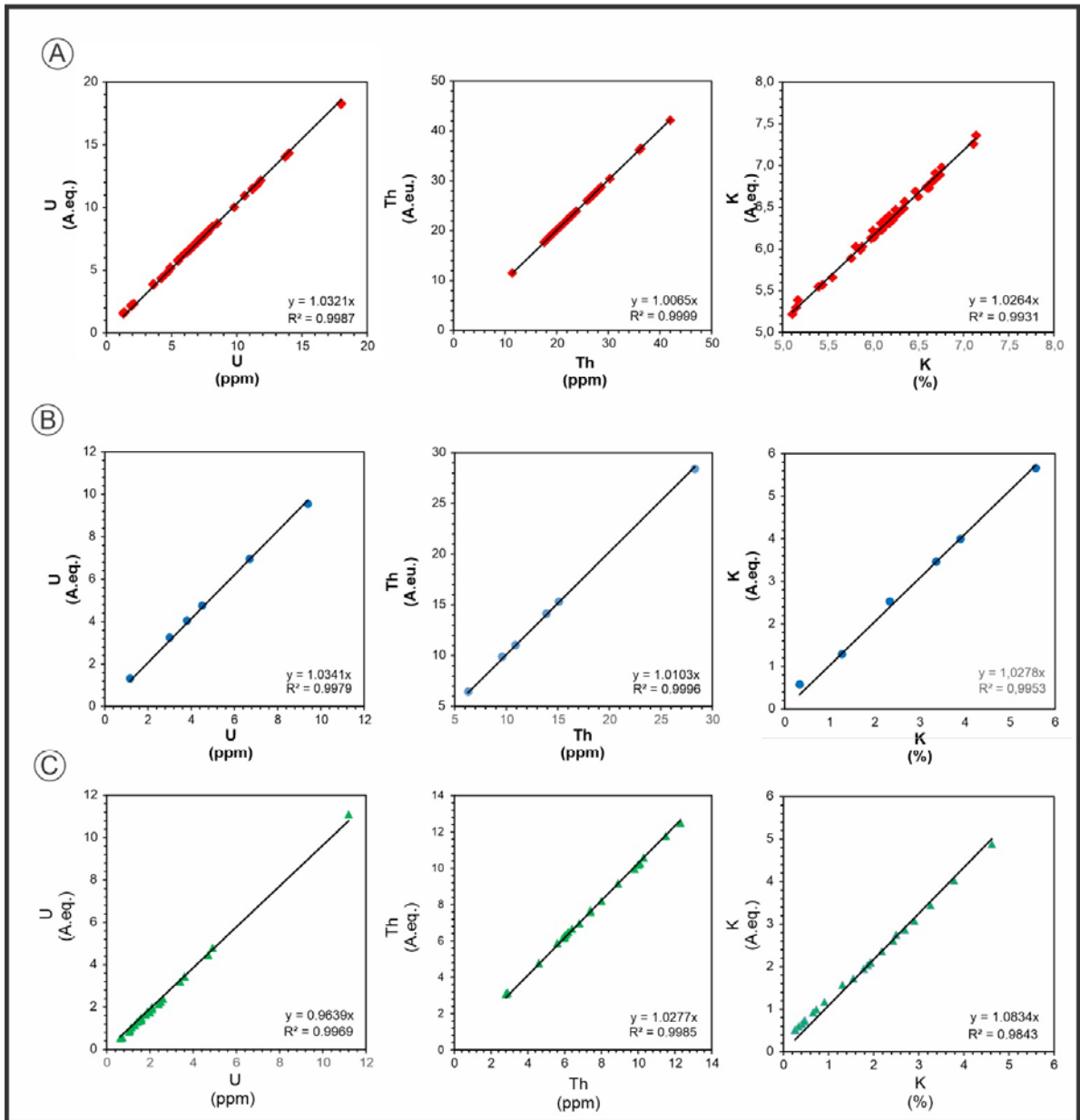


Figura 14: Comparação entre AAN e ERG dos teores de Urânio, Tório e potássio das rochas vulcânicas da Ilha da Trindade, Oceano Atlântico Sul, Brasil: A) Rochas intermediárias; B) Rochas básicas; C) Rochas ultrabásicas.

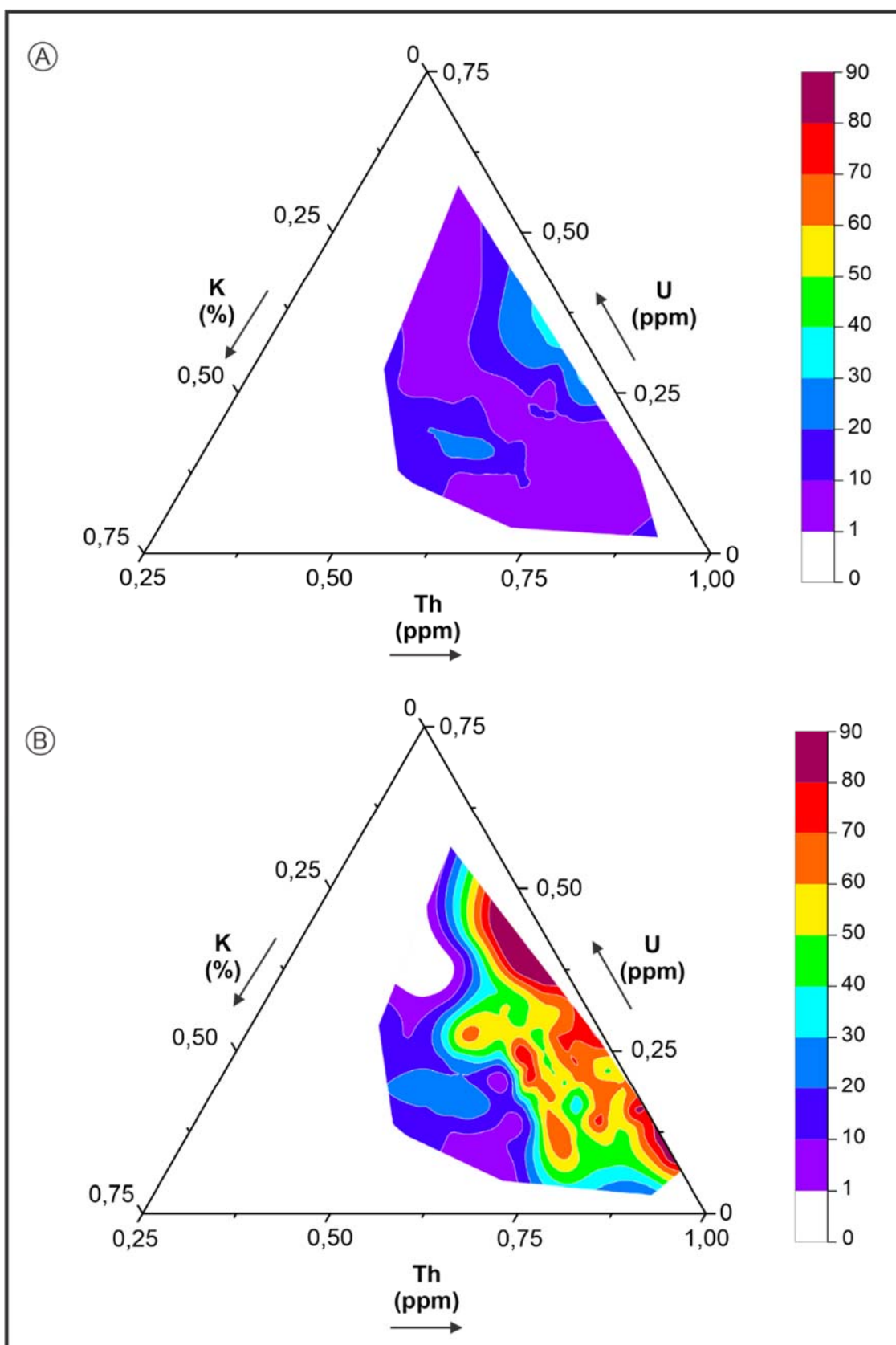


Figura 15: Diagrama de Ternário de Urânio x Tório x Potássio das vulcânicas da Ilha de Trindade, Oceano Atlântico Sul. (a) Amostra total; (b) Espectrometria Gama superficial.

6.3 Mapeamento dos Elementos Produtores de Calor Radioativo na Superfície por Análise Química de Rocha Total

Com base nos elementos produtores de calor radiogênico (EPSCR) medidos na superfície (Tabela 1), criamos um mapa de cores em formato raster, interpolando os teores nos pontos de amostragem de todas as análises químicas de rocha total usando a técnica estatística do *Natural Neighbor*. As Figuras 16, 17, 18 e 19 mostram os mapas de superfície, juntamente com o histograma e os valores de K em %, Th e U em ppm e dose absorvida radioativa (nGy/h).

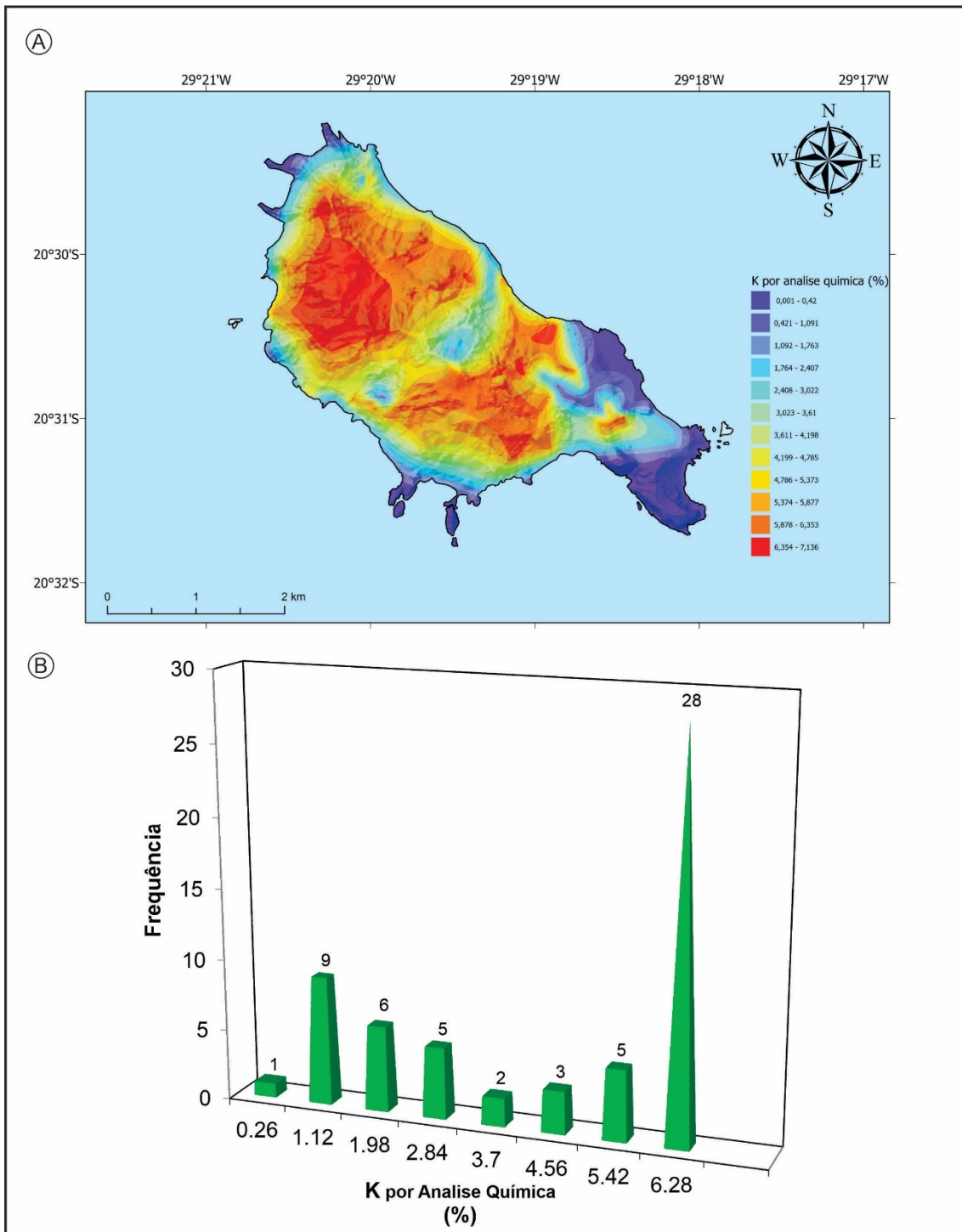


Figura 16: Mapa de superfície demonstrando K (%) por análise química de rocha total, interpolado por *Natural Neighbor*. (A) e histograma (B) do EPSCR Potássio (A.eq. %) da Ilha da Trindade, Oceano Atlântico Sul, Brasil.

