



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NUCLEAR
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES

VANDERLEI VILAÇA DE MOURA

Avaliação da Radioatividade Natural do Granito Madeira - Região Norte do Amazonas

Belo Horizonte
2017

VANDERLEI VILAÇA DE MOURA

AVALIAÇÃO DA RADIOATIVIDADE NATURAL DO GRANITO MADEIRA - REGIÃO
NORTE DO AMAZONAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciências e Técnicas Nucleares como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências e Técnicas Nucleares.

Área de concentração: Ciências das Radiações

Orientadora: Cláudia Pereira Bezerra Lima

BELO HORIZONTE
2017

FICHA CATALOGRÁFICA

M929a	<p>Moura, Vanderlei Vilaça de. Avaliação da radioatividade natural do Granito Madeira - região norte do Amazonas [manuscrito] / Vanderlei Vilaça de Moura.- 2017. 117 f., enc.: il.</p> <p>Orientadora: Cláudia Pereira Bezerra Lima.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Anexos e apêndices: f. 106-117.</p> <p>Bibliografia: f. 97-105.</p> <p>1. Engenharia nuclear - Teses. 2. Radiação - Teses. 3. Urânio - Teses. 4. Tório - Teses. 5. Zircônio - Teses. I. Lima, Cláudia Pereira Bezerra. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p>CDU: 621.039(043)</p>
-------	---



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES



FOLHA DE APROVAÇÃO

AValiação DA RADIOATIVIDADE NATURAL DO GRANITO MADEIRA - NORTE DO AMAZONAS

VANDERLEI VILAÇA DE MOURA

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em CIÊNCIAS E TÉCNICAS NUCLEARES, área de concentração CIÊNCIAS DAS RADIAÇÕES.

Aprovada em 30 de maio de 2017, pela banca constituída pelos membros:

Profa. Cláudia Pereira Bezerra Lima - Orientadora
Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG

Profa. Maria Auxiliadora Fortini Veloso
Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG

Prof. Arno Heeren de Oliveira
Departamento de Engenharia Nuclear - UFMG

Profa. Talita de Oliveira Santos
Departamento de Anatomia e Imagem-UFMG

Belo Horizonte, 30 de maio de 2017.

Dedico este trabalho aos meus filhos Rafael, Pedro e Catarina e a minha
esposa Marina.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro a Deus por tudo que tem me proporcionado.

Aos meus pais, Pedro e Nenzinha, pelo apoio, carinho e amor incondicionais.

À Dra. Cláudia Pereira, minha orientadora, pelo apoio e confiança.

À Dra. Maria Auxiliadora pelas palavras de incentivo e pelo apoio.

Ao Curso de Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares do Departamento de Engenharia Nuclear da Universidade Federal de Minas Gerais, pela oportunidade de realização do mestrado.

Ao Sr. Daniel Medeiros e ao Sr. Kenji Martins pela amizade e apoio institucional sem o qual este estudo não seria realizado.

Aos meus amigos Cabrera, Tony, Fortunato e Thiago pelo companheirismo nas horas difíceis.

Ao meu grande amigo Paulinho pelas palavras, pelo incentivo e por acreditar em mim mais do que eu mesmo.

À minha esposa Marina por estar sempre ao meu lado.

In Memoriam...

Catarina Rosa de Jesus

"Freezin' rests his head on a pillow made of concrete again
Oh Feelin' maybe he'll see a little better any days
Oh hand out faces that he sees come again ain't that familiar
Oh dark grin he can't help when he's happy he looks insane
Even flow

Thoughts arrive like butterflies
Oh he don't know
So he chases them away
Someday yet he'll begin his life again
Life again"

Pearl Jam

RESUMO

Para avaliação da radiação natural de fundo foi selecionada uma área no norte do Estado do Amazonas. Trata-se do Granito Madeira, localizado dentro de uma mineradora NORM (*Naturally Occurring Radioactive Materials*) – mineradora que extrai minérios com urânio e tório naturais associados. O equipamento utilizado um detector cintilador de iodeto de sódio calibrado com uma fonte de Cs-137 e aferido com zirconita – minério de zircônio com urânio e tório naturais associados. Devido a extensão do Granito Madeira (60 km²) e a dificuldade de acesso, pois trata-se de área coberta por floresta em quase sua totalidade, foram selecionadas 14 áreas representativas compreendendo: áreas de sondagem; áreas próximo a locais explorados no passado; áreas sem ação antrópica. Os dados obtidos pelo detector cintilador foram classificados, georreferenciados e tratados com o uso dos *softwares* GARM (*Geolocation Application for Radiation Monitoring*) e QGIS (*Quantum Gis*) com o objetivo de representar as taxas de equivalente de dose ambiental em mapas, tabelas e histogramas de frequência. Posteriormente, as taxas de dose foram utilizadas para a obtenção da dose anual realtiva à radiação gama no Granito Madeira. Estes dados foram representados em histogramas de frequência, tabelas e mapas com curvas de nível e de isodose pelo *software* Surfer. Os valores médios obtidos foram: $0,7 \pm 0,4$ uSv.h⁻¹, para a taxa de equivalente de dose ambiental; e $6,0 \pm 3,0$ mSv para a dose anual relativa a radiação gama. Os resultados deste estudo foram comparados com o de outros autores e com o UNSCEAR, 2010 (*United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*) onde verificou-se que a radioatividade natural de fundo do Granito Madeira é superior a média mundial, sendo superior mesmo a de outras áreas com material NORM.

Palavras chaves: radioatividade natural, equivalente de dose ambiental, NORM, georeferenciamento.

ABSTRAC

To evaluate the natural background radiation, an area was selected in the northern part of the State of Amazonas. It is the Granite Madeira, located inside a mining NORM (*Naturally Occurring Radioactive Materials*) – mining company that extracts ores with natural uranium and thorium. The equipment used was a sodium iodide scintillator calibrated with a source of Cs-137 and measured with zirconite – zirconium ore with associated natural uranium and thorium. Due to the extension of the Granito Madeira (60 km²) and the difficulty of access, since it is an area covered by forest in almost totality, 14 representative areas were selected, comprising: survey areas; Areas close to sites explored in the past; Areas without anthropogenic action. The data obtained by the scintillator were classified, georeferenced and treated using the GARM (Geolocation Application for Radiation Monitoring) and QGis (Quantum Gis) softwares with the objective of representing the environmental dose equivalent rates in maps, tables and frequency histograms. Subsequently, dose rates were used to obtain the the annual dose relative to gamma radiation in Granito Madeira. These data were represented in frequency histograms, tables and maps with level curves and isodose by Surfer software. The mean values obtained were: 0.7 ± 0.4 uSv.h⁻¹, for the ambient dose equivalent rate; And 6.0 ± 3.0 mSv for the annual dose relative to gamma radiation. The results of this study were compared with that of other authors and UNSCEAR, 2010 (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) where it was verified that the natural radioactivity of the bottom of the Madeira Granite is superior to the world average, being superior Even from other areas with NORM material.

Keywords: Radioactive background, environmental dose equivalent, NORM, georeferencing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1- Área de estudo. Localiza-se a cerca de 350 km ao norte de Manaus-AM.....	21
Figura 2.1 – Províncias geocronológicas do Cráton Amazônico.	25
Figura 2.2 – Imagem de satélite mostrando o enquadramento regional dos Granitos Europa (a), Água Boa (b) e Madeira (c).	26
Figura 2.3 – Taxas de dose monitoradas por SOUZA et al., 2015.	35
Figura 3.1 – Sistema AT6101C Spectrometer.....	38
Figura 3.2 – Janela do <i>software</i> Atas Scanner.....	40
Figura 3. 3 – Janela do Garm.....	41
Figura 3.4 – Janela do QGis 1.8.0 – Lisboa.	41
Figura 3.5 – Janela do Surfer 8.0.....	42
Figura 3.6 – Localização das áreas selecionadas. Em destaque, a Rocha Sã – atual área de exploração mineral.	44
Figura 3. 7 – Aspecto da Área 3.	45
Figura 3.8 – Aspecto da área 5.	45
Figura 3. 9 – Localização da fonte extensa.	47
Figura 3. 10 – Sistema AT6101C num dos processos de aferição.	48
Figura 4.1 – Histograma de frequências das taxas de equivalente de dose ambiental da Área 1.	53
Figura 4.2 – Histograma de frequências das taxas de equivalente de dose ambiental da Área 2.	53
Figura 4.3 – Histograma de frequências das taxas de equivalente de dose ambiental da Área 3.	54

Figura 4.4 – Histograma de frequências das taxas de equivalente de dose ambiental da Área 4.	54
Figura 4.5 – Histograma de frequências das taxas de equivalente de dose ambiental da Área 5.	55
Figura 4.6 – Histograma de frequências das taxas de equivalente de dose ambiental da Área 6.	55
Figura 4.7 – Histograma de frequências das taxas de equivalente de dose ambiental da Área 7.	56
Figura 4.8 – Histograma de frequências das taxas de equivalente de dose ambiental da Área 8.	56
Figura 4.9 – Histograma de frequências das taxas de equivalente de dose ambiental da Área 9.	57
Figura 4.10 – Histograma de frequências das taxas de equivalente de dose ambiental da Área 10.	57
Figura 4.11 – Histograma de frequências das taxas de equivalente de dose ambiental da Área 11.	58
Figura 4.12 – Histograma de frequências das taxas de equivalente de dose ambiental da Área 12.	58
Figura 4.13 – Histograma de frequências das taxas de equivalente de dose ambiental da Área 13.	59
Figura 4.14 – Histograma de frequências das taxas de equivalente de dose ambiental da Área 14.	59
Figura 4.15 – Histograma de frequências das taxas de dose ambiental – Consolidado das áreas monitoradas do Granito Madeira.....	60
Figura 4.16 – Distribuição espacial das taxas de dose na Área 1 (área de sondagem).....	61
Figura 4.17 – Distribuição espacial das taxas de dose da Área 2 (sem ação antrópica).....	62
Figura 4. 18 – Distribuição espacial das taxas de dose da Área 3 (próximo a área explorada no passado).	63

Figura 4. 19 – Distribuição espacial das taxas de dose da Área 4 (próximo a área explorada no passado).	64
Figura 4.20 – Distribuição espacial das taxas de dose da Área 5 (próximo a área explorada no passado).	65
Figura 4.21– Distribuição espacial das taxas de dose da Área 6 (sem ação antrópica).....	66
Figura 4. 22 – Distribuição espacial das taxas de dose da Área 7 (sem ação antrópica).....	67
Figura 4.23 – Distribuição espacial das taxas de dose da Área 8 (área de sondagem).....	68
Figura 4.24 – Distribuição espacial das taxas de dose da Área 9 (próximo a área explorada no passado).	69
Figura 4. 25 – Distribuição espacial das taxas de dose da Área 10 (próximo a área explorada no passado).	70
Figura 4.26 – Distribuição espacial das taxas de dose da Área 11 (sem ação antrópica).....	71
Figura 4.27 – Distribuição espacial das taxas de dose da Área 12 (área de sondagem).....	72
Figura 4.28 – Distribuição espacial das taxas de dose da Área 13 (sem ação antrópica).....	73
Figura 4.29 – Distribuição espacial das taxas de dose da Área 14 (sem ação antrópica).....	74
Figura 4. 45 – Histograma de doses anuais relativas à radiação gama no Granito Madeira. ...	77
Figura 4.30 – Doses anuais relativas a radiação gama na Área 1.....	78
Figura 4. 31 – Doses anuais relativas a radiação gama na Área 2.....	79
Figura 4. 32 – Doses anuais relativas a radiação gama na Área 3.....	80
Figura 4. 33 – Doses anuais relativas a radiação gama na Área 4.....	81
Figura 4. 34 – Doses anuais relativas a radiação gama na Área 5.....	82
Figura 4.35 – Doses anuais relativas a radiação gama na Área 6.....	83
Figura 4. 36 – Doses anuais relativas a radiação gama na Área 7.....	84
Figura 4. 37 – Doses anuais relativas a radiação gama na Área 8.....	85
Figura 4. 38 – Doses anuais relativas a radiação gama na Área 9.....	86
Figura 4. 39 – Doses anuais relativas a radiação gama na Área 10.....	87

Figura 4.40 – Doses anuais relativas a radiação gama na Área 11.....	88
Figura 4.41 – Doses anuais relativas a radiação gama na Área 12.....	89
Figura 4.42 – Doses anuais relativas a radiação gama na Área 13.....	90
Figura 4. 43 – Doses anuais relativas a radiação gama na Área 14.....	91
Figura 4. 44 – Doses anuais relativas a radiação gama no Granito Madeira – consolidação dos dados.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Resultados obtidos por SACHETT, 2002.....	31
Tabela 2.2 – Taxas de dose monitoradas por SANTOS, 2006.....	32
Tabela 2. 3 – Resultados obtidos por CAVALCANTI, 2012.....	33
Tabela 2.4 – Dose média anual e intervalo típico de doses individuais por fonte ou modo de exposição.....	36
Tabela 3. 1– Principais características do detector.....	39
Tabela 3. 2 – <i>Softwares</i> utilizados.....	39
Tabela 3.3 – Áreas selecionadas do Granito Madeira.....	43
Tabela 3. 4 – Dados da calibração do Sistema AT6101C.....	46
Tabela 3.5 – Algumas características das fontes de zirconita.....	47
Tabela 3.6 – Resultado das aferições do AT6101 com a fonte extensa.....	48
Tabela 4. 1 – Dados obtidos na monitoração do Granito Madeira.....	52
Tabela 4.2 – Comparação das taxa de dose deste trabalho com outras da literatura.....	75
Tabela 4.3 – Doses anuais potenciais relativas à radiação gama no Granito Madeira.....	76
Tabela 4. 4 – Comparação das doses anuais deste trabalho com outras da literatura.....	93
Tabela A.1 – Constantes da Equação A.7.....	111
Tabela A.2 – Resultado da análise química da zirconita utilizada nas fontes de aferição.....	112
Tabela A. 3 – Resumos e trabalhos desenvolvidos deste estudo.....	113

LISTA DE ABREVIATURAS

AIEA – Agência Internacional de Energia Atômica

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

Am-241 – Isótopo 241 do amerício

BG – Background

CDTN – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear

Cs-137 – Isótopo 137 do cézio

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear

Co-60 – Isótopo 60 do cobalto

cps – contagem por segundo

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral

ETR – Elementos de terras raras

GIS – Geographic Information System

GM – Geiger-Muller

GPS – global positioning system

Gy – Gray

ICRP – International System of Radiological Protection

ICRU – International Commission on Radiation Units & Measurements

INAC – International Nuclear Atlantic Conference

INB – Industrias Nucleares do Brasil

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

LAPOC – Laboratório de Poços de Caldas

NORM - Naturally Occurring Radioactive Material - Material Radioativo de Ocorrência Natural.