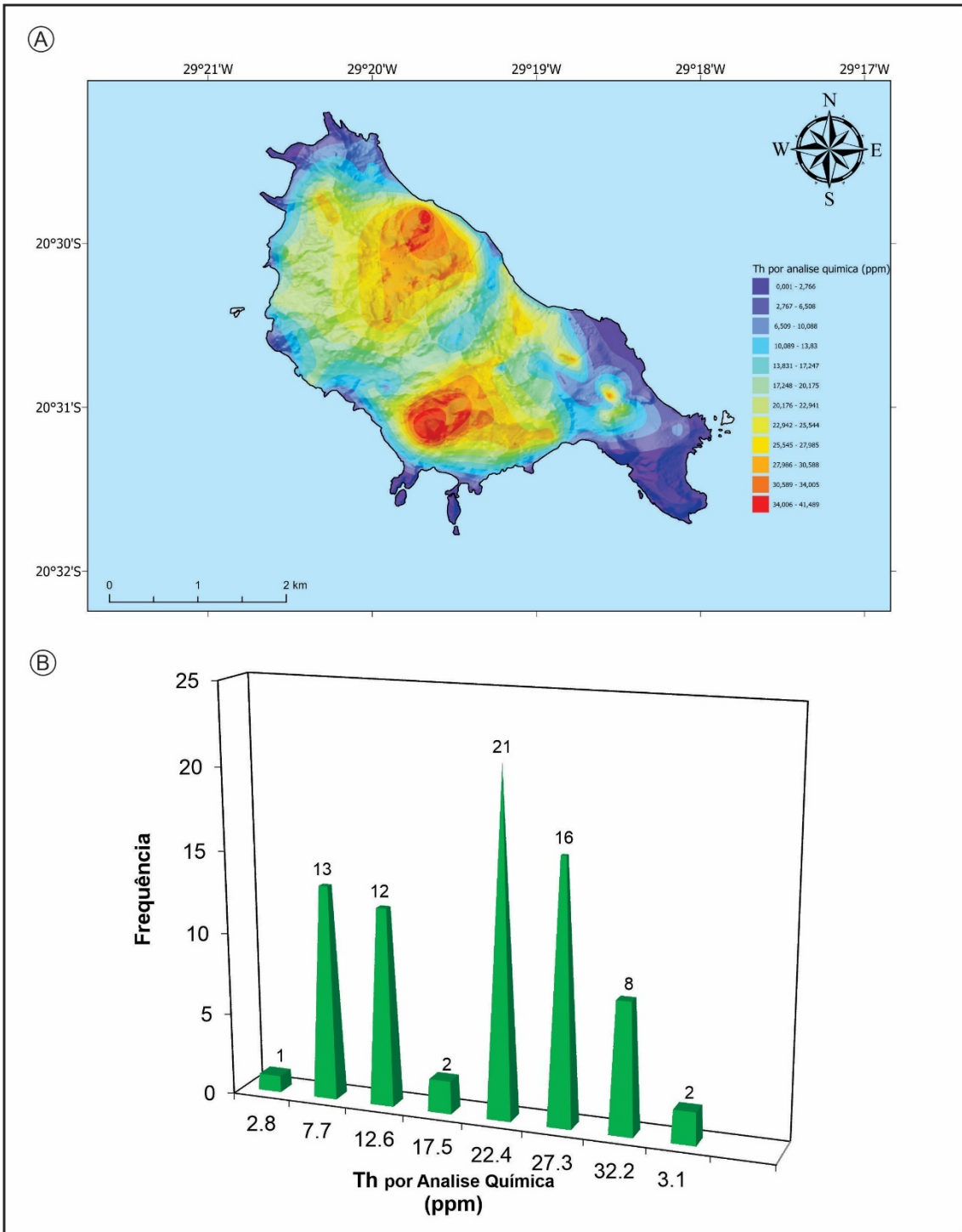


Figura 17: Mapa de superfície demonstrando Tório (ppm) por análise química de rocha total, interpolado por *Natural Neighbor*. (A) e histograma (B) do EPSCR Tório (ppm) da Ilha da Trindade, Oceano Atlântico Sul, Brasil.

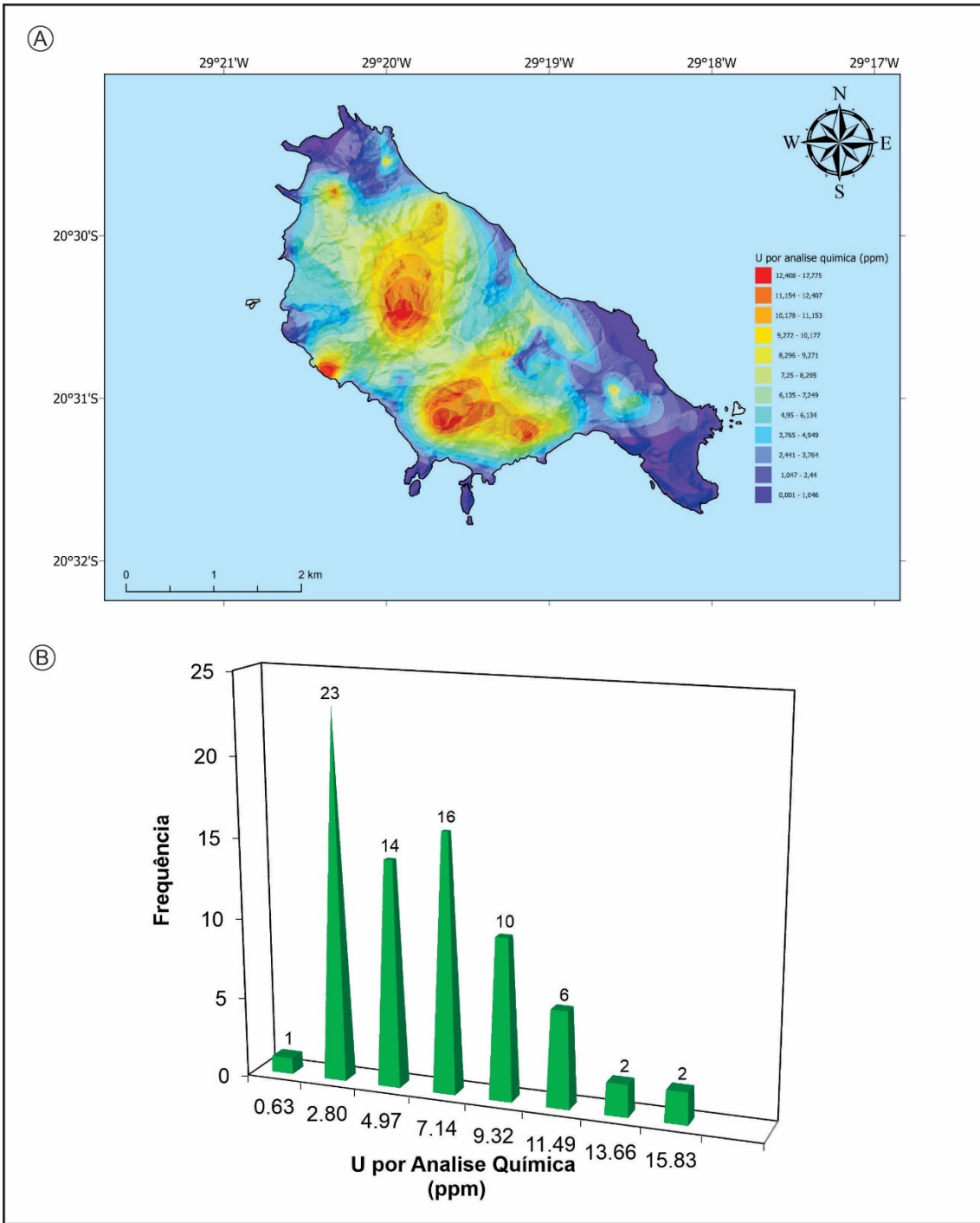


Figura 18: Mapa de superfície demonstrando o Urânio em ppm, interpolado por *Natural Neighbor*. (A) e do EPSCR Urânio (A.eq. ppm) por meio de análise química de rochas vulcânicas da Ilha da Trindade, Oceano Atlântico Sul, Brasil.

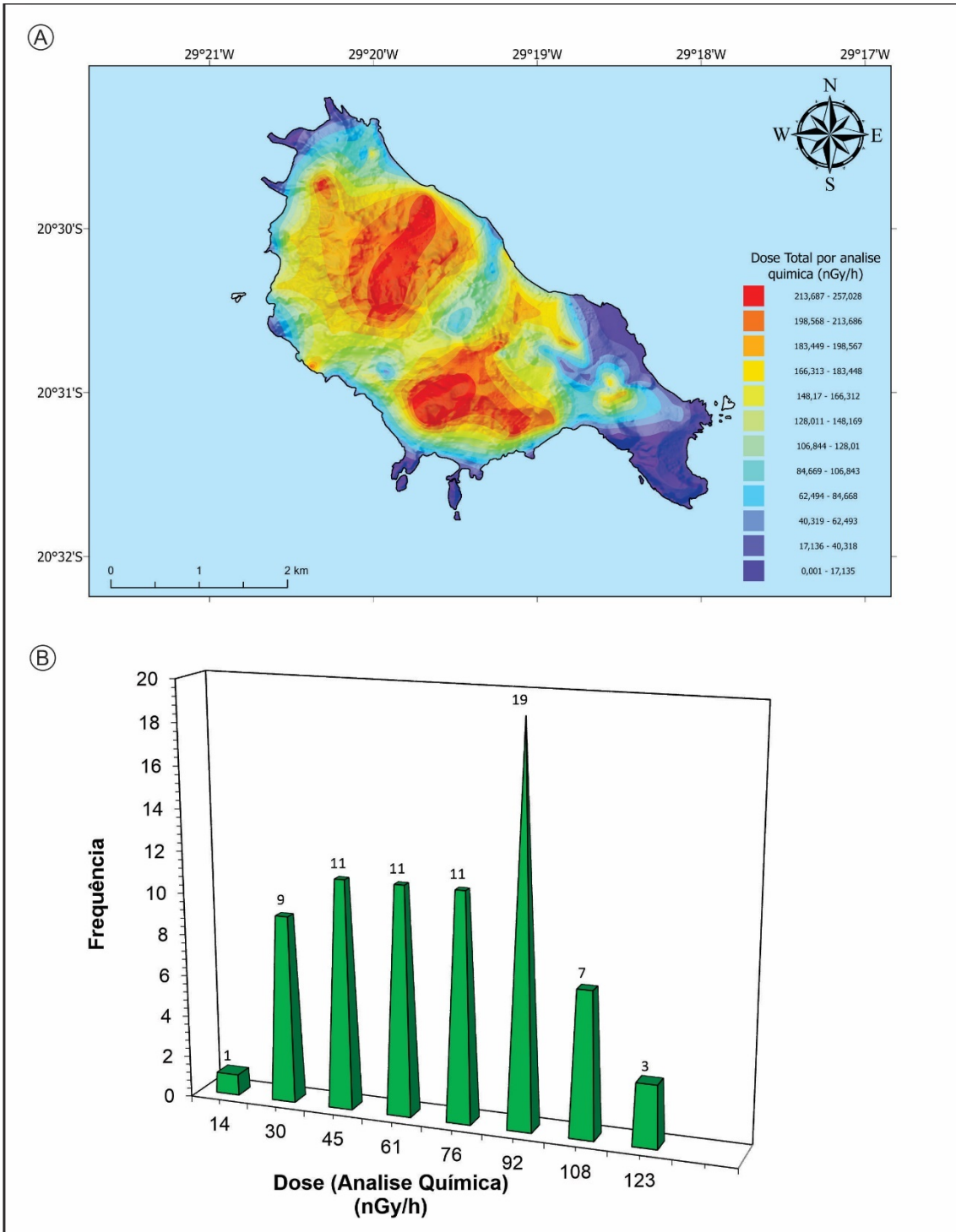


Figura 19: Mapa de superfície do interpolado pelo método *Natural Neighbor* (A) e histograma (B) da dose absorvida radioativa (nGy/h) obtida por análise química de rocha total de rochas vulcânicas da Ilha da Trindade, Oceano Atlântico Sul, Brasil.

6.4 Mapeamento de Elementos Radioativos Produtores de Calor de Superfície por Espectrometria de Raios Gama

Com base nos elementos produtores de calor radiogênico superficial medidos EPCRS) (Tabela 1), fizemos um mapa de cores de superfície raster interpolando os conteúdos nos pontos de amostragem de todas as medidas de ERG usando a técnica *Natural Neighbor*. As Figuras 20, 21, 22 e 23 mostram o mapa de superfície interpolado pelo método *Natural Neighbor* e o histograma da dose absorvida radioativa (nGy/h), U e Th em A.eq. ppm e K em A.eq. %.

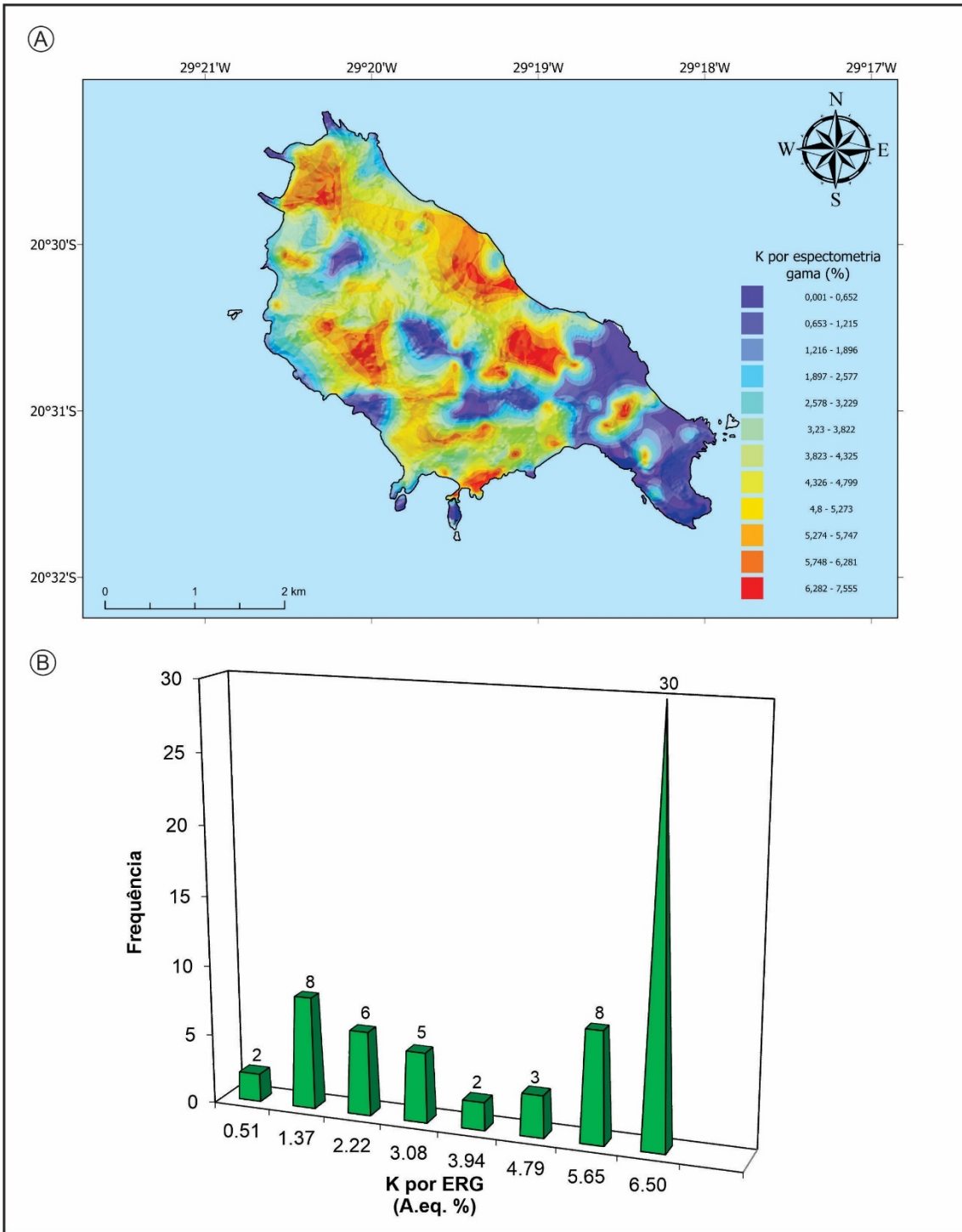


Figura 20: Mapa de superfície demonstrando o K em %, interpolado por *Natural Neighbor*. (A) e do EPSCR Urânio (A.eq. %) e histograma (B) por meio da ERG de rochas vulcânicas da Ilha da Trindade, Oceano Atlântico Sul, Brasil.