RMB - Reator Multipropósito Brasileiro

Sv – Sievert

Th-232 – Isótopo 232 do tório

UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation

U-238 – Isótopo 238 do urânio

SUMÁRIO

1	Introdução.....	20
1.1	Objetivo Principal.....	22
1.2	Objetivos secundários.....	22
2	Revisão Bibliográfica	24
2.1	Cráton Amazônico.....	24
2.1.1	A região do Granito Madeira.....	26
2.1.2	Granito Madeira	27
2.2	Definição de grandezas	28
2.3	Uso de dados radiológicos georreferenciados	30
2.4	<i>United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation</i> (UNSCEAR).....	35
3	Materiais e métodos.....	37
3.1	Materiais	37
3.1.1	Sistema AT6101C Spectrometer	37
3.1.2	– <i>Softwares</i> utilizados.....	39
3.2	Metodologia.....	42
3.2.1	Seleção de áreas do Granito Madeira	43
3.2.2	Aferição do Sistema AT6101C	46
3.2.3	Obtenção das taxas de equivalente de dose ambiental e tratamento dos dados.....	49
4	Resultados e discussões.....	51
4.1	Monitoração das taxas de equivalente de dose ambiental.....	51
4.1.1	Histogramas de frequência das taxas de equivalente de dose ambiental ..	53
4.1.2	Mapas com a representação dos pontos monitorados nas áreas.....	60
4.1.3	Comparação das taxas de dose deste estudo com o de outros autores	75

4.2 Determinação da dose anual relativa à radiação gama.....	76
4.2.1 Mapas com doses anuais	77
4.1.2 Comparação da dose anual deste estudo com o de outros autores	93
5 Conclusões.....	95
Referências	97
Apêndice I – Glossário	106
Apêndice II – Determinação da atividade específica das fontes de zirconita	109
Apêndice III – Resumos e Trabalhos aceitos	113
Anexo I – Séries de decaimento do urânio-238 e do tório-232.....	114
Anexo II – Certificado de Calibração - AT6101C	116

1 INTRODUÇÃO

O ser humano é continuamente exposto à radiação ionizante por fontes utilizadas na medicina, indústria e, principalmente, por fontes naturais. Esta última é responsável pela existência de uma radiação natural de fundo ou *background*.

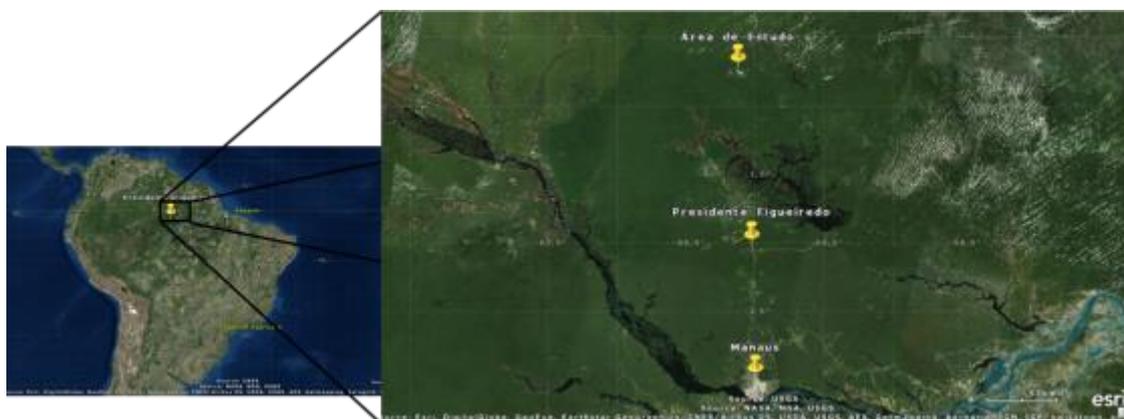
As fontes naturais de radiação devem-se aos raios cósmicos e aos radionuclídeos naturais. Estes podem ser classificadas em dois tipos principais. O primeiro são os radionuclídeos cosmogênicos, oriundos das interações entre as partículas de alta energia provenientes do espaço com gases da atmosfera. Como exemplo, cita-se o carbono-14 (ARAMBURU e BISBAL, 1994).

O segundo tipo são os radionuclídeos primordiais como os das séries de decaimento do U-238 (urânio-238), do U-235 (urânio-235) e do Th-232 (tório-232) que são oriundos da própria formação do planeta Terra (MARTIN, 2006). Estes radionuclídeos estão presentes em areias, solos e rochas. Assim esse material é conhecido como material radioativo de origem natural ou material NORM (*Naturally Occurring Radioactive Material*). Ele está distribuído por toda a superfície do planeta Terra. Mas, esta distribuição não é homogênea. Ela depende do tipo de rocha, sendo que as magmáticas, como o granito, possuem maiores concentrações de radionuclídeos das séries do urânio e do tório e, conseqüentemente, áreas de radioatividade natural mais elevadas do que a média mundial (UNSCEAR, 2010). Como exemplos, destas áreas citam-se regiões da Índia, do Irã e do Brasil. Neste último destacam-se o planalto de Poços de Caldas; algumas áreas do Escudo das Guianas, nos estados do Pará e Amazonas; algumas praias do Sul da Bahia e do Espírito Santo (CAVALCANTI, 2012; CPRM, 2009; VASCONCELOS *et al.*, 2013).

Muitas vezes, utilizam-se rochas magmáticas como material de construção civil ou elas podem apresentar mineralizações de elementos de interesse tais como ouro, terras raras, estanho, alumínio, nióbio, carvão mineral, tântalo, por exemplo. Nestes casos pode ocorrer a exploração desse material que fica sujeita ao atendimento de normas da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) já que a atividade pode expor o ser humano à radiação ionizante. Este tipo de instalação é uma mineradora NORM ou instalação mínero-industrial (CNEN, 2014 B).

Uma importante mineradora NORM, área de estudo deste trabalho, localiza-se a 350 quilômetros ao norte de Manaus, Amazonas – vide Figura 1.1. A área situa-se sobre o Escudo das Guianas e foi formada por intenso vulcanismo que possibilitou a mineralização de urânio, tório, nióbio, tântalo, estanho, alumínio e terras raras numa mesma matriz granítica. A região possui 3 grandes formações geológicas: o Granito Água Boa, explorado nos anos 80 e 90 na forma de aluvião; o Granito Madeira, atualmente em processo de exploração em mina de céu aberto e o Granito Europa ainda inexplorado, porque tem parte de sua área dentro de uma reserva indígena.

Figura 1.1- Área de estudo. Localiza-se a cerca de 350 km ao norte de Manaus-AM.



Assim o objetivo deste trabalho é a avaliação da radioatividade natural no Granito Madeira. A escolha deste estudo de caso foi feita porque o granito:

I) É uma imensa área com material NORM localizada dentro de uma mineradora em operação e em área extremamente remota sendo cercada por reservas ambientais e indígenas.

II) Possui áreas inexploradas, áreas em lavra e áreas com perspectiva de exploração no futuro. Assim, pode-se avaliar a radioatividade natural em três estágios diferentes de exploração mineral.

III) É uma área com mais de 95% com cobertura de floresta nativa. Assim, é possível monitorar a radioatividade natural em áreas de floresta nativa com pouca ou nenhuma ação antrópica.

IV) Apesar de ser área extremamente remota, possui alguns acessos e trilhas que auxiliam na investigação das taxas de equivalente de dose ambiental.

1.1 Objetivo Principal

Mapear e avaliar a radioatividade natural no Granito Madeira, uma formação geológica NORM, localizado a 350 quilômetros ao norte de Manaus, estado do Amazonas.

1.2 Objetivos secundários

I) Estimar a dose externa relativa à radiação gama na região do Granito Madeira.

II) Contribuir com dados sobre as condições radiológicas iniciais para o descomissionamento de uma instalação NORM.

III) Fornecer dados para a avaliação da contribuição humana para a alteração da radiação de fundo.

IV) Propor uma metodologia de monitoração radiológica ambiental para a radiação gama.

V) Fornecer dados para a estimativa da dose coletiva gama de indivíduos ocupacionalmente expostos na região do Granito Madeira.

VI) Fornecer dados para otimização da prática de mineração NORM na região do Granito Madeira.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A crosta terrestre é constituída de diversos elementos químicos. Alguns deles são radioativos, ou seja, emitem partículas ou radiação eletromagnética que ao interagir com a matéria ionizam seus átomos ou moléculas (CNEN, 2014). Como exemplo, citam-se os radionuclídeos das séries naturais do urânio-238 e do tório-232 e o isótopo potássio-40, que são conhecidos como materiais radioativos de ocorrência natural.

A ionização provocada pelos radionuclídeos está associada à absorção de energia num dado meio. Este é, simplifadamente dizendo, o conceito de dose de radiação. Assim, a presença de radionuclídeos no meio ambiente está ligada a existência de uma taxa de dose (dose por unidade de tempo) intrínseca ao meio. A consequência dessa “presença radioativa” é a existência de uma radiação natural de fundo ou *background* de radiação que permeia a superfície terrestre (UNSCEAR, 2010).

Certas regiões no Brasil, tais como Guarapari no Espírito Santo, o planalto de Poços de Caldas em Minas Gerais e algumas praias no Sul da Bahia são áreas de alto *background* de radiação sendo consideradas anomalias radiológicas. Estas regiões possuem taxas de dose mais elevadas que a média mundial (VASCONCELOS et al., 2011; CAVALCANTI, 2012).

Outro exemplo de anomalia radiológica é a região do Granito Madeira no estado do Amazonas. Este local, situado ao sul do Escudo das Guianas entre as Províncias Amazônia Central e Parima-Tapajós, sofreu mineralizações significativas de diversos elementos de interesse dentre eles o urânio e o tório (COSTI, et al., 2005).

2.1 Cráton Amazônico

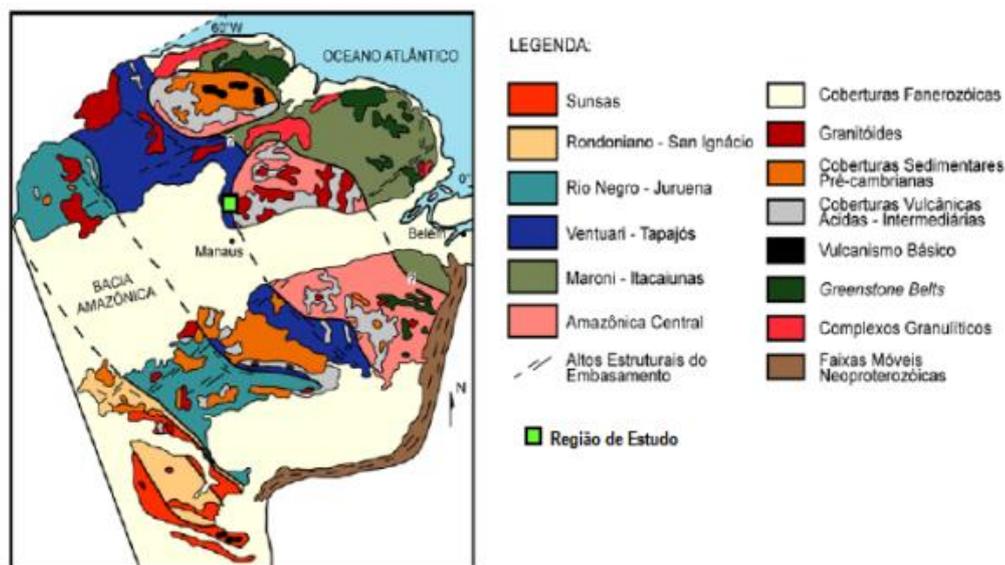
Os crátons são estruturas geológicas muito antigas da ordem de bilhões de anos. São formados por rochas magmáticas, oriundas do resfriamento e cristalização de material magmático, e de rochas metamórficas - rochas preexistentes e alteradas devido a elevadas pressão e temperatura que são geradas pela deriva continental ou vulcanismo. Uma de suas

características mais marcantes é a elevada estabilidade geológica, ou seja, não sofrem interferência direta de atividades tectônicas. Eles são divididos em províncias geológicas, ou seja, em regiões que apresentam características geológicas similares (PRESS, 2006).

Os crátons são classificados em dois tipos principais. Quando são recobertos por outras estruturas geológicas, como as bacias sedimentares, por exemplo, são denominadas plataformas continentais. Quando afloram à superfície são denominados escudos cristalinos ou maciços antigos (PRESS, 2006). Existem dois grandes crátons no Brasil: o Amazônico e o São Francisco. O primeiro é, tradicionalmente dividido em dois escudos: o das Guianas e o do Brasil Central.

O Escudo das Guianas domina a região Norte do Brasil. Ele é dividido nas seguintes províncias geocronológicas, de acordo com COSTA, 2000: Sunsas, Rondoniano-San Ignácio, Rio Negro-Juruena, Ventuari-Tapajós, Maroni-Itacaiunas e Amazônica Central. Estas províncias podem ser visualizadas na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Províncias geocronológicas do Cráton Amazônico.



FONTE: Adaptado de TASSINARI e MACAMBIRA (1999) citado em COSTA, 2010.

A área de estudo desta dissertação localiza-se no Escudo das Guianas entre duas províncias: a Amazônia Central, a leste, e Ventuari-Patajós, a Oeste. Na Figura 2.1 observa-se a posição da área de estudo em relação às províncias citadas.