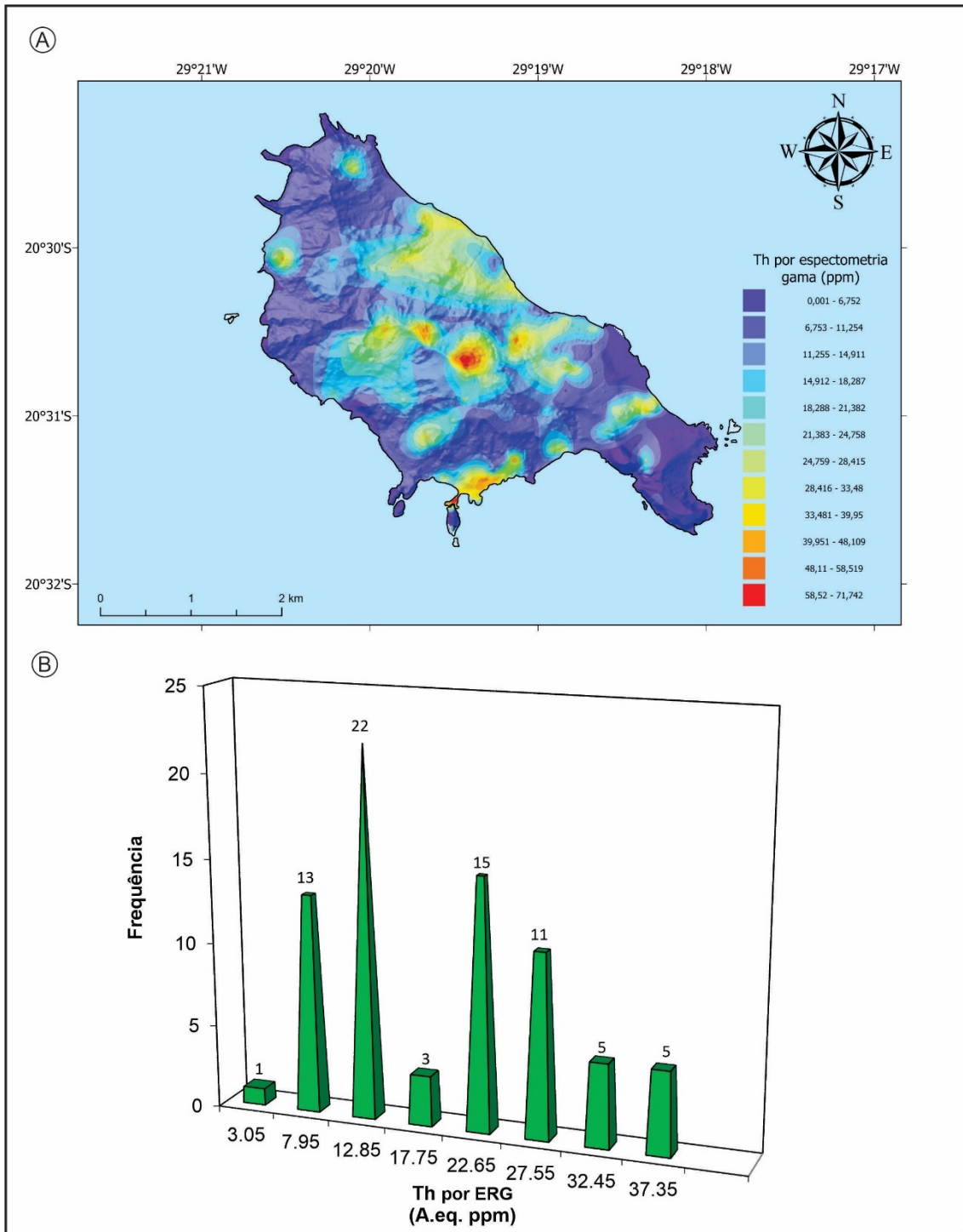


Figura 21: Mapa de superfície demonstrando o Tório em ppm, interpolado *Natural Neighbor*. (A) e do EPSCR Tório (A.eq. ppm) e histograma (B) por meio da ERG de rochas vulcânicas da Ilha da Trindade, Oceano Atlântico Sul, Brasil.

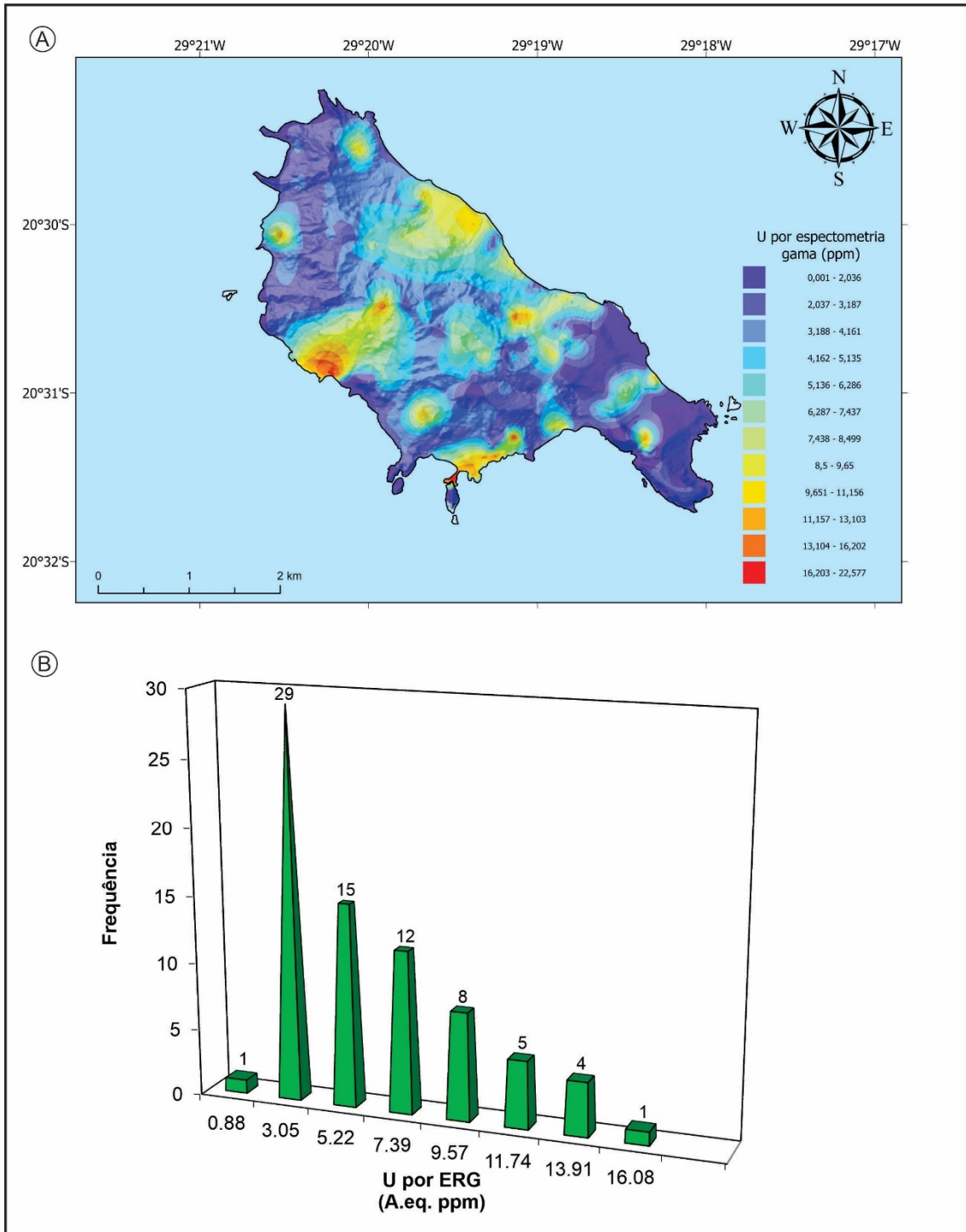


Figura 22: Mapa de superfície demonstrando o Urânio em ppm, interpolado por *Natural Neighbor*. (A) e do EPSCR Urânio (A.eq. ppm) e histograma (B) por meio da ERG de rochas vulcânicas da Ilha da Trindade, Oceano Atlântico Sul, Brasil.

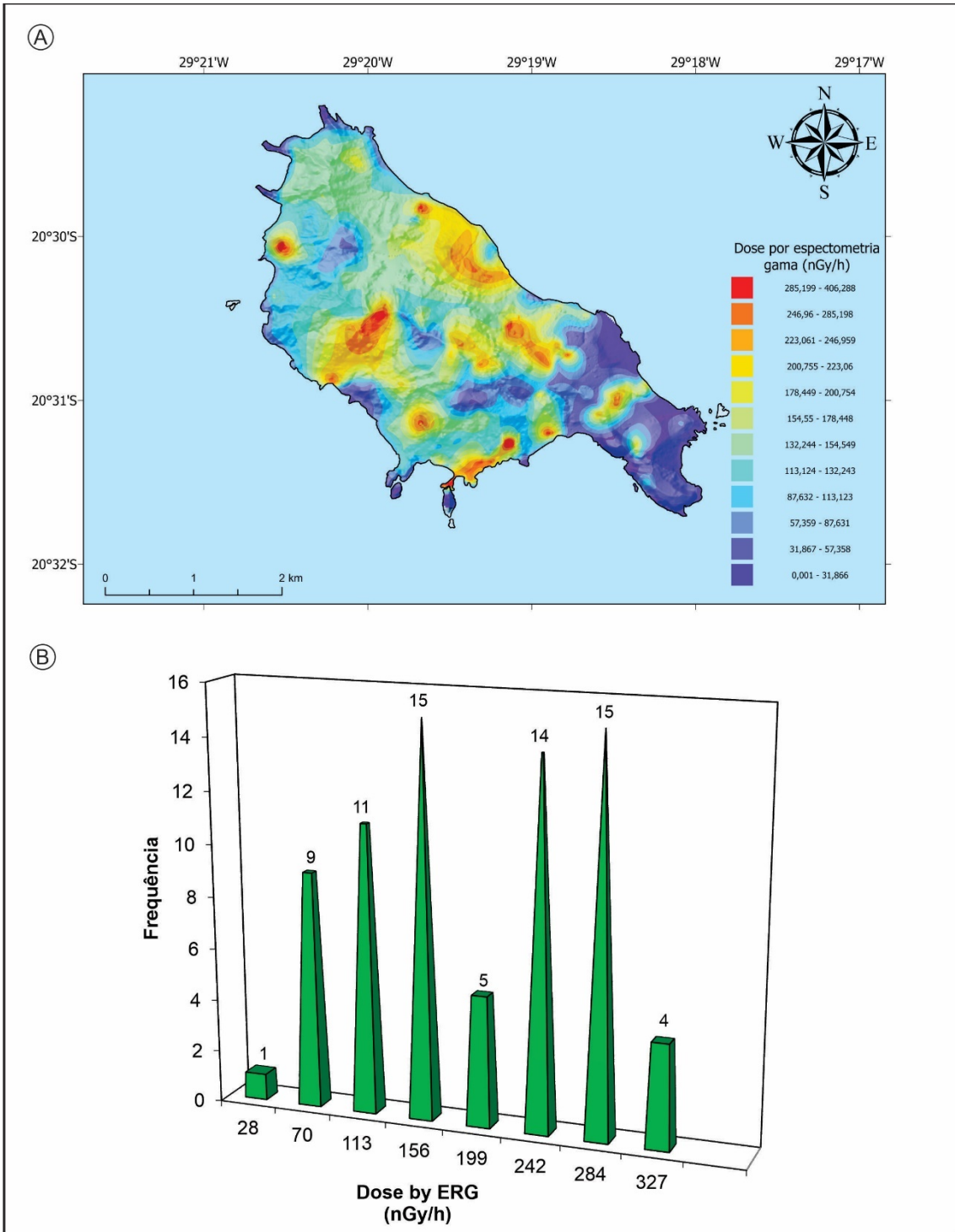


Figura 23: Mapa de superfície demonstrando a dose radioativa absorvida (nGy/h), interpolado pelo método *Natural Neighbor*. (A) e histograma (B) por meio da ERG de rochas vulcânicas da Ilha da Trindade, Oceano Atlântico Sul, Brasil.