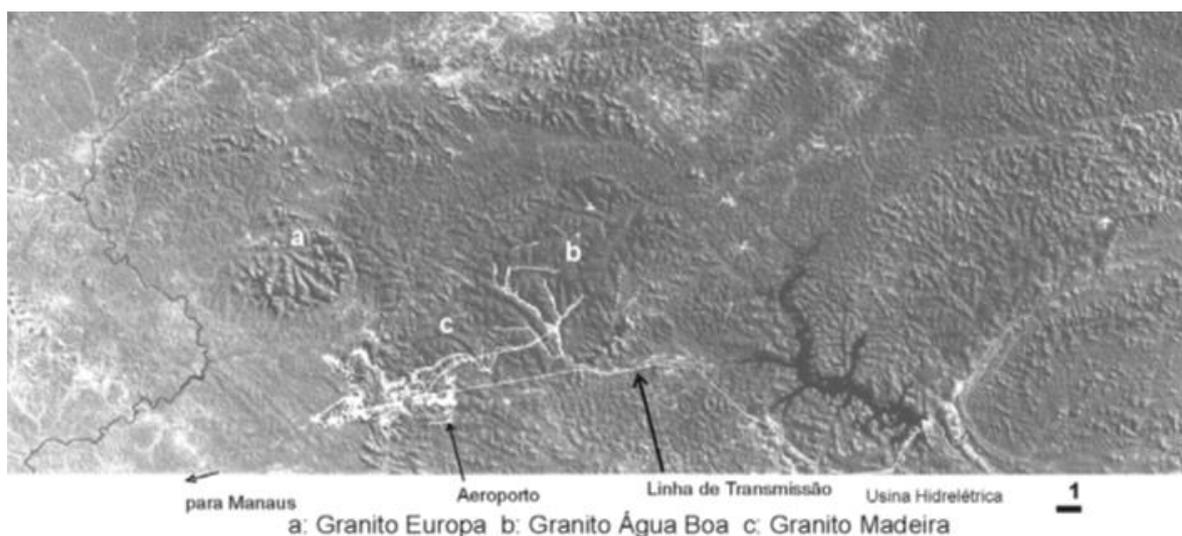
2.1.1 A região do Granito Madeira

O Escudo das Guianas foi formado a partir do intenso vulcanismo do período Pré-Cambriano. Surgiram então grupos geocronológicos como o Grupo Iricoumé. Associados às rochas vulcânicas existem ainda os granitos intrusivos como o Granito Madeira – ambas as formações dominam a geologia do local de estudo desta dissertação (COSTI, et al., 2003).

Segundo COSTI, et al., 2005 e NETO, et al., 2005 na região do Granito Madeira encontra-se o maior depósito de cassiterita do Brasil. Deste modo, ele é estudado desde o final dos anos 60. Atualmente é parte do projeto de Caracterização de Depósitos Minerais em Distritos Mineiros da Amazônia, desenvolvidos pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) e pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) (COSTA, 2010).

Além do Granito Madeira a região apresenta mais outros dois granitos com características geológicas semelhantes: o Europa e o Água Boa. Eles podem ser visualizados na Figura 2.2.

Figura 2.2 – Imagem de satélite mostrando o enquadramento regional dos Granitos Europa (a), Água Boa (b) e Madeira (c).



Fonte: COSTI, et al, 2003.

O Granito Água Boa foi explorado nos anos 80 na forma de lavra de aluvião. O Granito Europa é o menos estudado da suíte: boa parte de sua área fica em terras indígenas. Já o Granito Madeira encontra-se atualmente sob concessão de lavra (NETO, 2005).

2.1.2 Granito Madeira

O Granito Madeira possui, aproximadamente, 60km² de área. Nele ocorreu a mineralização de diversos materiais. Entre os principais destacam-se, segundo COSTI, et al., 2003:

I) Criolita – mineral de alumínio. É pouco comum na natureza (cerca de 20 locais de ocorrência). A sua exploração é economicamente viável na Groenlândia e na região de estudo desta dissertação. É fundamental na metalurgia do alumínio (COSTA, 2010).

II) Elementos de terras raras (ETR) – apesar do nome, é um grupo relativamente abundante de 17 elementos químicos: 15 pertencentes ao grupo dos lantanídeos, o escândio e o ítrio. Estes elementos sempre ocorrem nos mesmos minérios e apresentam propriedade físico-químicas semelhantes. O uso na indústria é diverso: supercondutores, ímãs miniaturizados, catalisadores, componentes eletrônicos, materiais luminescentes, dopantes, etc.

III) Zirconita – minério de zircônio associado ao urânio. O zircônio é usado em ligas resistentes com aço e níquel de ampla aplicação na indústria. O urânio é radioativo e pai de uma série de decaimento de 14 radionuclídeos. Atualmente seu uso está vinculado ao ciclo do combustível nuclear.

IV) Columbita – minério de nióbio e de tântalo que apresenta também mineralização de urânio e de tório. Estes elementos são usados em ligas ferrometálicas para melhorar as propriedades do aço (resistência e maleabilidade, por exemplo).

O tório é radioativo e pai de uma série de decaimento com 11 radionuclídeos.

V) Pirocloro – minério de nióbio, tântalo e urânio.

VI) Xenotímio – mineral raro composto de ítrio que na indústria é usado em componentes eletrônicos e em ligas metálicas.

VII) Cassiterita – minério de estanho. O estanho é muito usado em soldas, folhas de fladres e ligas metálicas.

VIII) Torita – minério de tório.

Os elementos citados estão associados intrinsecamente a uma mesma rocha granítica (NETO, et al. 2005). Assim, devido à presença do urânio, do tório e de seus respectivos filhos, todos os minerais presentes na rocha são materiais radioativos de ocorrência natural, ou seja, são materiais NORM. Deste modo, o Granito Madeira é uma região de anomalia radiológica possuindo radioatividade natural superior à média mundial.

2.2 Definição de grandezas

A grandeza dosimétrica fundamental é a dose absorvida, D , expressa pela equação 2.1:

$$D = \frac{d\varepsilon}{dm} \quad (2.1)$$

onde $d\varepsilon$ é a energia média depositada pela radiação em um volume elementar de matéria de massa dm . A unidade de dose absorvida no Sistema Internacional é o joule por quilograma ($J.kg^{-1}$) denominada gray (Gy) (CNEN, 2014).

A dose absorvida por um dado meio depende de alguns fatores tais como tipo de radiação incidente, tipo de meio em que a radiação incide, energia que a radiação transfere ao meio dentre outros. Deste modo, para uma avaliação da probabilidade dos efeitos biológicos da radiação ionizante o ICRP (*International Commission on Radiological Protection*) propôs em 1990 a grandeza dose equivalente, H_T , (ICRP, 1990) expressa pela equação 2.2:

$$H_T = D_T \cdot w_R \quad (2.2)$$

onde D_T é a dose absorvida média no órgão ou tecido e w_R é o fator de ponderação da radiação. A unidade no Sistema Internacional é o joule por quilograma ($J.kg^{-1}$) denominada sievert (Sv) (CNEN, 2014).

Somando-se as doses equivalentes ponderadas nos diversos órgãos e tecidos tem-se a dose efetiva, E , dada pela equação 2.3:

$$E = \sum_T w_R \cdot H_T \quad (2.3)$$

onde H_T é a dose equivalente no tecido ou órgão e w_T é o fator de ponderação de órgão ou tecido (CNEN, 2014). A unidade de dose efetiva é o sievert (Sv).

Tanto a dose equivalente quanto a dose efetiva são grandezas limitantes, ou seja, indicam a probabilidade de efeito biológico devido a radiação ionizante. Elas não são diretamente mensuráveis ou de fácil estimativa. Assim em atividades de proteção radiológica, tais como monitoração de área ou de pessoas, definem-se grandezas mais úteis na prática (XAVIER et al., 2014). Este é o caso do equivalente de dose ambiental, $H^*(d)$:

A grandeza $H^*(d)$ é uma grandeza operacional para monitoração de área em ambientes de trabalho, sendo o produto da dose absorvida em um ponto pelo fator de qualidade da radiação, correspondente ao que seria produzido em uma esfera de tecido equivalente de 30 cm de diâmetro, na profundidade d (CNEN, 2011).

A unidade de equivalente de dose ambiental no Sistema Internacional é o joule por quilograma ($J.kg^{-1}$) denominada sievert (Sv).

Note que dimensionalmente o gray e o sievert são equivalentes. O que os diferencia são os fatores adimensionais relativos ao tipo de radiação incidente e de tecido ao qual foi depositada a energia. Alguns autores como SAITO et al, 1998, definem fatores de conversão de uma unidade para outra, mas é comum tomar-se como conversão $1Gy = 1 Sv$.

2.3 Uso de dados radiológicos georreferenciados

O georeferenciamento consiste em basicamente em localizar um dado ponto ou conjunto de pontos na superfície da Terra levando-se em conta suas coordenadas geográficas. Trata-se de uma ferramenta muito útil em geociências, biologia, agrimensura, arquitetura, engenharias e outros ramos do conhecimento na medida em que situa, dimensiona, descreve a forma, características e limites de acidentes geográficos, florestas, pontos, imóveis etc. Esses dados podem ser dispostos em mapas, por exemplo, para facilitar a leitura, interpretação e tomada de decisão (SILVA, 2007).

O processo de georeferenciar inicia-se com a obtenção dos pontos da imagem ou mapa a partir de levantamentos topográficos ou do Sistema de Posicionamento Global (GPS), por exemplo. Posteriormente, os dados são tratados com *softwares* específicos utilizando o sistema de informação geográfica (*Geographic Information System - GIS*) e podem ser inseridos em mapas, croquis, plantas, dentre outros.

Apesar dos dados georreferenciados serem mais comumente utilizados em geociências, eles também podem ser trabalhados em ciências e técnicas nucleares. Assim, dados como taxas de dose, curvas de isodose, concentração de radionuclídeos, levantamentos cintilométricos e radiométricos podem ser geolocalizados e utilizadas para avaliação de

contaminação radioativa, para monitoração radiológica ambiental, proteção radiológica de populações e meio ambiente e exploração geológica (DIAS, et al., 2010).

Um exemplo significativo de georeferenciamento de parâmetros radiológicos é o trabalho desenvolvido por SACHETT, 2002. Foi proposto um modelo de monitoração de taxas de dose de áreas urbanas no Brasil utilizando um detector cintilador de iodeto de sódio transportado por veículo leve. A eletrônica associada ao equipamento relaciona os dados monitorados às coordenadas do ponto para posterior georeferenciamento. As cidades monitoradas foram: Águas da Prata em São Paulo, Poços de Caldas, Andradas e Caldas em Minas Gerais e Guarapari no Espírito Santo. Os resultados obtidos listados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Resultados obtidos por SACHETT, 2002.

Local	Mínima* (nGy.h ⁻¹)	Máxima* (nGy.h ⁻¹)	Média* (nGy.h ⁻¹)	Dose anual** (mSv.ano ⁻¹)
Águas da Prata-SP	80	164	105,60	0,65
Poços de Caldas-MG	92	245	144,46	0,89
Andradas-MG	67	156	98,50	0,61
Caldas-MG	95	220	128,20	0,80
Guarapari-ES	25	5463	88,90	0,73

*Taxa de dose absorvida.

**Dose externa devido a irradiação gama

Fonte: Adaptado de SACHETT, 2002.

Outro exemplo do uso de dados radiológicos georreferenciados foi o trabalho de NASCIMENTO, 2003. O objetivo do autor foi obter imagens que representem melhor a realidade do que o mapa puramente geológico. Assim, foi realizado mapeamento utilizando imagens de satélites com dados de espectrometria gama. Posteriormente, os dados foram tratados com o uso de redes neurais artificiais (modelos computacionais inspirados pelo sistema nervoso central que são capazes de reconhecer padrões). Os resultados foram apresentados na forma de mapas que representam formações geológicas da região dos lagos no Rio de Janeiro que integram propriedades físico-químicas de superfície, obtidas pelos dados dos satélites, e a composição das rochas obtidas pelas imagens gama-espectrométricas. Nos mapas pode-se observar, por exemplo, as concentrações de urânio, tório e potássio-40 e emissão radioativa em cps.

SANTOS, 2006 apresenta o levantamento radiométrico da província uranífera da Lagoa Real em Caetité, Bahia realizado com medidas aerogeofísicas, espectrometria aérea, dados de concentração de urânio e tório e dados das taxas de dose absorvida de postos de amostragem georreferenciados. O objetivo do trabalho foi verificar possíveis alterações ambientais devido à atividade de mineração (SANTOS, 2006).

Para a espectrometria aérea SANTOS, 2006 utilizou uma aeronave e um detector de iodeto de sódio. Os dados do levantamento aerogeofísico estavam disponíveis na INB-Caetité (o procedimento foi realizado no fim dos anos 70). As informações relativas à concentração dos radionuclídeos foi obtida através de análises radioquímicas. As taxas de dose absorvida foram medidas também com o uso de dosímetros termoluminescentes. Todas as informações foram georeferenciadas. Deste modo, foi possível a integração dos dados para a obtenção de curvas de isovalor e mapas temáticos.

Como resultado para taxas de dose absorvida SANTOS, 2006 obteve os valores listados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Taxas de dose monitoradas por SANTOS, 2006.

Equipamento	Média (nSv.h ⁻¹)	Mínima (nSv.h ⁻¹)	Máxima (nSv.h ⁻¹)
Cintilador	91 ± 36	0,01	247,7
Dosímetro	102 ± 30	-	-

Fonte: Adaptado de SANTOS, 2006.

Outro trabalho concluído em 2006 que utiliza medidas radiométricas georeferenciadas foi o elaborado por MENOR, 2006. O trabalho consistiu na realização de um levantamento radiométrico e gravimétrico da Bacia da Paraíba em Pernambuco. Para tanto utilizou um gravímetro, um altímetro, um GPS e um detector cintilador. Os dados foram coletados em 226 estações escolhidas ao longo da bacia, georreferenciados e tratados com *softwares* GIS. O resultado obtido por MENOR, 2006 foi dado em contagem por segundo e variaram de 16 cps a 357 cps.

SILVA, et al, 2009 apresentaram um artigo com uma metodologia similar a de SACHETT, 2002 para avaliação de parâmetros relacionados a radioatividade. Deste modo, foi realizado um estudo de caso em Poços de Caldas com avaliação da radiação gama com

geoprocessamento e distribuição estatística dos resultados. Os autores utilizaram um detector cintilador inorgânico transportado em veículo. O equipamento capta as taxas de dose absorvida e vincula os dados às coordenadas geográficas. Estas informações são tratadas em *softwares* GIS. Os resultados foram apresentados em mapas radiométricos com a distribuição espacial das doses externas obtidas que variam de 0,33 mSv.ano⁻¹ a 3,51 mSv.ano⁻¹ com média de 0,95 mSv.ano⁻¹.

DIAS et al, 2010 publicaram um artigo onde defendem as vantagens e o uso da ferramenta de geoprocessamento para parâmetros radiológicos. O estudo de caso realizado foi o levantamento das taxas de dose absorvida na pilha de estéril das Indústrias Nucleares do Brasil em Caldas, MG (INB-Caldas). Foi utilizado um detector cintilador de iodeto de sódio acoplado a um sistema GPS e transportado por veículo. Deste modo, o equipamento foi conduzido através da pilha de estéril da INB-Caldas. Os resultados foram dispostos em mapas radiométricos e variaram de 2,0 mSv.ano⁻¹ a 9,1 mSv.ano⁻¹ com média de 3,8 mSv.ano⁻¹.

CAVALCANTI, 2012 também usou uma metodologia similar a de SACHETT, 2002: detector cintilador transportado por veículo leve para monitorar taxas de dose absorvida no ar e associação dos dados às coordenadas geográficas de cada ponto. Posteriormente, CAVALCANTI, 2012 tratou os dados com *softwares* GIS. O objetivo do trabalho foi avaliar as doses efetiva e coletiva de Ribeirão Preto. Assim, devido às características da eletrônica do detector cintilador (leitura de taxa de dose absorvida e de taxa de exposição), foi necessário calibrar os modos de leitura do equipamento antes de iniciar a coleta de dados. Para tanto, CAVALCANTI, 2012 utilizou fontes planas e extensas constituídas de NORM presentes no IRD, Rio de Janeiro. Para a coleta dos dados o equipamento foi acoplado a um carro que se deslocou à baixa velocidade (30km/h em média) em oito bairros de Ribeirão Preto. Os resultados foram listados na tabela 2.3

Tabela 2. 3 – Resultados obtidos por CAVALCANTI, 2012.

	Taxa de dose equivalente (nGy.h ⁻¹)	Dose efetiva anual (mSv.ano ⁻¹)
Média	27,38 ± 2,41	0,034 ± 0,005
Mínima	17,7	0,028
Máxima	85,2	0,045

Fonte: Adaptado de CAVALCANTI, 2012.

ALVES, 2013 apresentou a aplicação de um modelo de dispersão atmosférica com dados geoprocessados para avaliar o impacto radiológico-ambiental do Reator Multipropósito Brasileiro (RMB). Assim, foram coletados e georreferenciados dados de uso e ocupação do solo, de demografia, meteorologia, de construções, de acidentes geográficos e outros obstáculos a dispersão etc. As emissões atmosféricas do reator foram baseadas em dados de outro reator de pesquisa. Os resultados foram representados em gráficos e mapas.

Outro trabalho que utilizou dados georreferenciados foi de PETTA, et al., 2013. O objetivo foi realizar um levantamento radiométrico nos rejeitos NORM provenientes da indústria do óleo e gás no campo de Santo Amaro em Mossoró, Rio Grande do Norte. Os parâmetros analisados foram a taxa de dose absorvida e a concentração de radônio no ar. Estes dados foram coletados diretamente nas linhas de dutos e de operação, estações de tratamento de rejeito, lamas e em residências no em torno do Campo de Santo Amaro. Para tanto os autores utilizaram dois tipos de detectores, um cintilador de iodeto de sódio e um cintilador de germanato de bário, para as taxas de dose; uma câmara de ionização para o radônio e um GPS.

Os dados obtidos foram georreferenciados e os resultados foram apresentados em gráficos e mapas de distribuição de urânio, tório, potássio-40 e taxa de dose. Esta última variou de $4,9 \text{ nGyh}^{-1}$ a $76,7 \text{ nGyh}^{-1}$ e atingiu os maiores valores nas áreas onde encontravam-se os resíduos NORM.

SOUZA et al., 2015 desenvolveram um trabalho sobre exposição externa devido a radiação ambiental em áreas urbanas no Brasil. Os autores utilizaram um detector de iodeto de sódio para monitorar taxas de doses em Fortaleza no Ceará, Vitória no Espírito Santo, Costa do Sauípe na Bahia e Angra dos Reis no Rio de Janeiro. A eletrônica do equipamento associa os dados obtidos às coordenadas geográficas dos pontos monitorados para posterior visualização da distribuição espacial em mapas. Como resultados os autores obtiveram as taxas de dose absorvida da Tabela 2.3.

Figura 2.3 – Taxas de dose monitoradas por SOUZA et al., 2015.

Local	Média (nGy.h ⁻¹)	Mínimo (nGy.h ⁻¹)	Máximo (nGy.h ⁻¹)
Fortaleza-CE	80	19	190
Costa do Sauípe-BA	47	19	104
Vitória-ES	96	54	257
Angra do Reis-RJ	147	121	212

Fonte: Adaptado de SOUZA et al., 2015.

SOUZA, 2016 defende o uso de detectores cintiladores de iodeto de sódio para a monitoração de áreas onde vão ocorrer grandes eventos, tais como a Copa do Mundo e Olimpíadas. No estudo, foram intercomparados diversos equipamentos e houve destaque para um que é portátil e que permite acesso a locais ocupados por pessoas, tais como vestiários e canteiros de obras de construção civil. Os resultados foram apresentados em mapas com a geolocalização dos pontos monitorados. O valor médio da taxa de equivalente de dose ambiental no Estádio Nilton Santos (Engenhão), utilizado como estudo de caso, foi de 190 ± 38 nSv.h⁻¹ com variação entre 103 nSv.h⁻¹ e 351 nSv.h⁻¹.

2.4 United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR)

O UNSCEAR é o comitê das Nações Unidas responsável por avaliar os efeitos da radiação ionizante sobre a população mundial. Ele emite relatórios periódicos, baseados em informações fornecidas pelos países membros, que servem de subsídios para ações para proteção das populações.

Na Tabela 2.4, adaptado de UNSCEAR, 2010, segue a exposição média anual do ser humano a algumas fontes de radiação natural, ou seja, apresenta a radiação natural de fundo ou *background*. Considerando que o ano tenha 8760 horas a taxa de dose relativa à radiação externa, ou seja, à radiação gama, é de 0,05uSv.h⁻¹.

Tabela 2.4 – Dose média anual e intervalo típico de doses individuais por fonte ou modo de exposição.

Fonte ou modo de exposição	Dose média anual (mSv)	Intervalo típico de doses anuais individuais (mSv)
Inalação de Rn*	1,26	0,2 – 10
Dose externa*	0,48	0,3 – 1
Ingestão*	0,29	0,2 – 1
Radiação Cósmica*	0,39	0,3 – 1
Total**	2,4	1 – 13

*A dose aqui como a soma das doses equivalentes. Exemplo, no caso da inalação do radônio a soma da dose equivalente de todos os tecidos expostos a radiação emitida pelo radônio.

** Dose efetiva.

Fonte: Adaptado de UNSCEAR, 2010.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

As investigações de parâmetros radiológicos ambientais para a obtenção de *background* radioativo, por exemplo, podem ser realizadas em laboratório ou no próprio local a ser investigado. No primeiro caso, é necessário coletar amostras de diversas matrizes e efetuar análises radioquímicas de interesse tais como concentração de atividade em solos, sedimentos, água, dentre outros. A partir daí pode-se obter a “radiação de fundo” relativa a estes parâmetros.

Já no segundo caso, a obtenção de dados no próprio local, os parâmetros a serem investigados, tais como taxas de dose, por exemplo, são amostrados e analisados *in situ*. Para este tipo de levantamento podem ser utilizados detectores a gás, detectores cintiladores e outros tipos de equipamentos. Neste estudo optou-se pelo uso de um detector de iodeto de sódio – um tipo de detector cintilador inorgânico.

3.1 Materiais

Descrevem-se abaixo os materiais utilizados neste estudo.

3.1.1 Sistema AT6101C Spectrometer

O equipamento usado neste estudo foi o Sistema AT6101C *Spectrometer* da Atomtex. Trata-se de um detector de iodeto de sódio e uma eletrônica associada que transfere os dados monitorados para serem tratados devidamente em computadores. A opção pelo equipamento foi realizada levando-se em consideração a faixa de energia, já que ele é indicado para uso de monitoração de radiação gama de 50keV a 3Mev – faixa de emissão da

maioria dos radionuclídeos das famílias do urânio e do tório naturais¹. Outro fator importante na seleção é o fato de que sua leitura, em taxa de dose, estar na faixa $0,01 \text{ uSv.h}^{-1}$ a 150 uSv.h^{-1} que está dentro do esperado para a obtenção de *background* (UNSCEAR, 2010).

O equipamento pode ser utilizado em áreas remotas já que é transportado dentro de uma mochila (A) – vide Figura 3.1. O detector cintilador (B) monitora a radiação gama. Esta informação é transmitida (C) via *bluetooth* para o receptor manual (D) que possui um sistema de GPS. Assim, associa-se este dado às coordenadas geográficas do ponto monitorado criando arquivos de texto (txt) e arquivos separados por vírgulas (CSV) que podem ser utilizados em *softwares* de georeferenciamento ou de tratamento de dados, como planilhas eletrônicas, por exemplo.

Figura 3.1 – Sistema AT6101C Spectrometer.



¹ No Anexo I apresentam-se dados da emissão das famílias do urânio-238 e do tório-232.

O Sistema AT6101C foi projetado para monitorar a taxa de equivalente de dose ambiental e suas propriedades radiométricas estão descritas no manual do fabricante e foram resumidas na Tabela 3.1 (ATOMTEX, 2010 A).

Tabela 3. 1– Principais características do detector.

Fabricante	Atomtex
Modelo	AT6101C Spectrometer
Detector	Cintilador de NaI(Tl), Ø63x63 mm
Aplicação	Monitoração de radiação gama (meio ambiente, controle de fronteiras, etc.)
Faixa de energia - modo espectrômetro	20 keV a 3 MeV
Faixa de energia - modo de dosimetria	50 keV a 3 MeV
Faixa de leitura (taxa de equivalente de dose ambiental)	0,01uSv/h a 150 uSv/h
Sensibilidade - Am-241	13500cps/ μ Sv \cdot h ⁻¹
Sensibilidade - Cs-137	2200cps/ μ Sv \cdot h ⁻¹
Sensibilidade - Co-60	1200cps/ μ Sv \cdot h ⁻¹

Fonte: <http://www.atomtex.com/en/products/radionuclide-identification-devices-rids/at6101c-spectrometer>

3.1.2 – Softwares utilizados

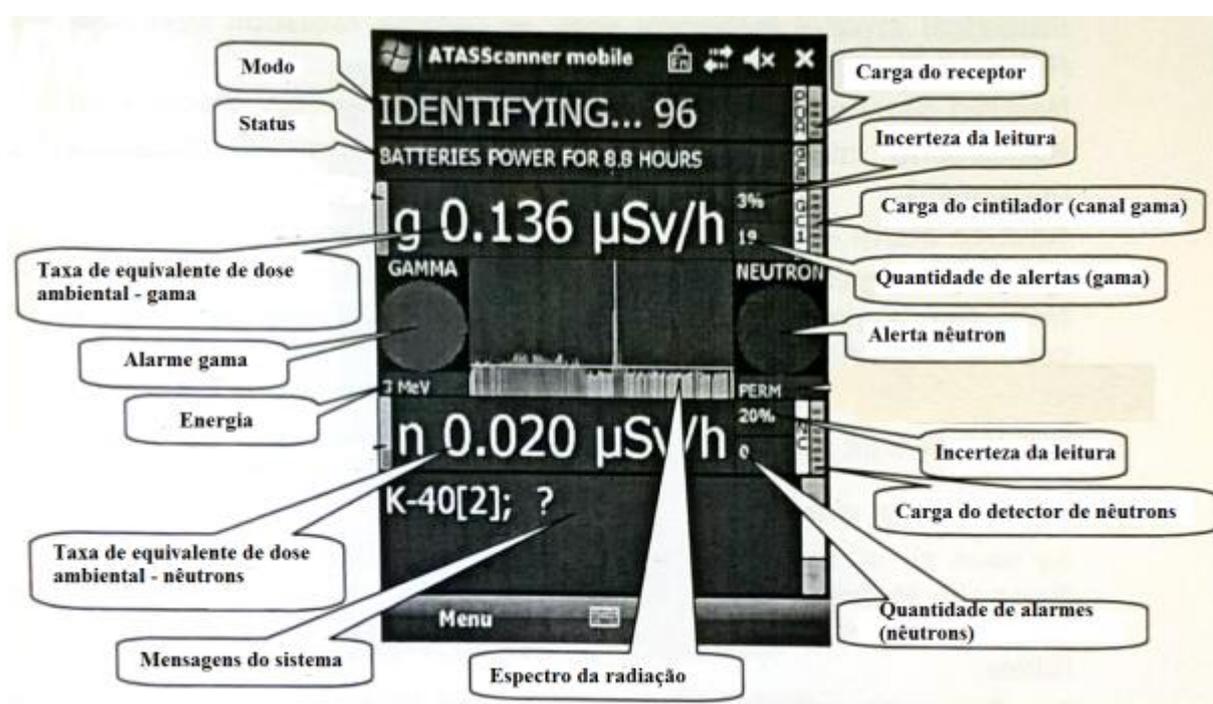
A tabela 3.2 apresenta os *softwares* utilizados e algumas de suas características.

Tabela 3. 2 – *Softwares* utilizados.

Software	Fabricante	Versão	Uso
Atas Scanner	Atomtex	1	Controle do Sistema AT6101C. Fica instalado no receptor manual.
Garm	Atomtex	1	Geração de arquivos georreferenciados. Fica instalado em computador.
Quantum Gis	<i>Software</i> livre	1.8.0	Criação de mapas e georreferenciamento. Fica instalado no computador. Trata-se de um <i>software</i> livre.
Surfer	Golden Software	8	Criação de mapas de isodose para representação das doses anuais.

O Atas Scanner é o *software* responsável pelo gerenciamento do Sistema AT6101C, ou seja, que realiza a comunicação entre o detector cintilador e o receptor manual, que associa as taxas de dose aos dados do GPS do receptor e as armazena, que possibilita a leitura dos parâmetros de interesse em tempo real, que possibilita escolher o intervalo de tempo de coleta de informações, dentre outras funções. Ele fica instalado no receptor manual. Na Figura 3.2 apresenta-se sua janela.

Figura 3.2 – Janela do *software* Atas Scanner.



O *software* Garm (*Geolocation Application for Radiation Monitoring*) fica instalado no computador. É utilizado para visualização dos dados monitorados, geração de arquivos com dados georreferenciados, arquivos para visualização de dados geográficos (.kml) e arquivos separados por vírgulas (.CSV) para uso nos demais *softwares*. A janela padrão do programa pode ser visualizada na Figura 3.3.

O Quantum Gis ou QGis é um *software* para análise, armazenamento, manipulação, visualização e gestão de informações em banco de dados. Assim, ele é capaz de integrar parâmetros de interesse, tais como os dados deste trabalho, com um sistema de informações geográficas ou GIS (*Geographic Information System*) possibilitando a visualização em

croquis ou mapas em diferentes projeções a partir dos arquivos gerados pelo GARM. Além disso, cria arquivos *shape* (.shp) para uso em outros programas. A versão utilizada foi a 1.8.0-Lisboa cuja janela poder ser visualizada na Figura 3.4.

Figura 3. 3 – Janela do Garm.