6.5 Produção de Calor Radiogênico Superficial.

A produção de calor radiogênico superficial (PCRS: A_{surf}) de uma determinada amostra de rocha foi estimada utilizando a equação empírica (1) [SCLATER,1970; SCLATER,1980; KRAMERS, 1983; RYBACH, 1988; CHIOZZI,2002; CLAUSER,2011]

$$A_{surf} = 10^{-5} \rho (9.51C_U + 2.56C_{Th} + 3.50C_K) \quad (1)$$

Onde: A_{surf} é a PCRS da rocha ($\mu W/m^3$), ρ é a densidade da rocha (kg/m^3) e C_U e C_{Th} são em ppm e C_K em % e representam os teores dos elementos produtores de calor.

Calculamos a PCRS (A_{surf}) tanto para EPC obtidos por meio de AAN de rocha total em quantidade limitada pois o custo para fazer essas análises é elevado, quanto por ERG. Os resultados médios de A_{surf} são resumidos na Tabela 3 e ilustrados como um mapa de superfície interpolado pelo método *Natural Neighbor* e histograma da produção de calor radiogênicos na Figura 24.

As taxas de A_{surf} para essas unidades são semelhantes, apesar da discrepância em algumas amostras, onde temos níveis mais baixos de AAN de rocha total em comparação com os níveis de atividade equivalente da espectrometria de Radiação Gama (Figuras 14 e 15). É plausível que a distribuição não homogênea tenha sido causada pela sobreposição de atividades vulcânicas complexas (por exemplo: diferentes tipos de episódios vulcânicos, rochas de diferentes idades e o desequilíbrio radioativo secular devido a processos hidrotermais e/ou intemperismo). Vale ressaltar que as rochas de fonolito mostram os valores mais altos de potássio e as rochas ultrabásicas apresentam os valores mais baixos. No entanto, o Urânio e o Tório apresentam uma distribuição semelhante.

Tabela 3: Síntese estatística do PCRS (A_{surf} : μWm^3) e a respectiva contribuição dos resultados de radioisótopos de rochas vulcânicas da Ilha Trindade, Oceano Atlântico Sul, Brasil: A) por análise de rocha total; B) por ERG.

(A)

Tipo de rocha Vulcanica	Classificação Petrologica		$H U$ (%)	$H Th$ (%)	$H K$ (%)	ρ (kg/m^3)	PCRS ($\mu W/m^3$)
Intermediario	Fonolito, Fonolito Peralcalino, Traqui-Fonolito (n: 48)	Max	69,87	56,56	26,78	2760	6,73
		Mín	14,80	22,78	7,29	2440	2,14
		Med	45,48	49,72	15,27	2680	3,83
		MG	39,73	40,93	14,84	2631	3,65
		σ	13,29	9,26	5,01	108	1,18
Basico	Fonotefrito, Tefrito (n: 6)	Max	59,65	56,77	15,99	3000	5,44
		Mín	39,17	33,84	4,07	2777	0,79
		Med	48,62	29,11	12,27	2965	2,41
		MG	47,91	43,51	8,58	2913	2,19
		σ	6,91	7,88	4,60	91	1,46
Ultrabásico	Basanita, Nefelina, Ankaratrito (n: 23)	Max	82,80	61,53	28,87	3330	4,03
		Mín	31,95	14,73	2,87	2770	0,46
		Med	42,36	45,61	8,29	3140	1,49
		MG	44,27	40,77	9,34	3122	1,35
		σ	12,60	1,48	7,86	128	0,89

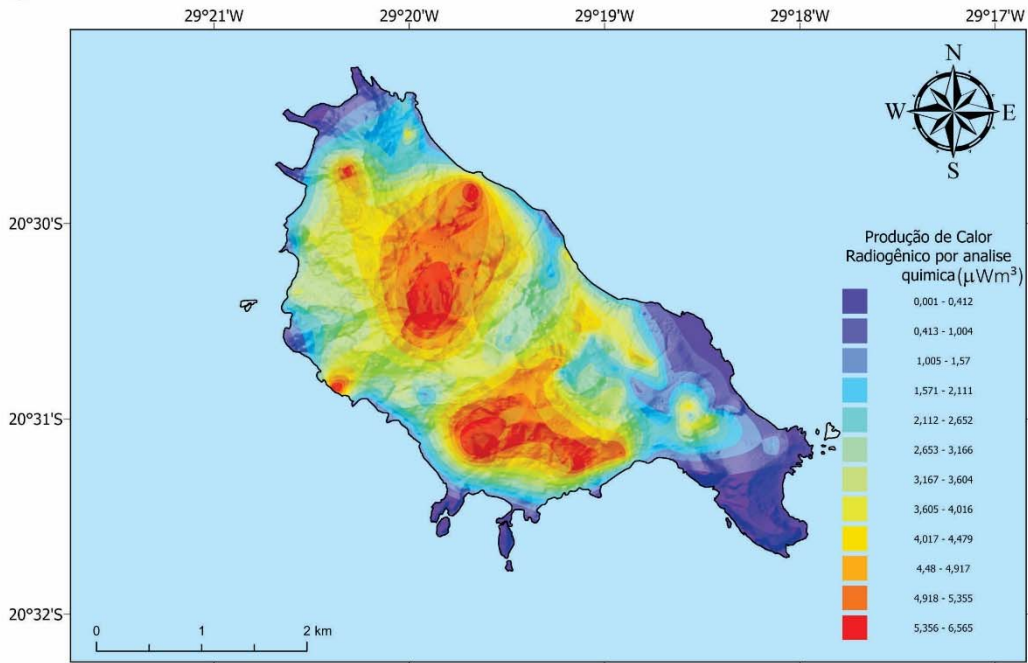
PCRS: Produção de Calor Radiogênico Superficial ; Max: Máximo; Mín: Mínimo; Med: Mediana; H : Calor;MG: Média Geometrica; ρ : Desvio padrão

(B)

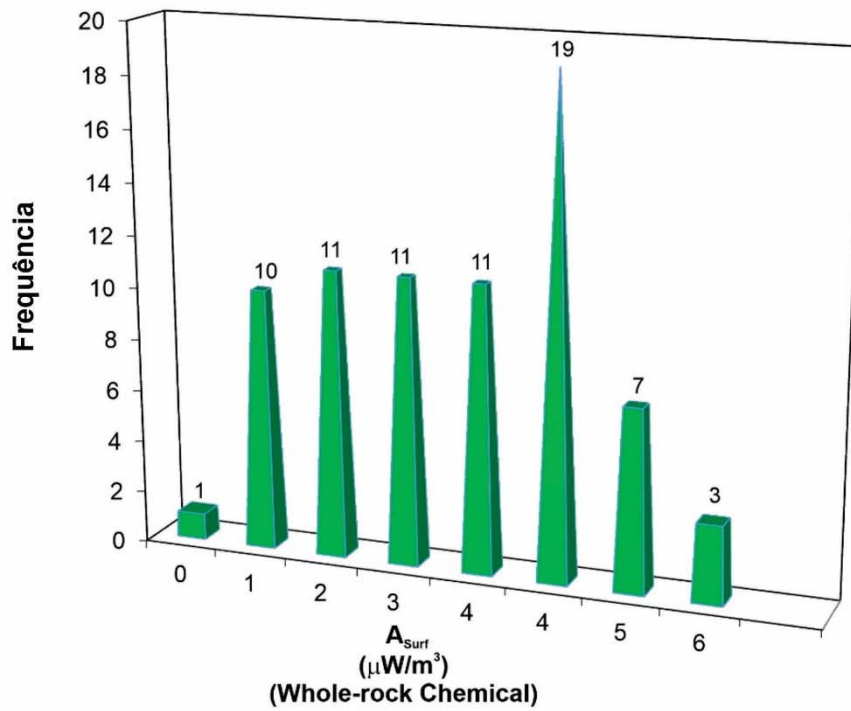
Tipo de rocha Vulcanica	Classificação Petrologica		$H U$ (%)	$H Th$ (%)	$H K$ (%)	ρ (kg/m^3)	PCRS ($\mu W/m^3$)
Intermediario	Fonolito, Fonolito Peralcalino, Traqui-Fonolito (n: 48)	Max	69,89	59,04	26,41	2760	6,84
		Mín	16,74	22,64	7,41	2440	2,23
		Med	46,29	39,94	15,26	2680	4,02
		MG	40,93	40,18	14,89	2631	3,92
		σ	12,76	8,93	4,89	108	1,18
Basico	Fonotefrito, Tefrito (n: 6)	Max	60,18	53,14	15,78	3000	5,08
		Mín	40,34	33,06	4,11	2777	0,93
		Med	48,51	39,29	12,20	2965	2,58
		MG	48,70	40,18	9,61	2913	2,37
		σ	6,70	6,77	4,24	91	1,36
Ultrabásico	Basanita, Nefelina, Ankaratrito (n: 23)	Max	81,63	62,24	27,11	3330	4,05
		Mín	30,10	15,20	3,18	2770	0,49
		Med	38,30	47,60	12,82	3140	1,49
		MG	40,32	42,25	11,99	3122	1,35
		σ	13,45	11,78	7,68	128	0,89

PCRS: Produção de Calor Radiogênico Superficial ; Max: Máximo; Mín: Mínimo; Med: Mediana; H : Calor;MG: Média Geometrica; ρ : Desvio padrão

(A)



(B)



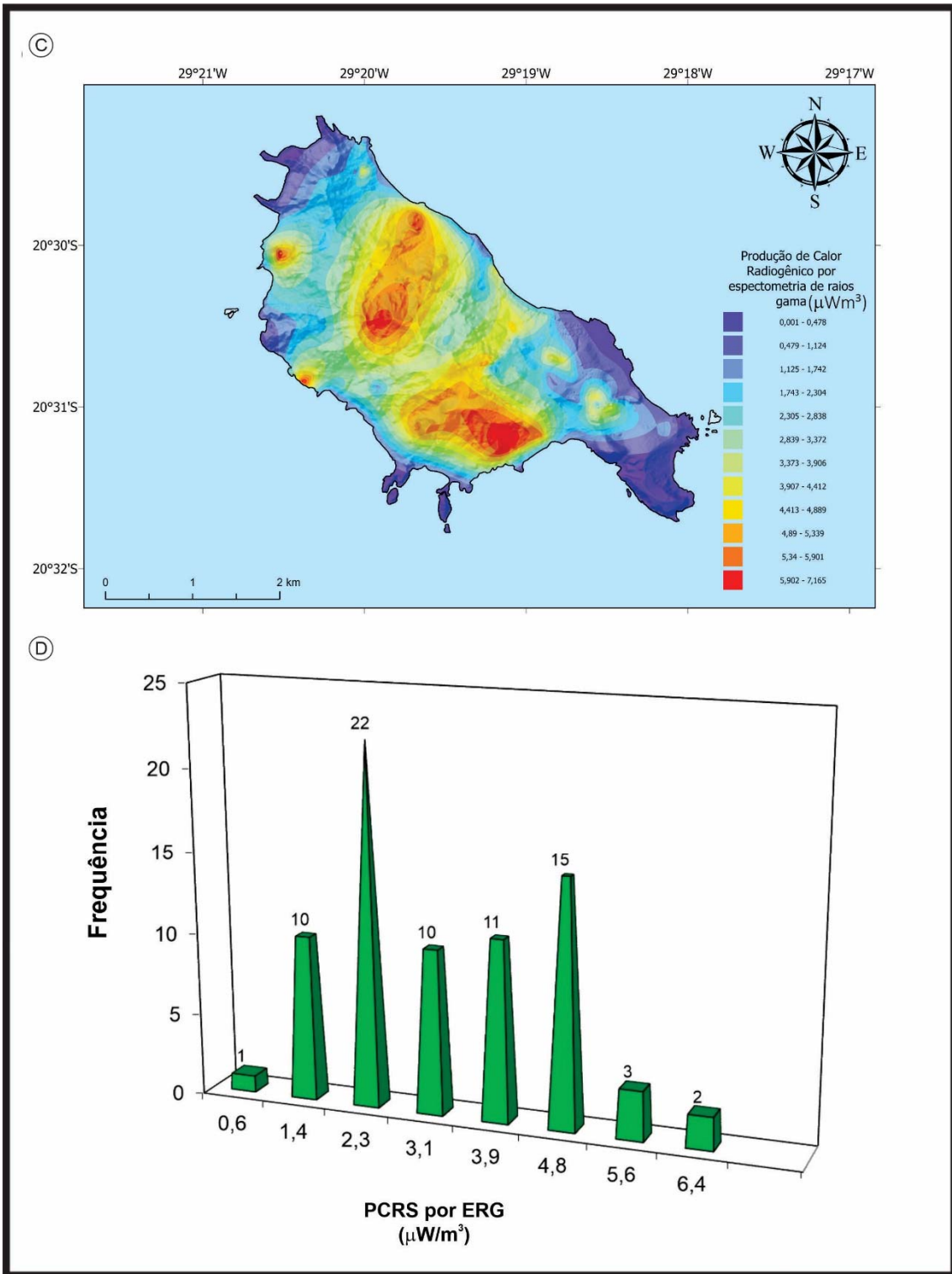


Figura 24: Mapa de superfície demonstrando a produção de calor radiogênico superficial (PCRS) , interpolado por *Natural Neighbor*. (A) e histograma (B) por meio de análise química por rocha total e (C) e (D) por ERG de rochas vulcânicas da Ilha da Trindade, Oceano Atlântico Sul, Brasil.

6.6 Fluxo de Calor Radiogênico Superficial

É aceito que o fluxo de calor radiogênico superficial (FCRS: Q_{surf}) de uma área apresente uma correlação linear com a PSCR (A_{surf}), conforme expresso pela equação (2) [BIRCH, 1968; ROY, 1968; STEIN, 1995; HASTEROK, 2011]:

$$Q_{surf} = Q_{red} + A_{surf} \times D \quad (2)$$

Onde Q_{red} é o fluxo de calor reduzido (mW/m^2), A_{surf} é a PSCR com base nos dados do EPCRS em $\mu W/m^3$ e D é a espessura da camada superior da crosta. O fluxo de calor reduzido (Q_{red}) representa o fluxo de calor proveniente do manto, ou seja, Q_{red} corresponde ao ponto em que $A_{surf} = 0$ e o produto $A_{surf} \times D$ é o fluxo de calor radiogênico superficial na crosta superior. Portanto, a relação $Q_{surf} \times A_{surf}$ corresponde a uma partição do fluxo de calor superficial total entre o fluxo de calor basal (Q_{red}), que é o fluxo de calor médio na profundidade D da crosta (manto superior ou Moho), e o fluxo de calor radiogênico adicional produzido na superfície da crosta com espessura D . Assim, o fluxo de calor basal (Q_{red}) representa uma fração crescente do manto até o FCRS.

Calculamos o FCRS (Q_{surf}) tanto para EPCRS obtidos por meio de AAN de rochas total, quanto por ERG. Os resultados médios de Q_{surf} são resumidos na Tabela 4 e ilustrados como um mapa de cores da superfície interpolado pelo método *Natural Neighbor* e histograma do fluxo de calor radiogênico superficial na Figura 25.

Tabela 4: Síntese estatística dos resultados de FCRS (Q_{surf} : $\mu W/m^2$) das rochas vulcânicas da Ilha da Trindade, Oceano Atlântico Sul, Brasil: A) FCRS por análise de rochas total; B) FCRS por espectrometria de raios Gama.

Tipo de rocha Vulcanica	Classificação Petrologica		HF U (%)	HF Th (%)	HF K (%)	ρ (Kg/m^3)	FCRS (mW/m^2s)
Intermediario	Fonolito, Fonolito Peralcalino, Traqui-Fonolito (n: 48)	Max	66,43	66,43	28,38	2760	139,10
		Min	19,19	19,19	9,72	2440	47,38
		Med	43,75	43,75	17,93	2680	81,22
		MG	39,66	39,66	17,58	2631	77,52
		σ	11,28	11,28	4,78	108	23,60
Basico	Fonotefrito, Tefrito (n: 6)	Max	83,33	4,72	33,31	3000	113,40
		Min	61,98	2,93	13,54	2777	20,34
		Med	69,68	3,47	27,08	2965	52,73
		MG	70,70	3,55	24,04	2913	48,31
		σ	7,33	0,61	6,91	91	29,16
Ultrabasico	Basanita, Nefelina, Ankaratrito (n: 23)	Max	75,56	49,52	27,85	3330	85,13
		Min	32,32	17,45	6,99	2770	13,90
		Med	39,36	40,37	18,38	3140	34,38
		MG	41,18	37,64	18,22	3122	32,19
		σ	10,78	7,77	5,75	128	17,73

FCRS: Fluxo de Calor Radiogênico Superficial ; Max: Maximo; Min: Mínimo; Med: Mediana; HF : Fluxo de Calor;MG: Média Geometrica; σ : Desvio padrão

Tipo de rocha Vulcanica	Classificação Petrologica		HF U (%)	HF Th (%)	HF K (%)	ρ (Kg/m^3)	FCRS (mW/m^2s)
Intermediario	Fonolito, Fonolito Peralcalino, Traqui-Fonolito (n: 48)	Max	66,47	55,46	28,02	2760	141,40
		Min	20,55	23,63	9,86	2440	49,12
		Med	44,35	388,93	17,86	2680	84,98
		MG	40,53	39,06	17,56	2631	83,17
		σ	10,93	7,37	4,68	108	23,69
Basico	Fonotefrito, Tefrito (n: 6)	Max	55,33	44,72	19,45	3000	106,17
		Min	37,36	33,11	9,39	2777	23,27
		Med	45,69	38,18	18,08	2965	56,27
		MG	45,39	38,09	15,44	2913	52,81
		σ	6,00	3,84	3,72	91	27,14
Ultrabasico	Basanita, Nefelina, Ankaratrito (n: 23)	Max	64,89	21,7	13,80	3330	85,55
		Min	33,79	41,71	24,50	2770	14,34
		Med	38,29	40,05	21,66	3140	34,42
		MG	39,31	40,63	20,06	3122	32,21
		σ	10,11	7,30	5,34	128	17,71

FCRS: Fluxo de Calor Radiogênico Superficial ; Max: Maximo; Min: Mínimo; Med: Mediana; HF: Fluxo de Calor;MG: Média Geometrica; σ : Desvio padrão

Para entender a origem da fonte de calor na superfície na área da Ilha da Trindade, Oceano Atlântico Sul, Brasil, consideramos o modelo de *Sclater-Francheteau* para a litosfera oceânica e o fluxo de calor reduzido (Q_{red}) das camadas da litosfera (Figura 26) definido pelos autores (SCLATER ET AL., 1970; SCLATER et al., 1980) Esse modelo prevê uma placa litosférica com espessura de 120 km, constituída da seguinte forma: 5 km de uma camada de basalto com PCR de $5 mW/m^3$ + 15 km de uma camada de lherzolito com PCR de $1.3 mW/m^3$ (camada D) e 100 km de uma camada de "Pirólito I" (uma mistura de uma parte

de basalto com três partes de peridotito ultramáfico (CLARK, 1964) com PCR de $1.3 \mu\text{W}/\text{m}^3$.

O PCR desse modelo gera um FCR na superfície de $4.6 \text{ mW}/\text{m}^2\text{s}$, sendo cerca de $1.7 \text{ mW}/\text{m}^2\text{s}$ provenientes da litosfera e $2.9 \text{ mW}/\text{m}^2\text{s}$ provenientes do Manto (Pirólito I) e Pirólito II, cujo PCR médio é de $4.2 \mu\text{W}/\text{m}^3$, com um FCR de $16.8 \text{ mW}/\text{m}^2\text{s}$, a uma profundidade de 400 km (SCLATER, 1970; SCLATER, 1980). No entanto, não existe um modelo geral de geração de calor radioativo para a litosfera, pois é impossível caracterizar todas as regiões geográficas dos continentes e oceanos (HASTEROK, 2017; HASTEROK, 2018; RYBACH, 1976; RYBACH, 1982; RUDNICK, 1998).

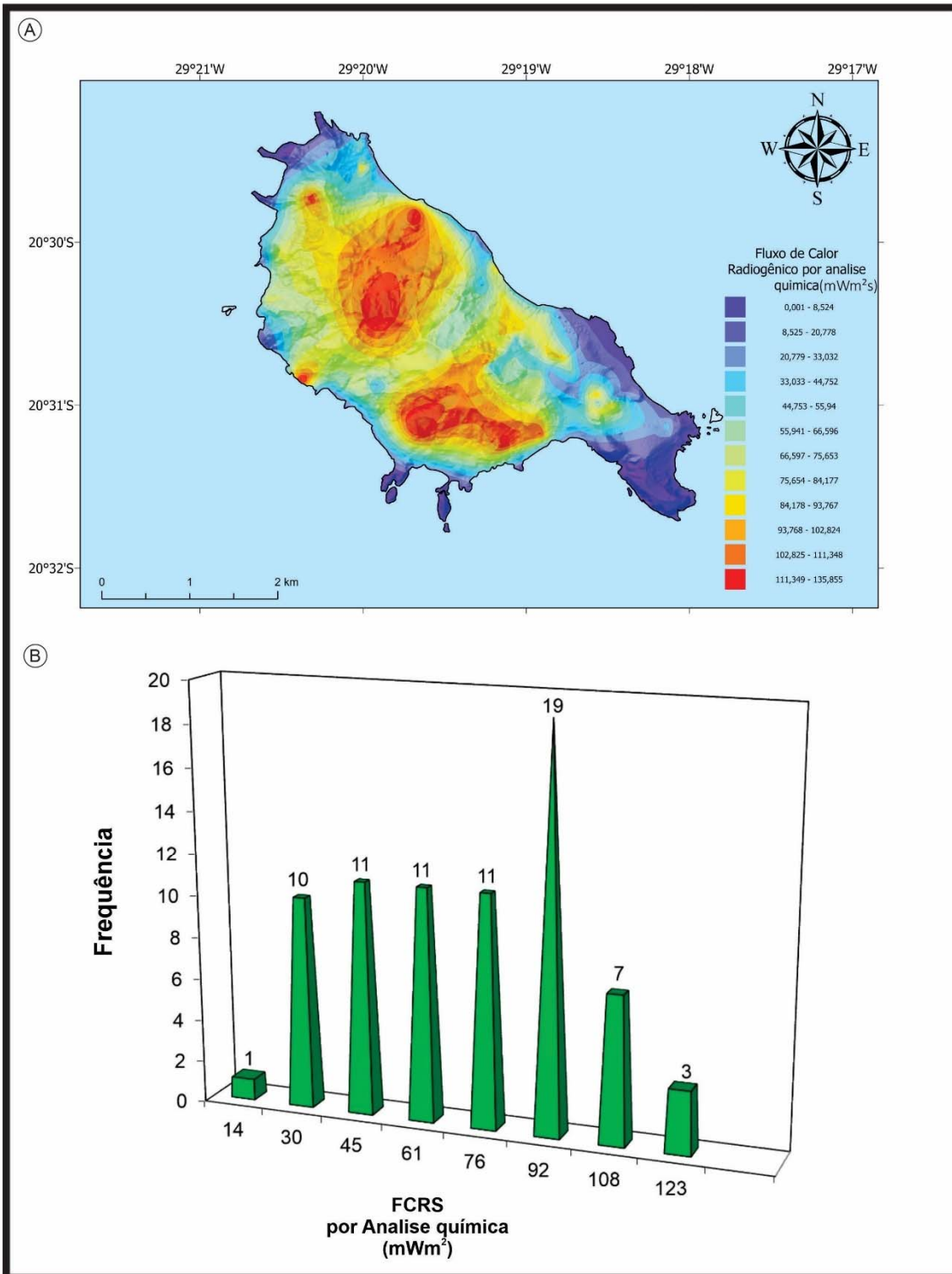
Para os cálculos de Q_{surf} (Equação 2), assumimos que os conteúdos dos EPCRS estão distribuídos de forma normal e que o fluxo de calor reduzido (Q_{red}) da camada litosférica é de $4,6 \times 10^{-5} \text{ mW}/\text{m}^2\text{s}$. Para a variável D, consideramos uma espessura de 25 km (Figura 24: 5 km de camada de basalto + 15 km de camada de lherzolito e mais 5,6 km da exposição da Ilha da Trindade, referência fornecida). Conseqüentemente, a espessura da camada D é semelhante à escala de flutuação horizontal na radioatividade, e o efeito da variação lateral na produção de calor sobre o Q_{surf} é negligível, pois não há contribuição lateral na produção de calor por outras rochas (Tabela 4 e Figura 1).

A produção de calor radiogênico superficial (PSCR) em uma determinada área é controlada pela distribuição dos elementos de produção de calor superficial (EPCS). Os níveis de Urânio, Tório e Potássio nas rochas vulcânicas da Ilha da Trindade foram medidos tanto por AAN de rochas total quanto por espectrometria de Raios Gama (ERG) (Tabelas 1, 3 e 4). Dadas as localizações das amostras estudadas (Figura 11), elas são representativas dos valores superficiais ou aparentes. No entanto, os EPCR e PSCR (A_{surf}) calculados pelos dois métodos dentro da mesma unidade geológica são proporcionalmente similares (Tabelas 2 e 3; Figura 14), apesar das discrepâncias em algumas amostras, onde os níveis de EPCR por AAN de rocha total são mais baixos do que os níveis de atividade equivalente obtidos por ERG. A área possui uma faixa de PSCR variando entre $0,46$ e $6,73 \mu\text{W}/\text{m}^3$ (média geométrica: $2,66 \mu\text{W}/\text{m}^3$) por análise de ativação neutrônica de rochas inteiras e entre $0,59$ e $6,85 \mu\text{W}/\text{m}^3$

(média geométrica: $2,82 \mu\text{W}/\text{m}^3$) por espectrometria de raios Gama, e há uma boa correlação entre essas técnicas (Tabelas 2 e 3; Figura 14).

A produção de calor radiogênico superficial pode apresentar algumas irregularidades devido à dissimilaridade no comportamento geoquímico do Urânio, Tório e Potássio durante os processos geológicos que determinam a distribuição dos EPCS. É plausível que a distribuição inomogênea de A_{surf} tenha sido causada por processos complexos de diferenciação sobrepostos (por exemplo, diferentes tipos de episódios vulcânicos, rochas de diferentes idades e o desequilíbrio radioativo secular provocado por fluidos hidrotermais e/ou intemperismo).

A média calculada da PSCR das rochas vulcânicas ($2,74 \mu\text{W}/\text{m}^3$) da Ilha de Trindade é mais alta (Tabela 3) do que a média da PSCR das rochas crustais e do manto litosférico publicada por JAUPART (2007) $0,018 \mu\text{W}/\text{m}^3$, (HASTEROK,2018) $0,02 \mu\text{W}/\text{m}^3$, RYBACH,1976 $0,099 \mu\text{W}/\text{m}^3$, (RYBACH & CĚRMÁK, 1982) $0,013 \mu\text{W}/\text{m}^3$, (RUDNICK,1998) $0,024 \mu\text{W}/\text{m}^3$. Isso ocorre porque as rochas vulcânicas da Ilha da Trindade sofreram metassomatismo que afeta as exposições superficiais durante a exumação e/ou o fluxo de água subterrânea próxima à superfície, o que aumentou os níveis de EPSCR, conforme sugerido por (RUSSEL, 2001) para os xenólitos de Jericho no craton Slave.