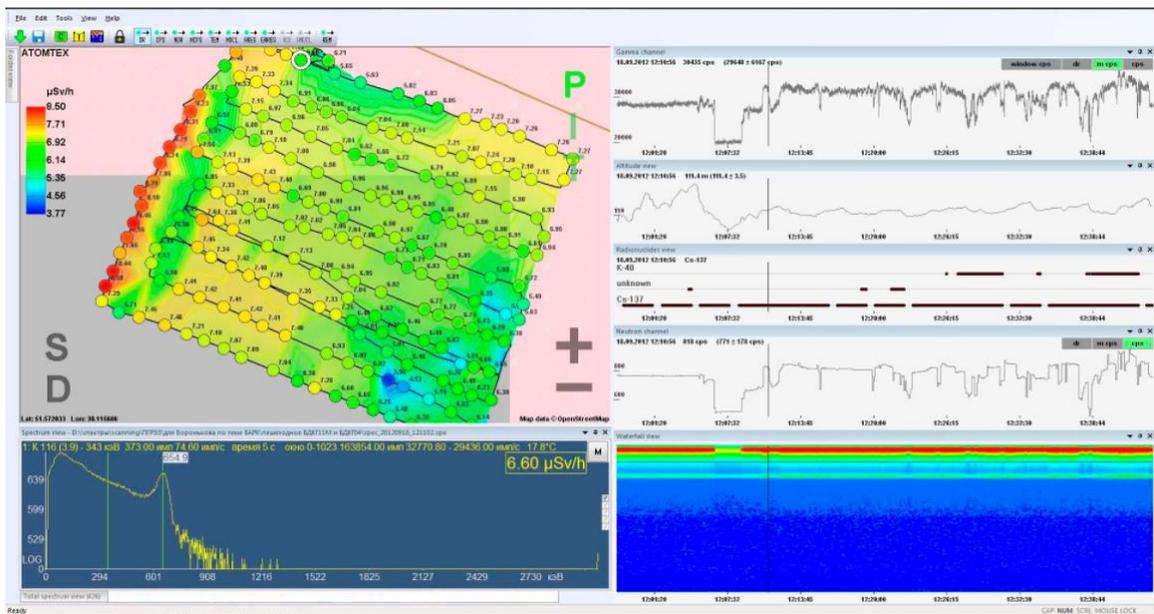
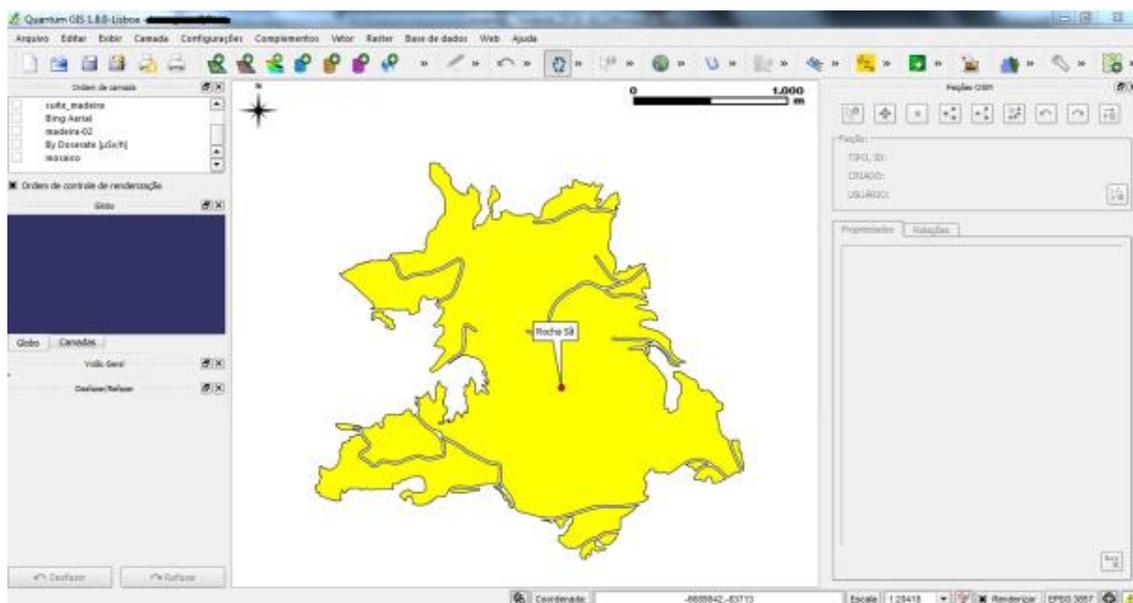
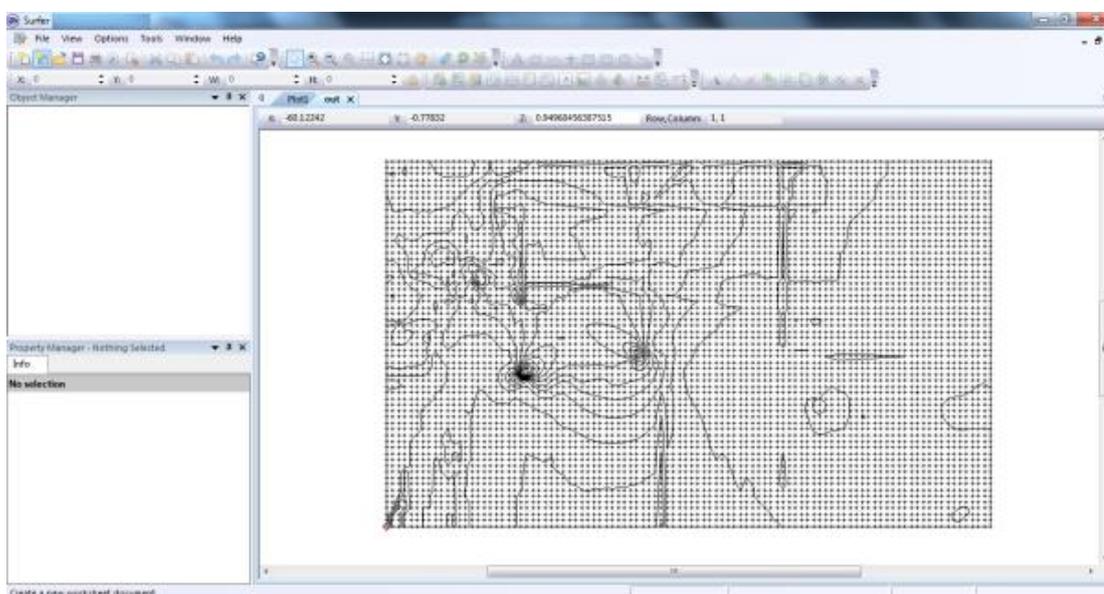


Figura 3.4 – Janela do QGis 1.8.0 – Lisboa.



O Surfer da Golden Software é um *software* que utiliza dados georreferenciados para modelação de terreno, modelagem batimétrica, visualização de paisagem, análise de superfície, mapeamento de contorno, bacias hidrográficas, mapeamento de superfície 3D, análise de enquadramento visual, criação de curvas de isovalor e cálculo de volumes. A versão utilizada é o Surfer 8, cuja janela pode ser observada na Figura 3.5. O objetivo de sua utilização é a interpolação de dados para representar mapas de isodose relativas às doses anuais da radiação gama do Granito Madeira. Os dados de entrada do Surfer foram tratados com o GARM e com o QGis.

Figura 3.5 – Janela do Surfer 8.0.



3.2 Metodologia

A metodologia consistiu em:

- i) selecionar áreas do Granito Madeira para monitoração;
- ii) aferir o Sistema AT6101C com fontes NORM;
- iii) monitoração das áreas selecionadas;
- iv) tratamento dos dados com os *softwares*;

v) cálculo das doses anuais relativas à radiação gama;

vi) representação dos dados em mapas e gráficos.

3.2.1 Seleção de áreas do Granito Madeira

Devido às características do Granito Madeira, tais como extensão considerável para ser percorrida a pé, impossibilidade de trânsito com veículo na sua maior parte, áreas extremamente remotas e de topografia acentuada, teor variável de minerais dentre outros, selecionou-se 14 áreas representativas para a realização do estudo compreendendo: áreas de sondagem (existe interesse de exploração futura); áreas onde não há ação antrópica, mas próximas a área sob exploração; áreas próximas a exploração realizada no passado (próximas às áreas de lavra de aluvião) e áreas sem exploração mineral. Na Tabela 3.3 e na Figura 3.6 estas áreas são apresentadas e localizadas no mapa em relação ao Granito Madeira.

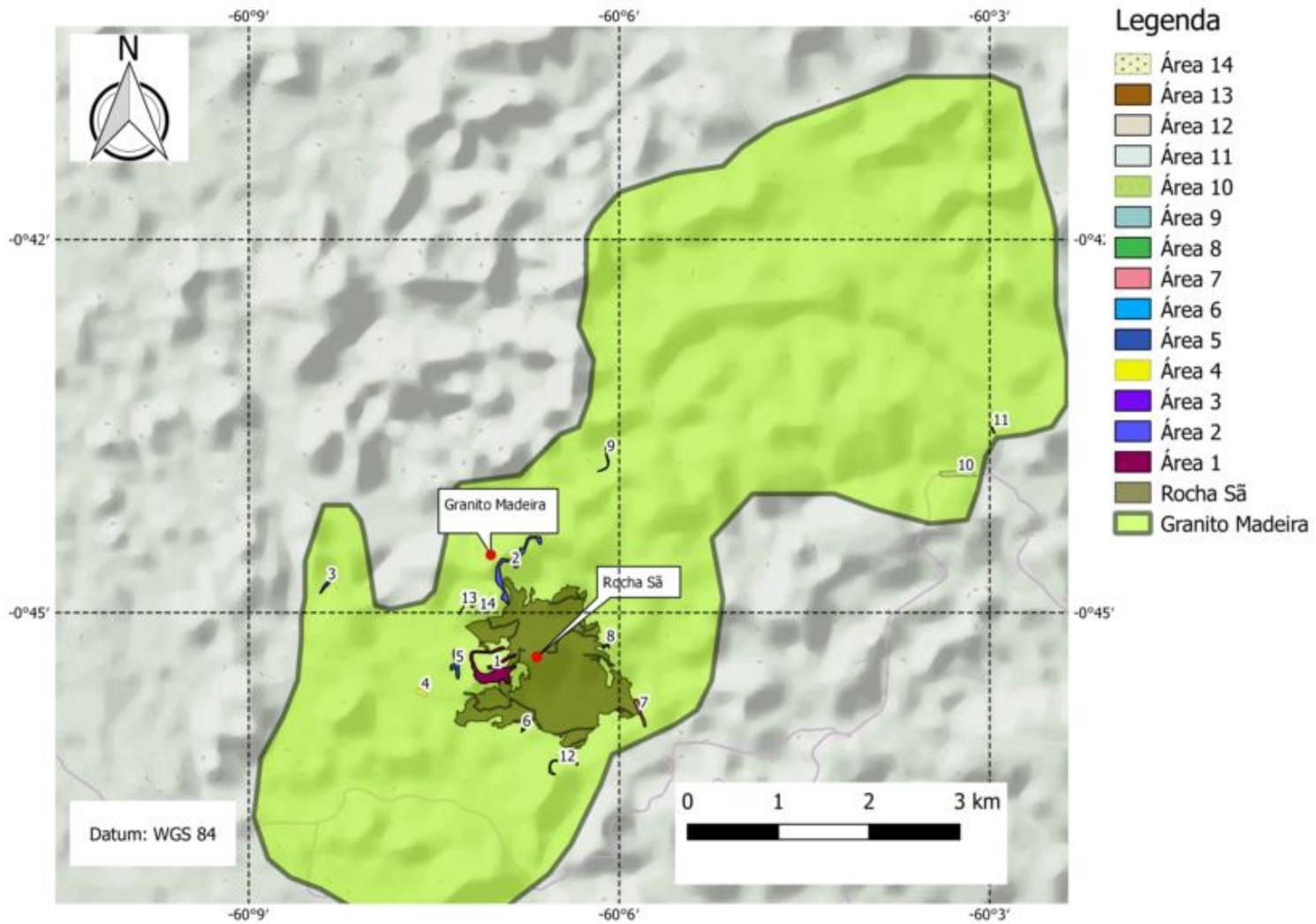
Tabela 3.3 – Áreas selecionadas do Granito Madeira.

Área	Observação	Superfície* (m ²)	Distância percorrida* (km)
1	Área de sondagem	183000	8,6
2	Sem ação antrópica	88300	7,2
3	Próximo a área explorada no passado	12200	1,6
4	Próximo a área explorada no passado	10800	1,0
5	Próximo a área explorada no passado	23500	2,2
6	Sem ação antrópica	1500	0,5
7	Sem ação antrópica	16500	2,0
8	Área de sondagem	4300	1,2
9	Próximo a área explorada no passado	10000	3,0
10	Próximo a área explorada no passado	39000	3,0
11	Sem ação antrópica	2300	1,0
12	Área de sondagem	17300	3,0
13	Sem ação antrópica	3400	1,4
14	Sem ação antrópica	5300	1,6

*Valores aproximados.

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 3.6 – Localização das áreas selecionadas. Em destaque, a Rocha Sã – atual área de exploração mineral.



Nas Figuras 3.7 e 3.8 apresentam-se o aspecto geral das áreas monitoradas.

Figura 3. 7 – Aspecto da Área 3.



Figura 3.8 – Aspecto da área 5.



3.2.2 Aferição do Sistema AT6101C

O sistema AT6101C é calibrado anualmente por um laboratório credenciado pela CNEN utilizando uma fonte de Cs-137. Na Tabela 3.4 foram disponibilizados os dados da calibração do equipamento.

Tabela 3.4 – Dados da calibração do Sistema AT6101C

Taxa de equivalente de dose ambiental - VVC* (uSv.h ⁻¹)	Média das medidas - M** (uSv.h ⁻¹)	Incerteza Expandida U _E ***(%)
0,20	0,24	6,8
0,50	0,56	3,3
0,80	0,88	2,7
2,00	2,03	2,3
5,00	5,05	2,2
8,00	8,07	2,1
20,0	20,4	2,2
50,0	51,7	2,1
80,0	81,7	2,1

Fonte: adaptado de MRA, 2016 B.

* Valores Verdadeiros Convencionais.** Média de 10 medidas para cada VVC.

*** Calculadas de acordo com INMETRO, 1998.

Entretanto, a radiação emitida pela fonte de calibração possui energia diferente da radiação emitida por uma fonte NORM. Deste modo, a fim de verificar a exatidão das leituras do Sistema AT6101 C, decidiu-se, antes de cada uma das monitorações, aferi-lo com uma fonte de zirconita – minério NORM produzido a partir de material retirado do Granito Madeira.