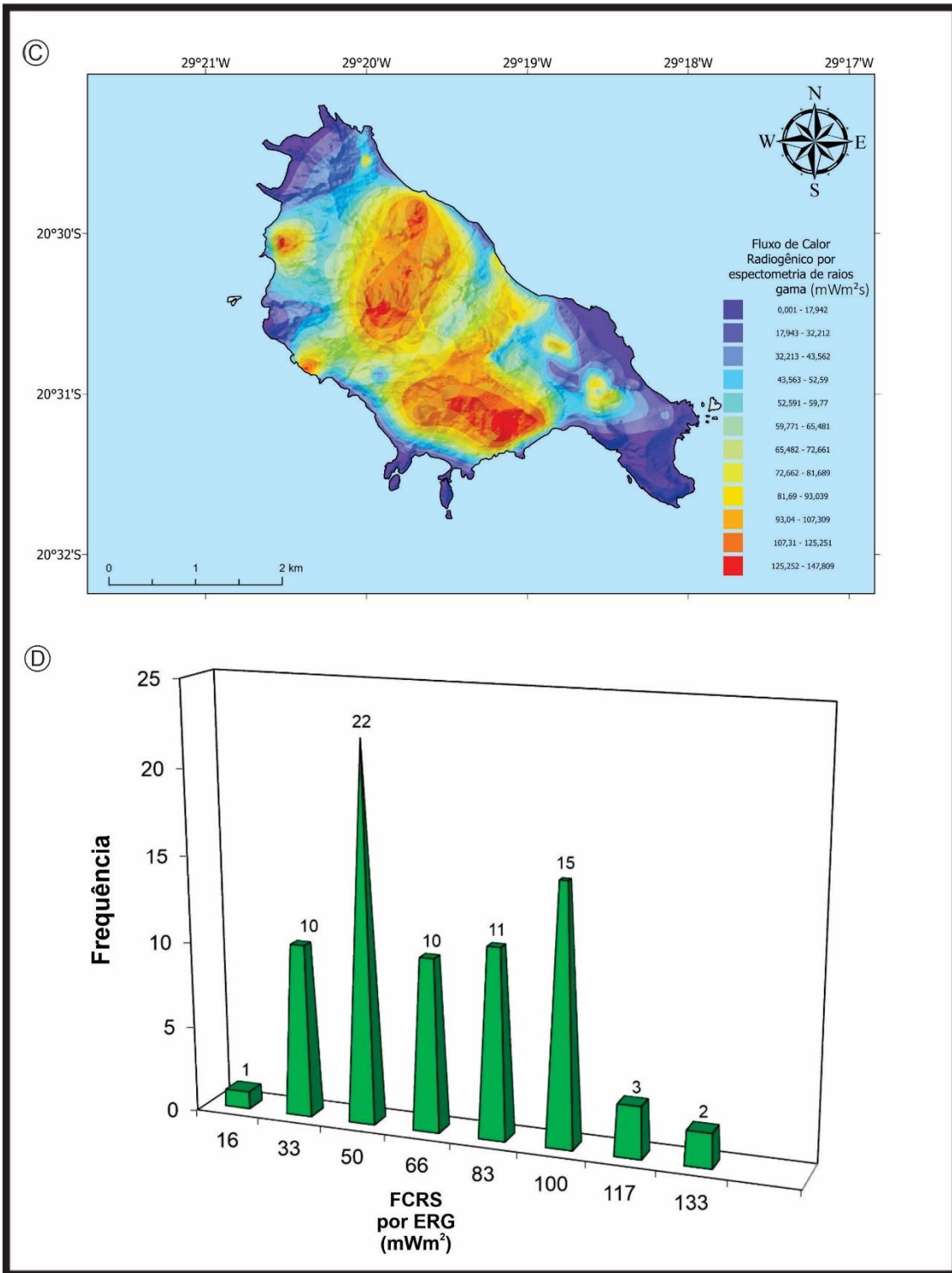


Figura 25: Mapa de cores do método do *natural neighbor* para FCRS (Q_{surf} : mW/m^2s) e histograma das rochas vulcânicas da Ilha da Trindade, Oceano Atlântico Sul, Brasil: A) e B) por análise química de rocha total; C) e D) por espectrometria de raios Gama (ERG).

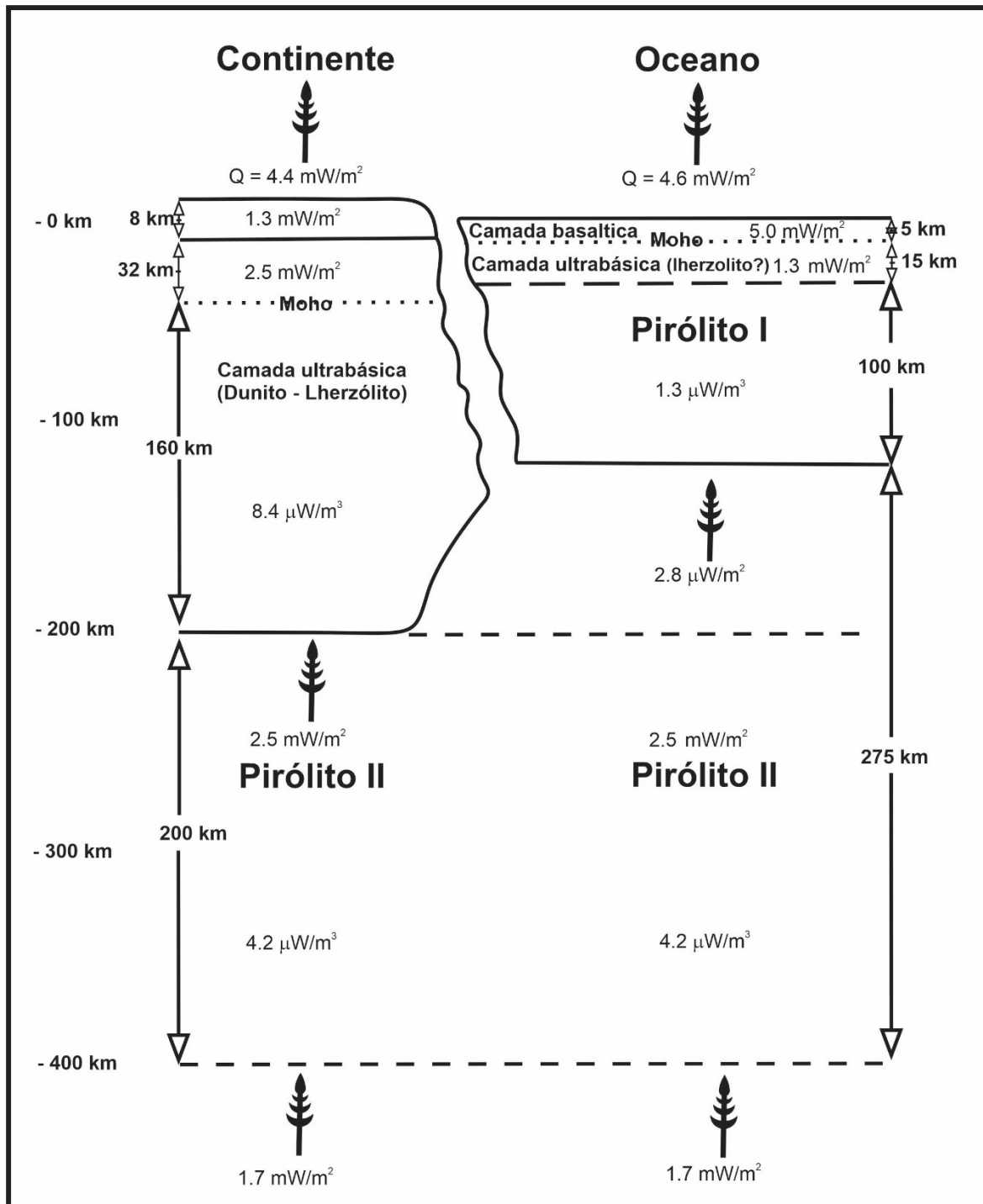


Figura 26: Modelo de litosfera oceânica e escudo continental, assumindo um fluxo constante a 200 km de profundidade. O fluxo de calor em diferentes níveis é indicado pelas flechas mais espessas. Modificado de SCLATER (1970; 1980).

O FCRS (Q_{surf}) reproduz o PSCR (A_{surf}) em todas as rochas vulcânicas da Ilha da Trindade e varia de 13,9 a 139,1 mW/m²s, com mediana de 69,2, média geométrica de 58,92 e desvio padrão de 31,69 por meio da análise de ativação

neutrônica de rocha total e de 7,1 a 341,46 mW/m²s, com mediana de 47,41, média geométrica de 61,98 e desvio padrão de 31,83 por meio de espectrometria de Raios Gama (Tabela 5B; Figura 25).

Tabela 5: Síntese estatística dos resultados médios de PSCR (A_{surf} : $\mu\text{W}/\text{m}^3$) e FCRS (q_s : mW/m^2) de todas as rochas vulcânicas da Ilha da Trindade, Oceano Atlântico Sul, Brasil: FCRS por análise de ativação neutrônica de rocha total (n: 77) e por espectrometria de raios Gama (n: 481).

A					
Produção de Calor Radiogênico Superficial	Max	Mín	Med	MG	σ
A_{surf} : ($\mu\text{W}/\text{m}^3$) por AAN	6,73	0,46	3,23	2,66	1,58
A_{surf} : ($\mu\text{W}/\text{m}^3$) por ERG	16,84	0,13	2,14	2,15	2,77
ANN: Análise de ativação neutrônica ; ERG: Espectrometria de Raios Gama; Max: Máximo; Mín: Mínimo; Med: Mediana; MG: Média Geométrica; σ : Desvio padrão					
B					
Fluxo de Calor Radiogênico Superficial	Max	Mín	Med	MG	σ
q_{surf} : ($\mu\text{W}/\text{m}^2\text{s}$) por AAN	139,73	13,90	69,20	58,92	31,50
q_{surf} : ($\mu\text{W}/\text{m}^2\text{s}$) por ERG	341,46	7,10	47,41	49,44	55,41
AAN: Análise de ativação neutrônica ; ERG: Espectrometria de Raios Gama; Max: Máximo; Mín: Mínimo; Med: Mediana; MG: Média Geométrica; σ : Desvio padrão					

Embora a média de PCRS das rochas vulcânicas da Ilha da Trindade seja alta, a mediana correspondente de FCRS em todas as rochas é relativamente baixa (58,31 mW/m²) em comparação com o fluxo de calor oceânico médio sugerido, que varia entre 80 e 101 mW/m² (POLLACK,1993; PALME, 2014; RUSSEL, 2001; DAVIES,1980; JAPUART,2007; PASQUALE, 2014) e a margem continental estável que apresenta uma média de 80 mW/m², mas é semelhante ao FCRS da Terra (60 mW/m² em uma grade de 12 partes da superfície da Terra), também semelhante à média de FCRS do Brasil (HEAT FLOW DATA ASSESSMENT GROUP, 2022; GLOBAL HEAT FLOW DATA ASSESSMENT GROUP, 2023) e ligeiramente maior que a média de FCRS de 55 mW/m² das intrusões alcalinas do Cretáceo Superior-Terciário Inferior de Poços de Caldas, Minas Gerais (VITORELLO,1980). Isso também está de acordo com JESSOP,1990 que afirmou que provavelmente é a maior fonte de calor na crosta terrestre, e outras fontes podem ser importantes em locais específicos. Portanto, podemos sugerir que a fonte mais provável de fluxo de calor radioativo na área da Ilha da Trindade parece estar associada apenas ao fluxo de calor do manto superior.

A Ilha de Trindade apresenta um EPCRS relativamente mais alto do que o previsto para rochas vulcânicas, e o FCRS decorrente da desintegração radioativa é relativamente mais baixo do que o previsto para a crosta oceânica ou margem continental estável (SCLATER, 1970; TURCOTTE & OXBURGH, 1967, MCKENZIE, 1967). Isso sugere que o FCR do manto superior na área da Ilha da Trindade é relativamente baixo em comparação com o FCR do manto superior em outras áreas da crosta oceânica. Lembrando de que o fluxo de calor continental se deve à maior produção de calor radiogênico na crosta, enquanto o fluxo de calor oceânico se deve ao transporte de calor para a superfície terrestre por convecção mantélica [SCATLER, 1980, TURCOTTE & OXBURGH, 1967, MCKENZIE, 1967)

Na Ilha da Trindade em todas as rochas vulcânicas, o FCRS (Q_{sur}) mimetiza o PCRS (A_{sur}), independentemente de serem calculados por meio da química de rocha total ou por espectrometria de raios Gama. Nossa pesquisa demonstrou que os resultados obtidos por essas técnicas têm uma boa correlação (Tabela 2; Figuras 14 e 27) e que seus resultados são semelhantes, pelas equações $Q_{sur} = 21,185 \times A_{sur}$ ($R^2 = 0,9957$) e $Q_{sur} = 20,844 \times A_{sur}$ ($R^2 = 0,9968$), respectivamente análise química de rocha total e ERG (Figura 24), sendo que os resultados obtidos por ERG são ligeiramente mais altos do que os obtidos por química de rocha total.

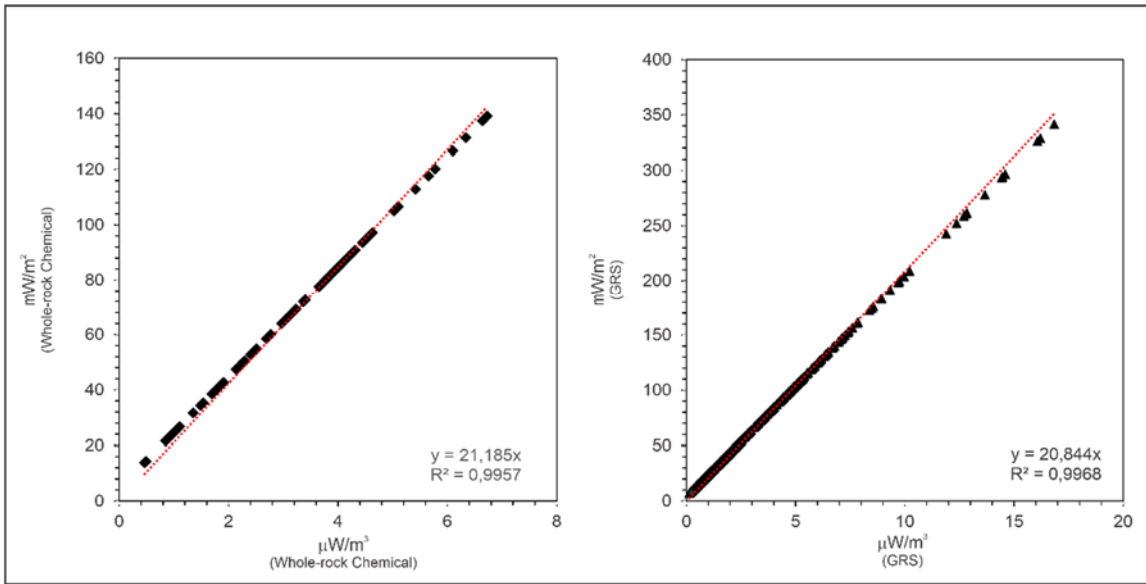


Figura 27: Comparação entre A_{sur} ($\mu W/m^3$) e Q_{sur} (mW/m^2) de todas as rochas vulcânicas da Ilha da Trindade, Oceano Atlântico Sul, Brasil: A) por análise de rocha total; B) por espectrometria de Raios Gama (ERG).