A fonte consiste em 5 toneladas de zirconita enterradas a uma profundidade de 2 metros, num local fora do Granito Madeira, deixando exposta uma superfície de raio 20 metros, conforme a Figura 3.9. Seus dados estão disponíveis na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Algumas características das fontes de zirconita.

Grandeza	
Atividade específica* (Bq.g ⁻¹)	937,1
Atividade (Bq)	4,68x10 ¹²
Dimensões	Circunferência de raio 20 m
Taxa de dose** na superfície (uSv.h ⁻¹) - valor de referência	210,4 ± 0,8

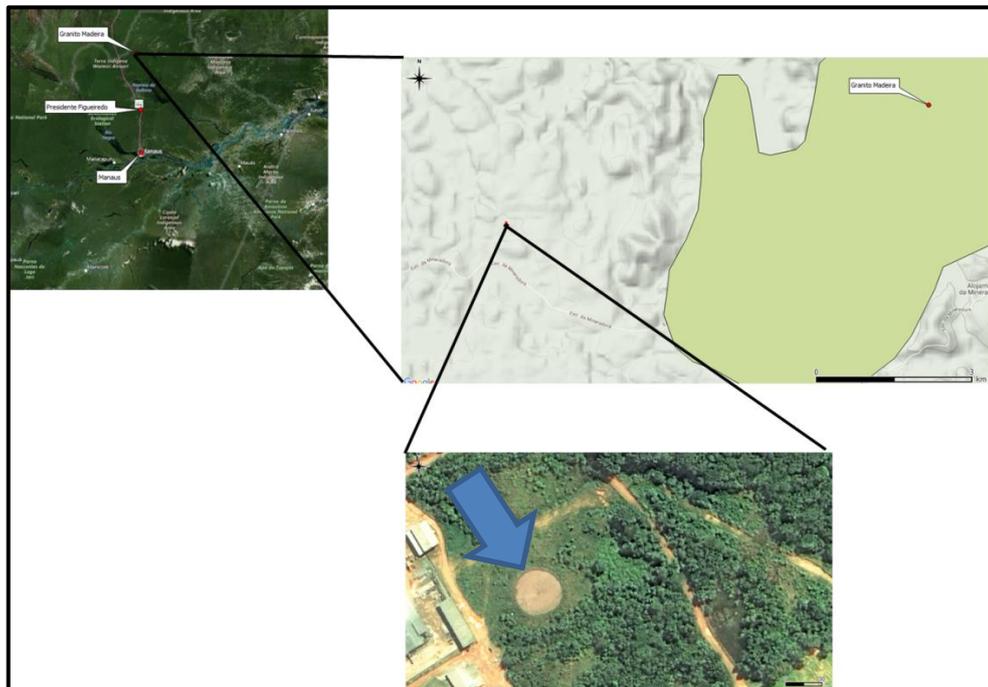
*Determinada a partir da análise química de uma amostra de zirconita. Detalhes vide Apêndice II.

** Onde lê-se taxa de dose entenda-se taxa de equivalente de dose ambiental. Ela foi obtida com o Sistema AT6101C.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a obtenção do valor de referência, ou seja, a taxa de equivalente de dose ambiental na superfície da fonte, o Sistema AT6101C foi mantido em contato com a zirconita durante 60 minutos. Os dados obtidos foram tratados em planilhas eletrônicas para a obtenção da média e desvio padrão.

Figura 3.9 – Localização da fonte extensa.



Para ao procedimento de aferição, o Sistema AT6101C foi deixado a uma distância de 90 centímetros da superfície, no centro da fonte, durante 10 minutos, conforme a Figura

3.10. Quando ligado, o equipamento coleta as informações automaticamente: 1 dado a cada 10 segundos. Este procedimento foi repetido antes de cada uma das monitorações.

Figura 3. 10 – Sistema AT6101C num dos processos de aferição.



O resultado das aferições pode ser observado na Tabela 3.6. Observa-se que a variação entre duas leituras consecutivas sempre foi inferior a 20%, conforme estabelecido pela Norma Brasileira NBR 10011, que estabelece o limite de variação de leitura de equipamentos utilizados em proteção radiológica (ABNT, 1987). Além disso, a pequena variação entre as aferições consecutivas atesta a exatidão do Sistema AT6101C.

Tabela 3.6 – Resultado das aferições do AT6101 com a fonte extensa.

Aferição	Taxa de equivalente de dose ambiental (uSvh ⁻¹)	Desvio* (%)	Aferição	Taxa de equivalente de dose ambiental (uSvh ⁻¹)	Desvio* (%)
1	37,2 ± 0,7	1%**	8	35,0 ± 0,3	3%
2	36,5 ± 0,8	2%	9	36,8 ± 0,7	5%
3	36,9 ± 0,9	1%	10	37,5 ± 0,6	2%
4	36,4 ± 0,7	1%	11	37,5 ± 0,7	0%
5	37,0 ± 0,6	2%	12	36,8 ± 0,5	2%
6	37,8 ± 0,9	2%	13	36,6 ± 0,8	1%
7	36,2 ± 0,6	4%	14	37,0 ± 0,4	1%

*Desvio em relação à aferição anterior.

**Foi realizada uma aferição inicial antes da primeira monitoração do Granito Madeira.

Fonte: elaborado pelo autor.

3.2.3 Obtenção das taxas de equivalente de dose ambiental e tratamento dos dados

Como o Sistema AT6101 C é portátil, sendo transportado dentro de uma mochila, ele foi conduzido por trilhas nas áreas selecionadas do Granito Madeira a uma velocidade média de 4 km.h^{-1} a 90 cm do solo. Assim, quando ligado, o *software* ATAS, que fica instalado no receptor manual, associa as taxas de equivalente de dose ambiental às coordenadas geográficas a cada 10 segundos. Estes dados são armazenados no equipamento na forma de arquivos de texto (.txt).

Durante o percurso, alguns pontos foram monitorados mais de uma vez quando, por exemplo, foi necessário efetuar uma parada. Assim, foi feita uma filtragem: tomou-se a média da taxa de dose nos pontos com a mesma coordenada geográfica.

Na sequência os dados armazenados no ATAS foram importados e tratados pelo GARM gerando arquivos de saída – arquivos separados por vírgula (.csv) e arquivos para visualização de dados geográficos (.kml). Estes foram importados para o QGis para o georreferenciamento e a produção dos mapas com taxas de equivalente de dose.

Posteriormente, usando os arquivos separados por vírgula, gerados pelo GARM:

I) Foram elaborados histogramas de frequência das taxas de dose monitoradas.

II) Foi realizado o produto da taxa de equivalente de dose ambiental pelo número de horas de uma ano padrão para a obtenção da dose anual relativa à radiação gama: a dose potencial anual devida a irradiação externa que um indivíduo estaria sujeito se permanecesse durante 1 ano no Granito Madeira. Não se trata aqui da dose efetiva, já que esta é soma das doses relativas à incorporação de radionuclídeos pelo trato digestivo, pelo trato respiratório, pela absorção pela pele e pela irradiação externa (ICRP, 1990; CNEN, 2014; UNSCEAR, 2010).

Os dados sobre a dose anual foram inseridos no Surfer para a criação de mapas de isovalor e curvas de nível para cada uma das áreas monitoradas. A técnica utilizado no *software* foi a interpolação pelo inverso do quadrado da distância que consiste em estimar os

valores das doses dos pontos não monitorados usando a média ponderada pelo inverso da distância desse ponto a um ponto conhecido.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Monitoração das taxas de equivalente de dose ambiental

Conforme mencionado na metodologia, o sistema AT6101C foi transportado em trilhas nas 14 áreas selecionadas do Granito Madeira, conforme indicado na Figura 3.6. Assim, foram realizadas mais de 30.000 medidas de taxa de equivalente de dose ambiental nos cerca de 40 quilômetros percorridos. Os maiores valores de taxa de equivalente de dose ambiental encontrados situam-se no entorno da Rocha Sã, onde ocorre a exploração mineral, conforme disposto na Tabela 4.1. Isto se deve, provavelmente:

I) Em maior grau, a associação que existe entre os radionuclídeos das cadeias de decaimento do urânio e o tório e os demais materiais da matriz granítica. Como na Rocha Sã a concentração do mineral de interesse é maior, a concentração dos radionuclídeos também é maior.

II) Em menor grau, a decantação da poeira presente na atmosfera e a sua precipitação juntamente com a chuva.

De modo geral, as áreas sem ação antrópica (SA) tiveram as menores dose registradas. No entanto, as médias são compatíveis com as demais áreas chegando a ser superior a de algumas áreas próximas a locais explorados no passado (PA).

A Tabela 4.1 apresenta ainda um comparativo explicitando a menor, a maior, a média, e a taxa mais frequente em cada área.

Tabela 4. 1 – Dados obtidos na monitoração do Granito Madeira.

Área	Detalhe*	Menor** (uSv.h ⁻¹)	Maior** (uSv.h ⁻¹)	Classe mais frequente (uSv.h ⁻¹)	% da classe mais frequente	Média (uSv.h ⁻¹)
1	AS	0,452	3,17	1,3 1,0	31% 31%	1,0 ± 0,4
2	SA	0,273	2,13	0,5	53%	0,5 ± 0,2
3	PA	0,371	1,97	0,5	80%	0,6 ± 0,4
4	PA	0,282	0,65	0,36 0,39	24% 24%	0,4 ± 0,1
5	PA	0,274	3,17	0,4 0,5 0,6	26% 26% 28%	0,6 ± 0,3
6	SA	0,552	2,89	0,8	78%	0,8 ± 0,4
7	SA	0,172	2,85	0,4	61%	0,5 ± 0,4
8	AS	0,424	1,32	0,5 0,7	21% 21%	0,8 ± 0,3
9	PA	0,171	0,91	0,2	31%	0,4 ± 0,2
10	PA	0,187	1,68	0,3	53%	0,5 ± 0,4
11	SA	0,261	1,52	0,4	25%	0,8 ± 0,5
12	AS	0,352	2,00	0,5	59%	0,6 ± 0,4
13	SA	0,360	1,24	0,5	24%	0,7 ± 0,3
14	SA	0,300	1,24	0,4	35%	0,7 ± 0,2
Consolidado	-	0,171	3,17	0,47	44%	0,7 ± 0,4

*AS - Área de sondagem; AS - Sem ação antrópica; PA - Próximo a área explorada no passado.

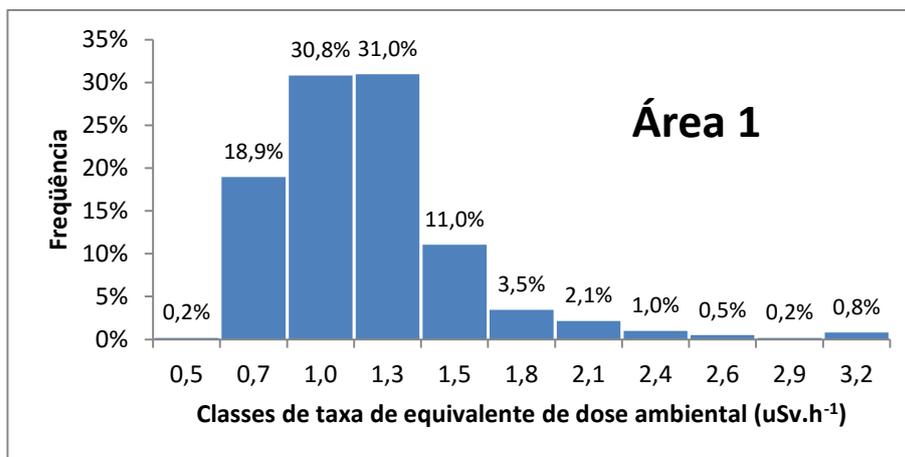
**Taxa de equivalente de dose ambiental.

Fonte: elaborado pelo autor.

4.1.1 Histogramas de frequência das taxas de equivalente de dose ambiental

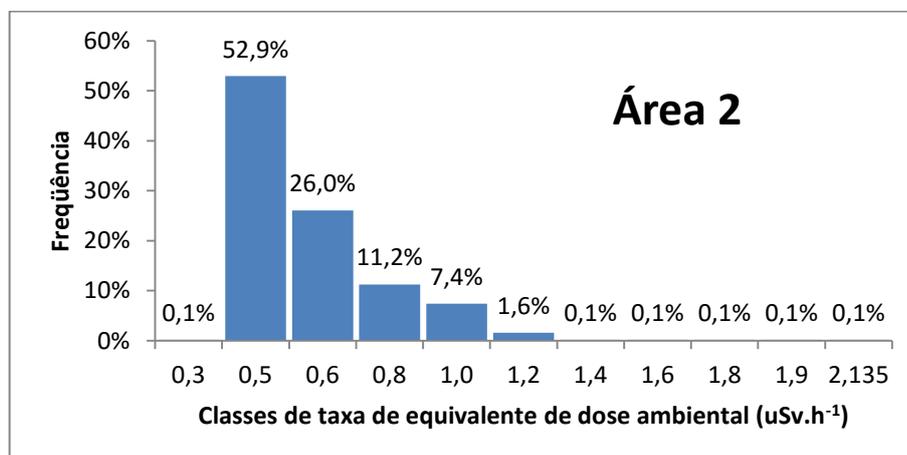
A Área 1, área de sondagem, foi uma área pouco explorada e apresentou histograma de frequências de taxas de dose em torno da média, conforme a Figura 4.1. Este comportamento é esperado quando não ocorre alteração da radiação natural.

Figura 4.1 – Histograma de frequências das taxas de equivalente de dose ambiental da Área 1.



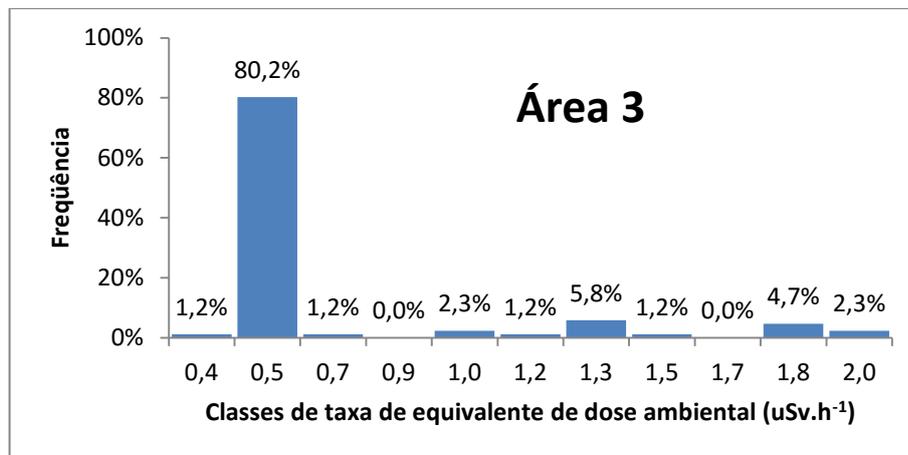
A Área 2 é uma das áreas sem ação antrópica. Ficou com uma das menores médias registradas e com distribuição concentrada em torno da média, conforme a Figura 4.2. Pode-se inferir que a área não apresenta alterações em sua radiação natural de fundo.

Figura 4.2 – Histograma de frequências das taxas de equivalente de dose ambiental da Área 2.



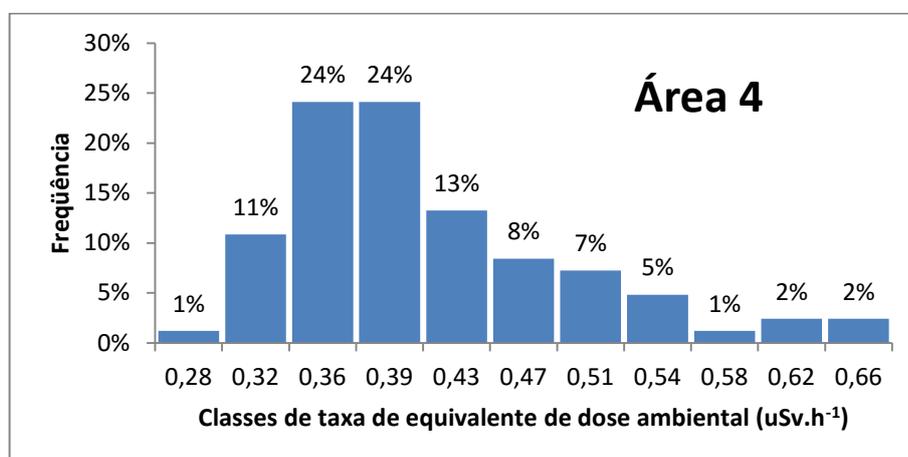
A Área 3 fica próxima a explorações realizadas no passado e apresentou histograma de taxas de doses fortemente concentrada na média (80% das medidas), conforme Figura 4.3. Este comportamento, que evidencia alterações na radiação natural de fundo, pode ser explicado pela possível extração de minerais com taxas de equivalente de dose mais altas.

Figura 4.3 – Histograma de frequências das taxas de equivalente de dose ambiental da Área 3.



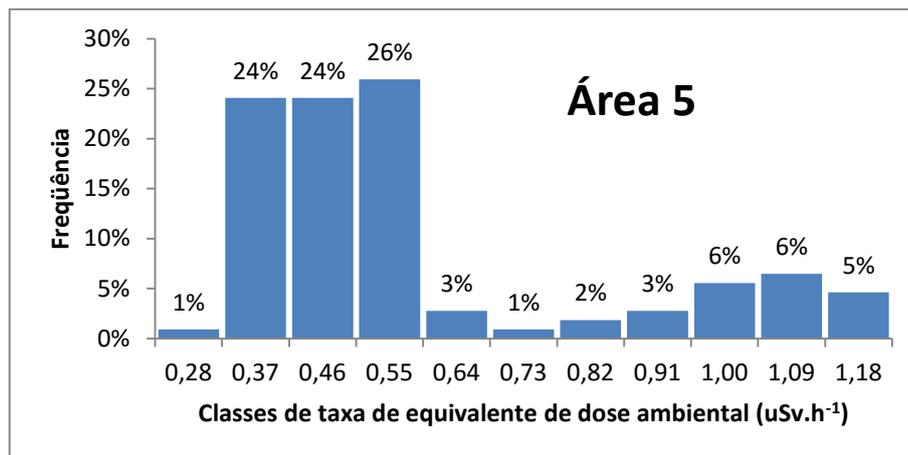
A Área 4, apesar de ficar próximo a locais explorados no passado, apresenta comportamento semelhante ao da Área 1, conforme Figura 4.4. Assim, pode-se afirmar que não houve alteração da radiação natural de fundo.

Figura 4.4 – Histograma de frequências das taxas de equivalente de dose ambiental da Área 4.



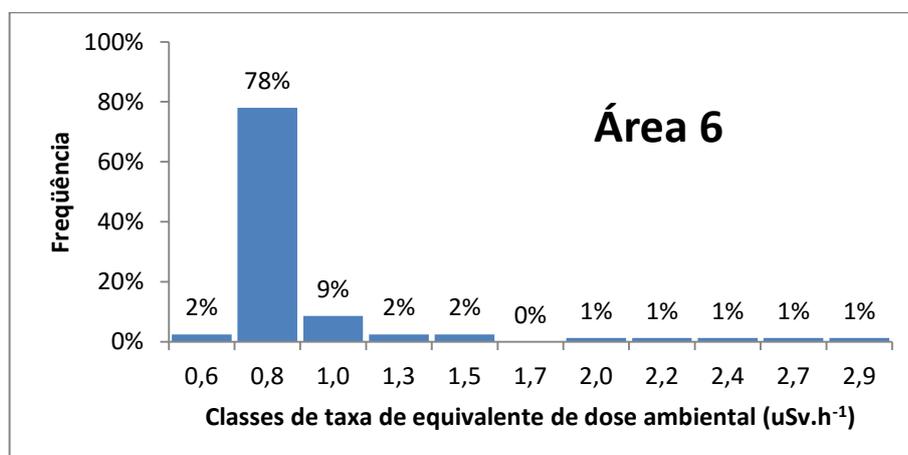
A Área 5 fica próximo a locais explorados no passado. Ela apresenta 3 classes com frequência próximas, conforme a Figura 4.5. Assim, fica evidenciado que houve alteração na radiação natural de fundo, provavelmente, devido a extração de minerais com taxa de equivalente de dose ambiental mais alta.

Figura 4.5 – Histograma de frequências das taxas de equivalente de dose ambiental da Área 5.



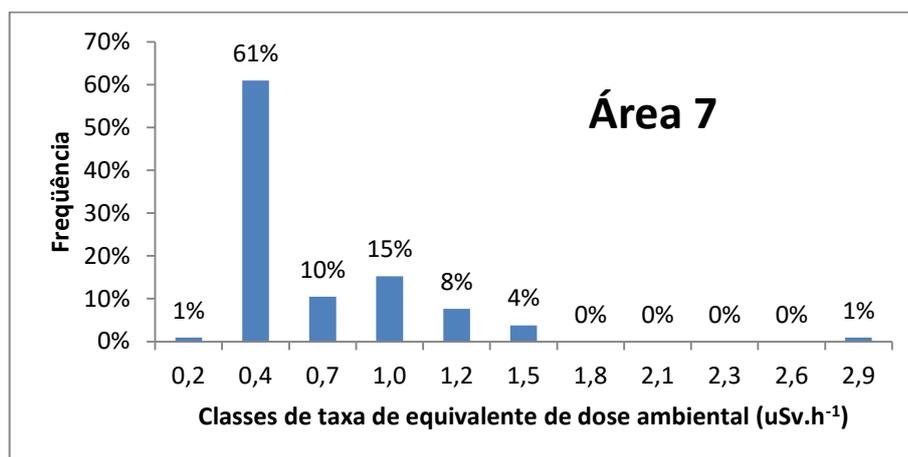
A Área 6, apesar de não possuir ação antrópica, apresenta comportamento semelhante ao da Área 3, conforme a Figura 4.6. A explicação para este comportamento deve-se, provavelmente, a concentração natural de algum mineral no local.

Figura 4.6 – Histograma de frequências das taxas de equivalente de dose ambiental da Área 6.



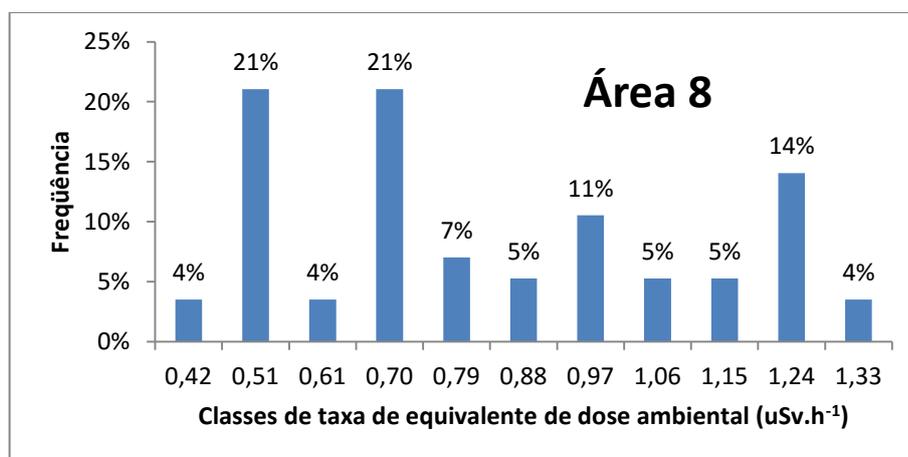
A Área 7 tem histograma de frequências de taxas de dose, conforme a Figura 4.7, provavelmente, devido a concentração natural de algum mineral, já que se trata de um local sem ação antrópica.

Figura 4.7 – Histograma de frequências das taxas de equivalente de dose ambiental da Área 7.



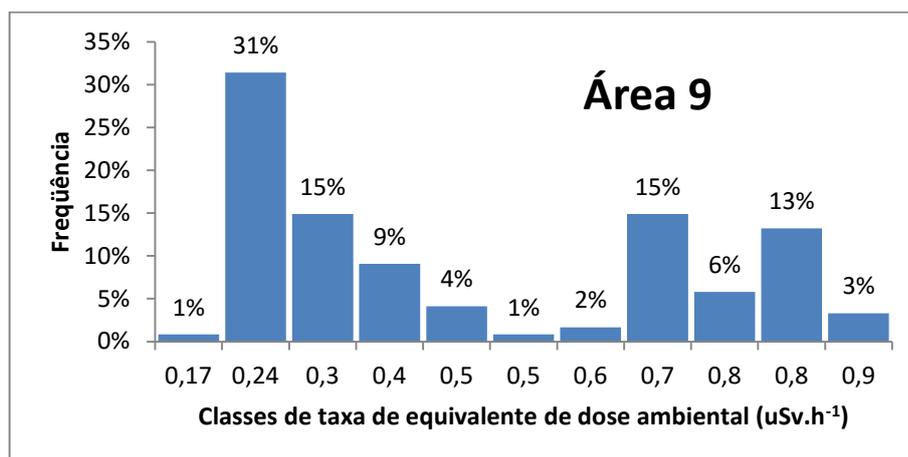
A Área 8 é um local de sondagem e apresentou um comportamento anômalo com a média na classe de apenas 5% de frequência, conforme Figura 4.8. Isto indica que a área teve alteração na radiação natural de fundo devido a contaminação com minerais.

Figura 4.8 – Histograma de frequências das taxas de equivalente de dose ambiental da Área 8.



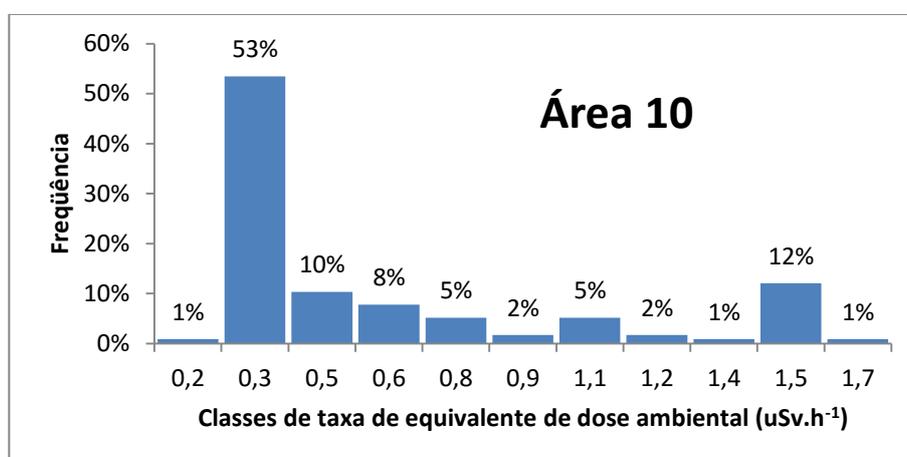
A Área 9 encontra-se próxima a locais explorados no passado. Apesar de apresentar uma das menores médias de taxa de equivalente de dose, ocorreu alteração na radiação natural, provavelmente devido a contaminação da área com minerais.

Figura 4.9 – Histograma de frequências das taxas de equivalente de dose ambiental da Área 9.



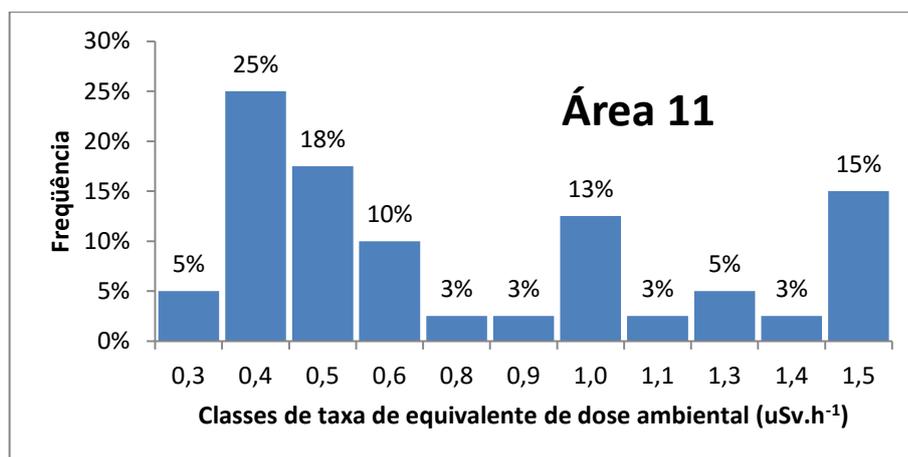
A Área 10 fica próximo a um local explorado no passado. Conforme o histograma de frequências, Figura 4.10, pode-se inferir que houve alteração na radiação natural de fundo devido, provavelmente, a extração de mineral com taxa de dose mais elevada.

Figura 4.10 – Histograma de frequências das taxas de equivalente de dose ambiental da Área 10.