7. Conclusões

- Os elementos radioativos estão presentes em nosso cotidiano. Entendê-los se faz importante para entender como nosso planeta funciona e os processos relacionados ao mesmo. Nessa tese fizemos um estudo desde o fluxo de calor gerado pela decomposição dos mesmos até a emissão do gás Radônio na superfície. Com base nisso concluímos que:
- A temperatura e turbulência do ar apresentam picos durante o meio da tarde, mas tanto a concentração de Radônio não é esperada para aumentar neste momento.
- Os picos máximos e mínimos do Radônio e dos aglomerados iônicos em comparação com outras regiões apresentam um certo atraso ao longo do dia devido à influência geológica e aos altos teores de Radônio encontrados na área.
- O embasamento do Parque Florestal das Dunas - Natal é constituído por areias eólicas enriquecidas em minerais pesados portadores de Urânio e Tório (monazita, alanita, epidoto e thorianita), enquanto a floresta de samambaias se encontra em rochas vulcânicas fonolíticas que possuem Urânio disperso em sua matriz. Fatos esses que explicam a diferença nos valores de Radônio demonstrados anteriormente.
- Os picos do Radônio e dos aglomerados iônicos são atribuídos à liberação do mesmo para a atmosfera pela evapotranspiração das plantas, que geralmente ocorre durante o dia e especialmente a tarde.
- A posição geográfica da floresta de samambaia na serra de Trindade serviu de proteção ao desenvolvimento das mesmas. Como a área é preservada e as raízes das samambaias são grandes e localizadas acima do solo, há maior geração de aerossóis o que aumenta a pluviosidade local. O mesmo ocorre na floresta amazônica: as correntes aéreas trazem a umidade e a evapotranspiração delas fazem aumentar os aerossóis.
- Os elementos produtores de calor radiogênico na superfície (EPCR) apresentam grande variação tanto pela análise de ativação neutrônica de rocha total {U (Máx: 48,0, Mín: 0,6, GM: 3,1, DP: 3,0), Th: (Máx: 9,9, Mín: 2,3, GM: 10,5, DP: 12,0); K (Máx: 7,1, Mín: 0,2, GM: 2,8, DP: 2,1)} quanto

pela espectrometria de raios Gama [U (Máx: 32,3, Mín: 0,2, GM: 3,6, DP: 5,4), Th: (Máx: 103,9, Mín: 0,6, GM: 12,5, DP: 17,50); K (Máx: 9,2, Mín: 0,1, GM: 1,8, DP: 2,5)].

- Não há correlação entre os teores de Urânio e Tório nas amostras, e a relação Th/U é bastante variável e inferior à média crustal (3,9), mas esses radioisótopos são responsáveis por cerca de 75% do PCRS.
- A produção de calor radiogênico na superfície (PCRS) varia entre 0,46 e 6,73 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ (Med: 3,23; GM: 2,66, DP: 1,58) pela análise de ativação neutrônica de rocha total e entre 0,13 e 16,84 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ (Med: 2,14; GM: 2,15, DP: 2,77) pela espectrometria de raios Gama, e há uma boa correlação entre essas técnicas.
- As rochas vulcânicas ultrabásicas (Ankartrito, Nefelinito e Basanito: as mais baixas) apresentam um baixo PCRS, variando entre 0,5 e 4,0 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ (Med: 1,5; GM: 1,35 $\mu\text{W}/\text{m}^3$, DP: 0,89), enquanto o valor mais alto é encontrado em rochas vulcânicas intermediárias (Fonolito, Traquifonolito e Fonolito peralcalino: as mais altas), que variam entre 2,2 e 6,9 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ (Med: 3,9; GM: 3,9 $\mu\text{W}/\text{m}^3$).
- O fluxo de calor radiogênico na superfície (FCRS) na Ilha da Trindade apresenta uma média mediana de 58,3 mW/m^2 . Essa média do FCRS, calculada a partir de dados de análise de ativação neutrônica de rocha total e espectrometria de raios Gama, é semelhante ao FCRS da Terra (60 mW/m^2 , em uma grade de 12 graus na superfície da Terra), também semelhante à média do FCRS do Brasil e ligeiramente maior do que a média do FCRS de 55 mW/m^2 da intrusão alcalina do final do Cretáceo-Início do Terciário na região de Poços de Caldas (estado de Minas Gerais, Brasil).
- Recomenda-se novos estudos na área com uma cobertura maior de espectrometria de raios Gamas e mais locais de medida de Radônio para ver diferenças locais na emanação desse gás. No contexto dessa tese foi feito o que era permitido com o orçamento e maiores complementações seria de grande valia nesse campo de estudo.

8. Referências Bibliográficas

ADAMS, J. A.; OSMOND, J. K.; ROGERS, J. J.. The geochemistry of thorium and uranium. *Physics and Chemistry of the Earth*, v. 3, p. 298-348, 1959.

AIETA, E.M., SINGLEY, J.E. TRUSSELL, A.R., THORBJARNARSON, K.W., MCGUIRE, M.J. Radionuclides in drinking water: An overview. *Journal of American Water Works*, v. 79, p.144-152, 1987.

ALMEIDA, F.F.M. As ilhas oceânicas brasileiras e uma hipótese sobre a origem do Atlântico. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, Rio de Janeiro, v. 37 supplementary volume, p. 141-145, 1965.

ALMEIDA, F.F.M. Geologia e Petrologia da Ilha da Trindade. DGM/DNPM (National Department of Mineral Production, Brazilian Federal Government), Monography XVIII, 197 p. 1961.

ALVES, R.J.V.. Ilha da Trindade e Arquipélago Martin Vaz - um ensaio geobotânico. Serviço de Documentação da Marinha, 144 p, ISBN - 85.7047.054-9, 1998.

ALVES, R.J.V., SILVA, N.G.S.. De Historia Naturali Insulæ Trinitatis MDCC – MMX. Três Séculos de História Natural na Ilha da Trindade com Comentários Sobre Sua Conservação. Smashwords, ISBN: 9781370853601, 2016.

AMERICAN CANCER SOCIETY – ACS. Learn About Cancer: Find Information and resources for a specific cancer topic, 2012. Disponível em: <www.cancer.org/CancerCauses/OtherCarcinogens/Pollution/radon>. Acesso em 12/01/2023.

ANDREAE, M. O., & ROSENFELD, D. (2008). Aerosol-cloud-precipitation interactions. *Reviews of geophysics*, v. 46, n. 2, p.13-41,2008.

ANGULO, R.J., SOUZA, M.C, BARBOZA, E.G., ROSA M.L.C.C., FERNANDES, L.A., GUEDES, C.C.F., OLIVEIRA, L.H.S., MANZOLLI, R.P., DISARÓ S.T., FERREIRA, A.G., MARTIN, C.M. Quaternary sealevel changes

and coastal evolution of the Island of Trindade, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 84, n. April, p. 208–222, 2018.

ARTEMIEVA I.M., MOONEY WD. Thermal thickness and evolution of Precambrian lithosphere: a global study. *J. Geophys. Res.* v. 106, p. 16387–414. DOI: 10.1029/2000JB900439, 2001.

BAS, M. L., MAITRE, R. L., STRECKEISEN, A., ZANETTIN, B., & IUGS. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of petrology*, v. 27, n. 3, p. 745-750, 1986.

BECK, H.L., DECAMPO, J.A. AND GOGOLAK, C.V.. In-Situ Ge(Li) and NaI(Tl) Gamma-ray Spectroscopy. Report HASL-258, US Atomic Energy, 1972

BIRCH, F., ROY, R.F., DECKER, E.R. Heat flow and thermal history in New England and New York. In: Zen, E., White, mW.S., Hadley, J.B., Thompson, J.B. Eds., *Studies of Appalachian*, 1968.

CHARLSON, R.J., SCHWARTZ, S.E., HALES, J.M., CESS, R.D., COAKLEY JR., J.A., HANSEN, J.E., Hofmann, D.J.; Climate forcing by anthropogenic aerosols, *Science*, v. 255, p. 423, 1992

CHIOZZI P, PASQUALE V, VERDOYA, M. Heat from radioactive elements in young volcanic rocks by gamma Ray spectrometry. *J Volcan. Geoth. Res.* v. 119, p. 205–214, 2002.

CLARK, S. P. & RINGWOOD, A. E., Density distribution and constitution of the mantle, *Rev. Geophys.*, v. 2, p. 35-88, 1964.

CLAUSER, C. Radiogenic Heat Production of Rocks. In: Harsh Gupta (Ed.), *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*, 2nd ed., Springer, Dordrecht, preprint.v.1, p. 1-11, DOI: 10.1007/978-90-481-8702-7_74, 2011

CORDANI, U.G. Idade do vulcanismo no Oceano Atlântico Sul. B. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências USP, São Paulo, v. 1, 9-76. <https://doi.org/10.11606/T.44.2015.tde-27102015-104502>, 1970.

CORRÊA, I. C. Fisiografia e Morfologia das Cadeias Vitória-Trindade e Abrolhos. *Pesquisas em Geociências*, v. 7, n. 7, p. 11-21, 1977.

DIAS DE ALBUQUERQUE, B. C., FRANCO DE SOUZA, R., DA SILVA RODRIGUES DE SOUZA, D., DE ALMEIDA DANTAS, V., & ANTÔNIO PETTA, R. a influência de variáveis meteorológicas na concentração do gás radônio na atmosfera baixa em duas áreas com fitofisionomias distintas no planalto da Borborema. *Revista Brasileira De Climatologia*, v. 29, p. 571–601, 2022.

DAVIES, F.D Review of oceanic and global heat flow estimates *Reviews of Geophysics* doi.org/10.1029/RG018i003p00718, 1980.

DE LA ROCHE, H., LETERRIER, J., GRANCLAUDE, P. AND MARCHAL, M. A classification of volcanic and plutonic rocks using R 1 R 2 -diagram and major-element analyses – Its relationships with current nomenclature. *Chem. Geol.*,v. 29: p.183-210, 1980.

DUNNE, E. M. et al. Global atmospheric particle formation from CERN CLOUD measurements. *Science*, v. 354, n. 6316, p. 1119-1124, 2016.

FRACASSO, P. Sistemas de dunas do Parque das Dunas e Barreira do Inferno/Natal (RN): levantamento geológico/geofísico, elaboração do modelo determinístico e avaliação da vulnerabilidade/suscetibilidade frente às pressões antrópicas. MS thesis. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2005.

FAURE, G. *Principles of Isotope Geology*, 2nd edn. Wiley, New York, 589 pp, 1986.

FIGUEIREDO, C.A., BONGIOLO, E.M., JUTZELER, M., GOMES, O. DA F.M., NEUMANN, R.. Alkalic pyroclast morphology informs on fragmentation mechanisms, Trindade Island, Brazil. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* v.428, p. 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107575>, 2022.

FONSECA, V. P. et al. Folha Natal SB.25-V-C-V: carta geológica - escala 1:100.000. Natal: CPRM; UFRN, 2012. 1 mapa, color. Escala 1:100.000.

GABELMAN, J. W. Migration of uranium and thorium – exploration significance. Tulsa, Amer. Assos. Petro. Geol., 168p, 1977.

GEOMAPAPP, Acessado pela última vez em 14/05/2022

F.; FÖRSTER, A.; FRÖHDER, R.; FUENTES, K.; HAJTO, M.; HARRIS, R.; JÖELEHT, A.; LIEBING, H.; LIU, S.; LÜDTKE, G.; MADON, M.; NEGRETE-ARANDA, R.; POORT, J.; REZNIK, I. J.; RIEDEL, M.; ROLANDONE, F.; STÅL, T.; VERDOYA, M.; WU, J.-N. The Global Heat Flow Database: Update 2023, v. 1., GFZ Data Services. <https://doi.org/10.5880/fidgeo.2023.008>, 2023

GOESA, S., HASTEROK, D., SCHUTTC, L., KLÖCKING, M. 2020, Continental lithospheric temperatures: A review. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. v. 306, p. 106-509, <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2020.2020>.

HASTEROK, D., CHAPMAN, D. Heat production and geotherms for the continental lithosphere. *Earth and Planetary Science Letters* 307, 59e70. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.04.034>.,2011

HASTEROK, D., GARD, M. AND WEB, J. (2018). On the radiogenic heat production of metamorphic, igneous, and sedimentary rocks. *Geoscience Frontiers* 9/6, 1777-1794. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2017.10.012>

<http://heatflow.org/heat-flow/> Accessed: 2022/02/24.

ICRP. Lung cancer risk from radon and progeny and statement on radon. ICRP Publication 115. *Ann. ICRP* v. 40, n. 1,p. 1–64, 2010.

JAUPART C., LABROSSE S. AND MARESCHAL, J.-C. Temperatures, Heat and Energy in the Mantle of the Earth. In: Shubert, G., Watts, A. (Eds.), *Treatise on Geophysics: Crust and Lithospheric Dynamics*. Vol. 7. Elsevier, Ch. 6, p. 254-303, 2007.

JAUPART, C. AND MARESCHAL, J.-C. Heat flow and thermal structure of the lithosphere. In: Shubert, G., Watts, A. (Eds.), *Treatise on Geophysics: Crust and Lithospheric Dynamics*. Vol. 6. Elsevier, Ch. 5, p. 217–251, 2007.

JAYARATNE, E.R. LING X., MORAWSKA, The Role of Vegetation in Enhancing Radon concentration and Ion Production in the Atmosphere. *Environ. Sci. Technol.*, v. 45, n. 15, p. 6350–6355, 2011.

JESSOP A.M.: *Thermal geophysics*, Elsevier, Amsterdam, 316 pp, 1990.

KRAMERS, J.D.; RODDICK, J.C.M. AND DAWSON, J.B. Trace element and isotope studies on veined, metasomatic and “MARID” xenoliths from Bultfontein, South Africa. *Earth and Planetary Sciences Letters* v. 65, p. 90–106. doi.org/10.1016/0012-821X(83)90192-9, 1983

KOPPERS, A.A.P., BECKER, T.W., JACKSON, M.G. et al. Mantle plumes and their role in Earth processes. *Nature Review Earth Environment*, v. 2, p. 382–401. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00168-6>, 2021.

LANGENDÖRFER, U.; CUNTZ, M.; CIAS, P.; PEYLIN P.; BARIAC, T.; MILYUKOVA, I.; LEVIN, I. Modelling of biospheric CO₂ gross fluxes via oxygen isotopes in a spruce forest canopy: a ²²²Rn calibrated box model approach. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, v. 54, n. 5, p. 476-496, 2002.

LING, X., JAYARATNE, E. R., & MORAWSKA, L. Air ion concentrations in various urban outdoor environments. *Atmospheric Environment*, v. 44, p. 2186-2193, 2010.

MARQUES, L.S., ULBRICH, M.N.C., RUBERTI E., TASSINARI, C.G. PETROLOGY, geochemistry and Sr-Nd isotopes of Trindade and Martin Vaz volcanic rocks (Southern Atlantic Ocean). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 93, p. 191-216, 1999.

MARTENS, C. S.; SHAY, T. J.; MENDLOVITZ, H. P.; MATROSS, D. M.; SALESKA, S. R.; WOFSY, S. C.; WOODWARD, W. S.; MENTON, M. C.; DE MOURA, J. M. S.; CRILL, P. M.; DE MORAES, O. L. L.; LIMA, R. L. Radon fluxes in tropical forest ecosystems of Brazilian Amazonia: night-time CO₂ net ecosystem exchange derived from radon and eddy covariance methods. *Global Change Biology*, v. 10, n. 5, p. 618-629, 2004.

MCKENZIE, D. P. AND SCLATER, J. G., Heat flow in the eastern Pacific and sea floor spreading, *Bull. Volcanologique*, v. 33, n.1, p. 101-118, 1969.

MCKENZIE, D. Some remarks on heat flow and gravity anomalies}. *Journal of Geophysical Research*}, v. 72, p. 6261-6273, 1967.

MEGONIGAL, J. P.; BREWER, P. E.; KNEE, K. L. Radon as a natural tracer of gas transport through trees. *The New Phytologist*, v. 225, p. 1470-1475, 2020.

MONTEIRO, L. G. P.; SANTOS, ANDERSON COSTA DOS ; PIRES, G. L. C. ; BARAO, L. M. ; ROCHA JUNIOR, E. R. V. ; BIANCINI, J. R. C. ; HACKSPACHER, P. C. ; ARAÚJO-JÚNIOR, HERMÍNIO ISMAEL DE ; JACK, I. K. ; SANTOS, J. F. . Chapter 10 - Trindade Island: evolution of the geological knowledge. Trindade Island: evolution of the geological knowledge. 1ed.: Academic Press, v. 1, p. 337-389, 2022.

MOTOKI, A., MOTOKI, K.F., MELO, D.P. Submarine morphology characterization of the Vitória-Trindade Chain and the adjacent areas, State of Espírito Santo, Brazil, based on the predicted bathymetry of the TOPO version 14.1. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, Brasília, v. 13, n. 2, p. 151-170, 2012.

MOTOKI, K. F.; CAMPOS, T.F.C. ; PASTURA, V. F. S. ; SICHEL, S. E. . A influência da desintegração do radônio transportado pela evapotranspiração das plantas na formação de aerossóis atmosféricos em ambiente de florestas continental e insular. *BRAZILIAN JOURNAL OF RADIATION SCIENCES*, v. 8, p. 1-11, 2020.

MÜLLER, R.D., ROEST, W.R., ROYER, J.Y., GAHAGAN, L.M., AND SCLATER, J.G. Digital isochrons of the world's ocean floor. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 102, n. B2, p. 3211-3214, 1997.

MÜLLER, R.D., SDROLIAS, M., GAINA, C., AND ROEST, W.R. Age, spreading rates, and spreading asymmetry of the world's ocean crust: *Geochemistry Geophysics Geosystems*, v. 9, p. 1-19, 2008.

PALME, H. AND O'NEILL, H. S. C. 2014. Composition of the Primitive Mantle, in: *Treatise on Geochemistry*, Vol. 2, The Mantle and Core, edited by: Carlson, R. W., Elsevier Scientific Publishers, Amsterdam, 1–38, 2003; Rudnick, R.L. and Gao, S. (2014) Composition of the Continental Crust. In: Holland, H.D. and Turekian, K.K., Eds., *Treatise on Geochemistry*, Elsevier, Oxford, 1-51. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00301-6>)

PASQUALE, V.; VERDOYA, M.; CHIOZZI, P. Geothermics: Heat flow in the lithosphere. Heidelberg: Springer, v. 1, p. 15-49, 2014.

PASQUALON, N.G., LIMA, E.F., SCHERER, C.M.S., ROSSETI, L.M.M., LUZ, F.R. Lithofacies association and stratigraphy of the Paredão Volcano, Trindade Island, Brazil. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 380, p. 48-63. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.05.011>, 2019.

PIRES, G. L. C., BONGIOLO, E. M., GERALDES, M. C., RENAC, C., SANTOS, A. C., JOURDAN, F., & NEUMANN, R. New $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages and revised $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}^*$ data from nephelinitic phonolitic volcanic successions of the Trindade Island (South Atlantic Ocean). *Journal Of Volcanology and Geothermal Research*. v. 327, p. 531-538, 2016.

PIRES, G.L.C., BONGIOLO, E.M. The nephelinitic–phonolitic volcanism of the Trindade Island (South Atlantic Ocean): Review of the stratigraphy, and inferences on the volcanic styles and sources of nephelinites. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 72, p.49-62. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2016.07.008>, 2016

POLLACK H.N., HURTER S.J. AND JOHNSON J.R. Heat flow from the Earth's interior: analysis of the global data set. *Rev. Geophys.* v.31, p;267–80, 1993

POLLACK, H.N. AND CHAPMAN, D.S., On the regional variation of heat flow, geotherms, and lithospheric thickness. *Tectonophysics* v.38, p.279–96, 1977

ROSENFELD, D., LOHMANN, U., RAGA, G. B., O'DOWD, C. D., KULMALA, M., FUZZI, S., ... & ANDREAE, M. O. Flood or drought: how do aerosols affect precipitation?. *Science*, v; 321, n. 5894, p.1309-1313, 2008

ROY, R. F., BLACKWELL, D. D., BIRCH, F. Heat generation of plutonic rocks and continental heat flow provinces, *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 5, p. 1-12, 1968.

RUDNICK, R.L., MCDONOUGH, W.F., O'CONNELL RJ. Thermal structure, thickness and composition of continental lithosphere. *Chem. Geol.* v.145, p. 395–411, 1998.

RUSSELL, J. K., DIPPLE G.M. AND KOPYLOVA, M.G. Heat production and heat flow in the mantle lithosphere, Slave craton, Canada. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* v.123, p. 27–44, 2001.

RYAN, W. B. F.; S.M. CARBOTTE, J.; COPLAN, S.; O'HARA, A.; MELKONIAN, R.; ARKO, R.A.; WEISSEL, V.; FERRINI, A.; GOODWILLIE, F.; NITSCHKE, J.; BONCZKOWSKI, B AND ZEMSKY, R. Global Multi-Resolution Topography (GMRT) synthesis data set, *Geochemistry Geophysics Geosystems.*, v. 10, n. 3 Q03014, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2016.07.00810.1029/2008GC002332>., 2009

RYBACH, L. Determination of the heat production rate. In: RYBACH L, STEGENA L, HAENEL R (eds) *Handbook of terrestrial heat-flow density determination*. Kluwer, Dordrecht, p. 125-142, 1988.

RYBACH, L. 1976. Radioactive heat production in rocks and its relation to other petrophysical parameters. *PAGEOPH* 114, 309–317 (1976). <https://doi.org/10.1007/BF00878955>

CERMAK, V. ,HUCKENHOLZ, H. G., RYBACH, L., & SCHMID, R.. Radioactive heat generation in rocks. *Landolt-Bornstein numerical data and functional relationships in science and technology. New Series, Group V. Geophysics and Space Research*, v. 1, p. 433-481, 1982.

SANTOS, A. C., MOHRIAK, W. U., GERALDES, M. C., SANTOS, W. H., PONTE-NETO, C. F., & STANTON, N. Compiled potential field data and seismic surveys across the Eastern Brazilian continental margin integrated with new magnetometric profiles and stratigraphic configuration for Trindade Island, South Atlantic, Brazil. *International Geology Review*, v. 61, n. 14, p. 1728-1744, 2019.

SAPHYMO. *Alphaguard: Portable Radon Monitor*, Frankfurt, Alemanha, Saphymo GmbH, 05/2009, 59 p., 2009.

SCLATER, J.G. AND FRANCHETEAU, J. 1970, The Implications of Terrestrial Heat Flow Observations on Current Tectonic and Geochemical Models of the Crust and Upper Mantle of the Earth, *Geophys. J. R. Astron. Soc* v. 20/5, p.509–542, doi.org/10.1111/j.1365-246X.1970.tb06089.x, 1970

SCLATER, J.G., JAUPART, C., GALSON, D., 1980, The heat flow through the oceanic and continental crust and the heat loss of the Earth. *Rev. Geophys. Space Phys.* v.18, p.269–311, 1980.

SECIRM Secretaria da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar. Protrindade: programa de pesquisas científicas na Ilha da Trindade. 10 anos de pesquisas Brasília 200 p. ISBN: 978-85-62033-03-2, 2017.

SEINFELD, J. H., & PANDIS, S. N. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change. John Wiley & Sons. 1119 p, 2016

SIEBEL, W., BECCHIO, R., VOLKER F., HANSEN, M.A.F, VIRAMONTE, J., TRUMBELL, R.B., HAASE, G., ZIMMER, M. Trindade and Martin Vaz Islands, South Atlantic: isotopic (Sr, Nd, Pb) and trace elements constraints on plume related magmatism. Journal of South American Earth Sciences. v. 13, p. 79-103, 2000.

SILVA, N.G., ALVES, R.J.V. 2011. The eradication of feral goats and its impact on plant biodiversity - a milestone in the history of Trindade Island, Brazil. Rodriguésia v. 62, p. 717-719. <https://doi.org/10.1590/2175-7860201162315>, 2011.

SLEEP, N. H. Sensitivity of heat flow and gravity to the mechanism of sea floor spreading, J. geophys. Res.,v. 74, p. 542-549, 1969.

STEIN, C.A. Heat Flow of the Earth. in A Handbook of Physical Constants AGU Reference Shelf. 376 p.. <https://doi.org/10.1029/RF001p0144>, 1995.

TIET, L. V. Géochimie de L'Uranium et du Thorium dans les Granitoides et les Formations Associées de la Montagne Bourbonnaise (Massif Central Francois). Liaisons Possibles avec les Mineralisations Uranifères des Bois Noirs. Lorraine. França. (These, Inst Nat. Polytecnn), 1975.

TINSLEY, Brian A.; YU, Fangqun. Atmospheric ionization and clouds as links between solar activity and climate. GEOPHYSICAL MONOGRAPH-AMERICAN GEOPHYSICAL UNION., v. 141, p. 321-340, 2003.

TURCOTTE, D. & OXBURGH, E. Finite amplitude convection cells and continental drift. J. Fluid Mech. v.28, p. 29-42, 1967.

TRUMBORE, S, E.; Keller, M.; Wofsy, S. C. and Da Costa, J. M. Measurements of soil and canopy exchange rates in the Amazon rain forest using

222Rn. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 95, n. D10, p. 16865-16873, 1990.

TWOMEY, S.. The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds. *Journal of the atmospheric sciences*, v. 34, n. 7, p. 1149-1152, 1977.

ULBRICH M.N.C. Petrography of alkaline volcanic-subvolcanic rocks from the Brazilian Fernando de Noronha archipelago, Southern Atlantic Ocean. *Boletim do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, Série Científica*, São Paulo, v. 24, p. 77-94, 1994.

USSLER III, William et al. Radon 222 tracing of soil and forest canopy trace gas exchange in an open canopy boreal forest. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 99, n. D1, p. 1953-1963, 1994.

VALENCIO, D.A., MENDÍA, J.E. Paleomagnetism and K-Ar age of some rocks of the Trindade Complex and the Valado Formation from Trindade Island, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 4, p. 124-132, 1974.

VITORELLO, I., HAMZA, V. M., AND POLLACK, H. N.. Terrestrial heat flow in the Brazilian highlands, *J. Geophys. Res.*, v.85, p. 3778– 3788, 1980

CHAPMAN, D.S. & POLLACK, H.N., Global heat flow: a new look, *Earth planet. Sci. Lett.*, v. 28, p. 23–32, 1975

POLLACK, H.N. & CHAPMAN, D.S.. Mantle heat flow, *Earth planet. Sci. Lett.*, v. 34, p. 174–184, 1977.

VITORELLO, I., POLLACK, H.N., On the variation of continental heat flow with age and the thermal evolution of the continents. *J. Geophys. Res.* v. 85, p. 983–995, 1980.

WEAVE, B.L. Geochemistry of highly undersaturated ocean island basalt suites from the South Atlantic Ocean: Fernando de Noronha and Trindade islands. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, v. 105, p. 502-515, 1990.

WHO. WHO Handbook on Indoor Radon: a Public Health Perspective. WHO Press, Geneva p, 2009.