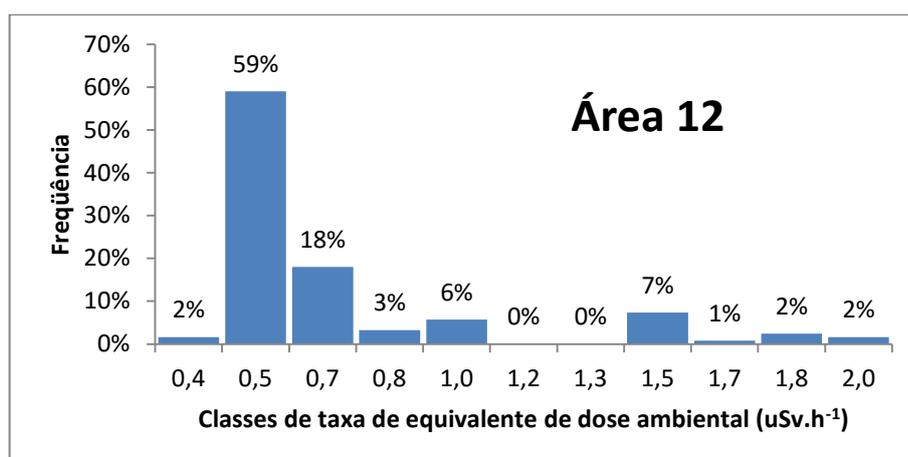
A Área 11, apesar de ser um local sem ação antrópica, apresentou histograma com comportamento similar ao da Área 8 – área de sondagem.

Figura 4.11 – Histograma de frequências das taxas de equivalente de dose ambiental da Área 11.



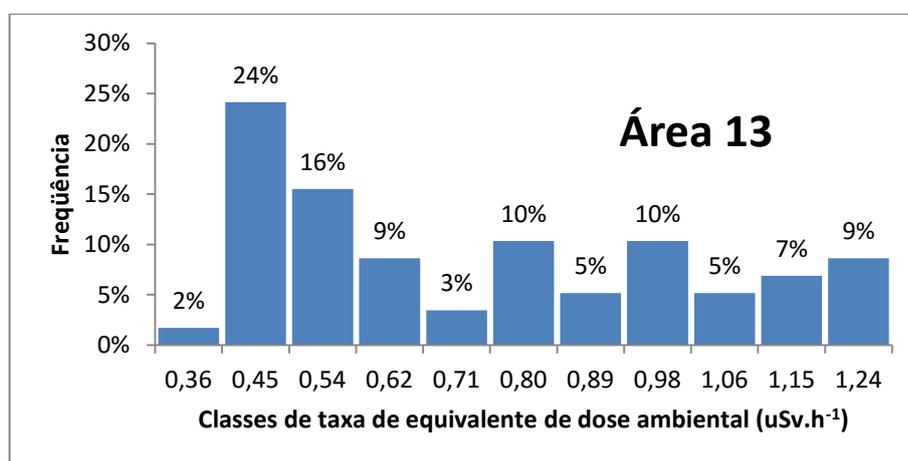
A Área 12 é um local de sondagem e não apresentou alteração da radiação natural de fundo, conforme pode ser visualizado no histograma de frequências da Figura 4.12.

Figura 4.12 – Histograma de frequências das taxas de equivalente de dose ambiental da Área 12.



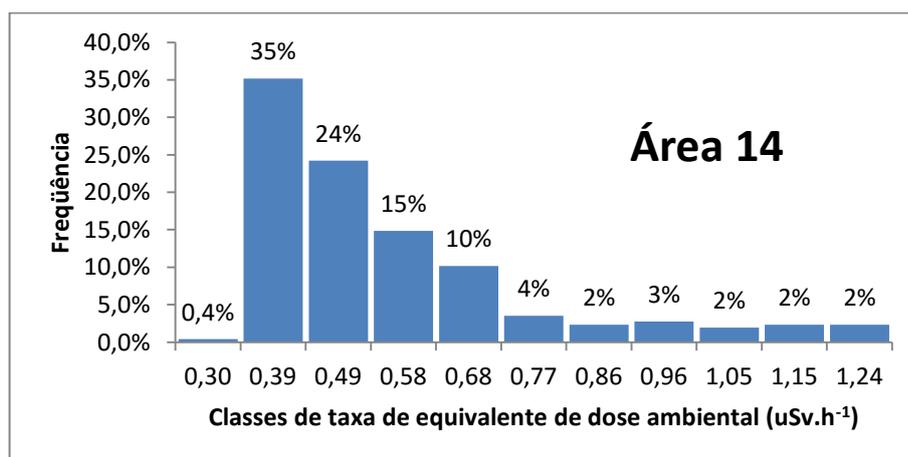
A Área 13 é um local sem ação antrópica. Entretanto, conforme Figura 4.12, não apresentou um histograma de frequências esperado.

Figura 4.13 – Histograma de frequências das taxas de equivalente de dose ambiental da Área 13.



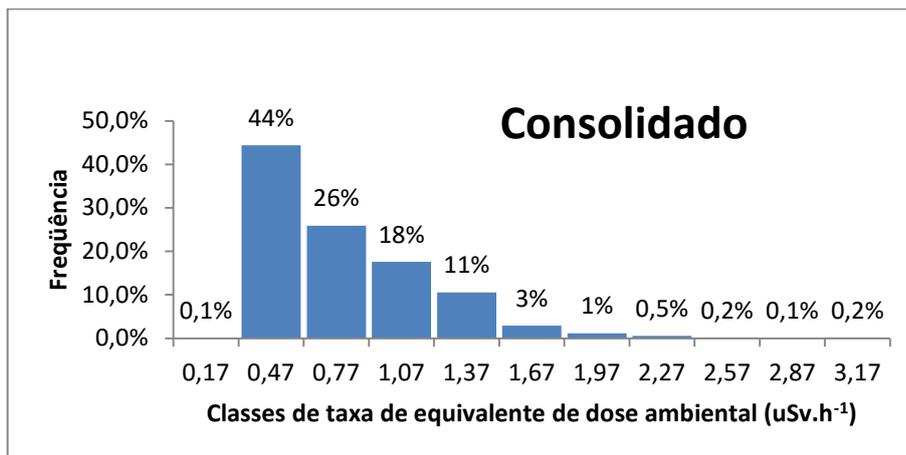
A Área 14 é um local sem ação antrópica e no qual não houve alteração da radiação natural de fundo, conforme evidenciado pelo histograma da Figura 4.14.

Figura 4.14 – Histograma de frequências das taxas de equivalente de dose ambiental da Área 14.



Na Figura 4.15 pode ser visualizado o consolidado da distribuição das taxas de equivalente de dose ambiental das 14 áreas monitoradas. Pode-se afirmar que houve pouca ou nenhuma alteração na radiação natural de fundo do Granito Madeira com um todo.

Figura 4.15 – Histograma de frequências das taxas de dose ambiental – Consolidado das áreas monitoradas do Granito Madeira



4.1.2 Mapas com a representação dos pontos monitorados nas áreas

Nas figuras a seguir disponibilizou-se os mapas com as taxas de equivalente de dose ambiental georreferenciadas.

Figura 4.16 – Distribuição espacial das taxas de dose na Área 1 (área de sondagem)

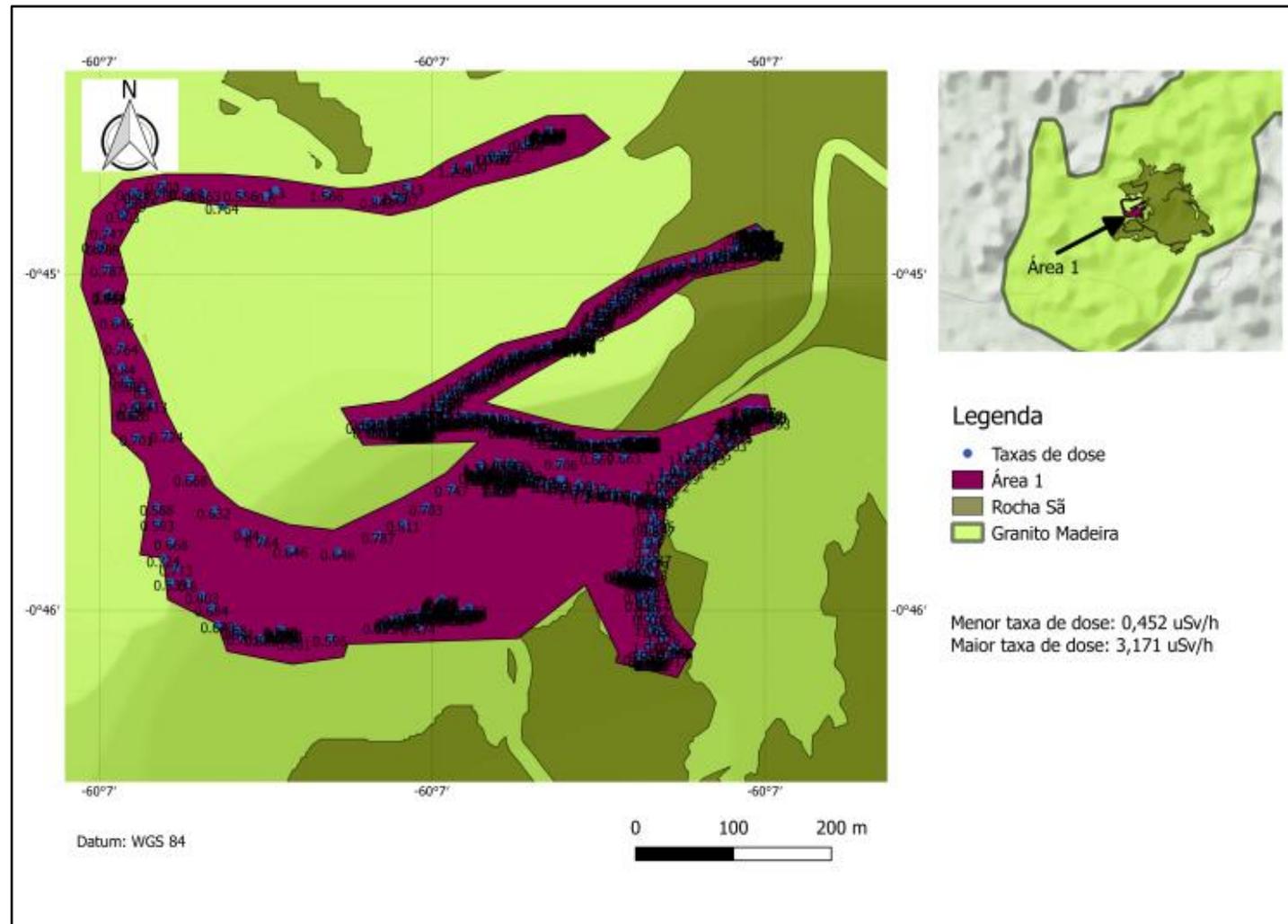


Figura 4.17 – Distribuição espacial das taxas de dose da Área 2 (sem ação antrópica).

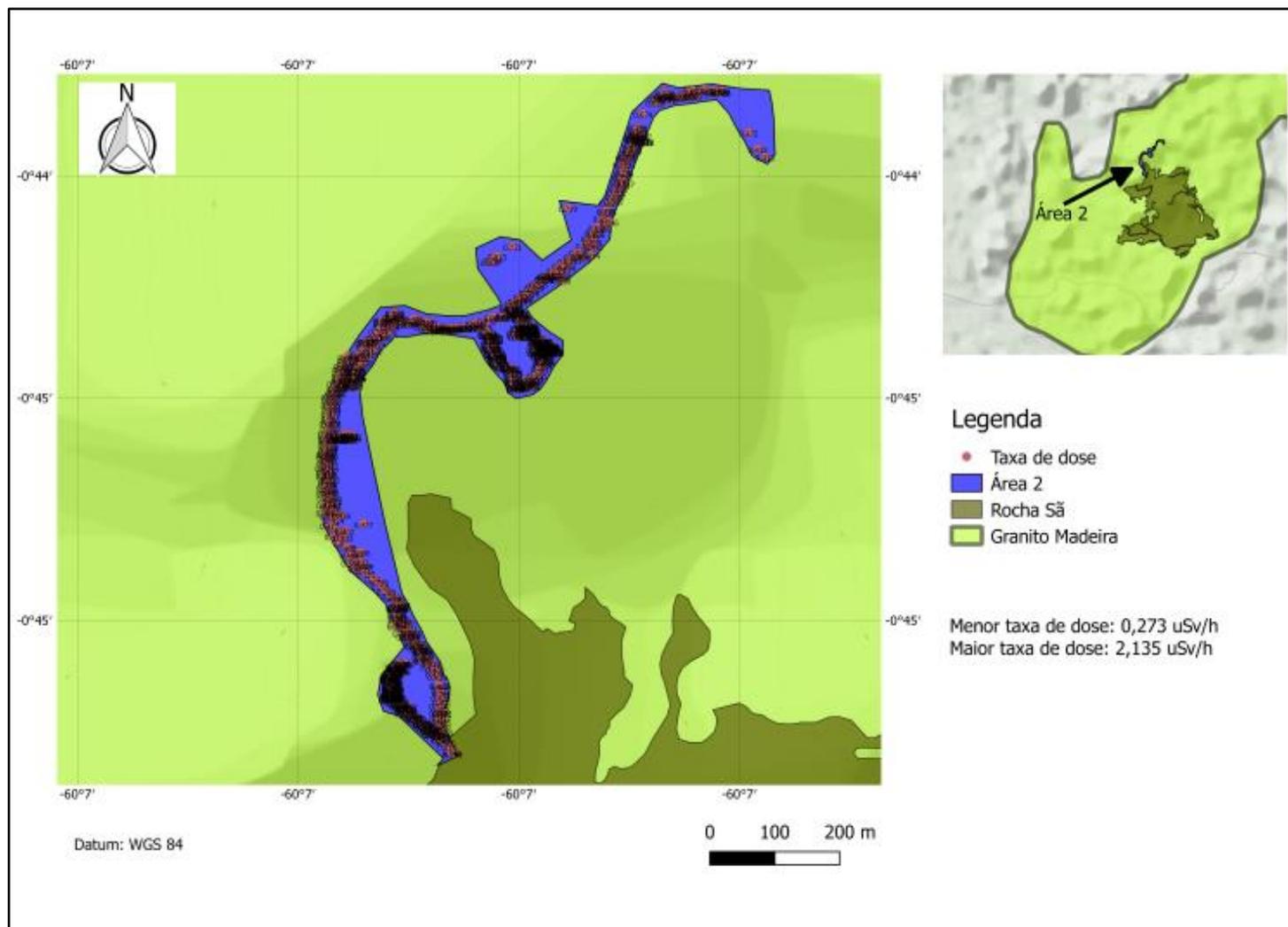


Figura 4. 18 – Distribuição espacial das taxas de dose da Área 3 (próximo a área explorada no passado).

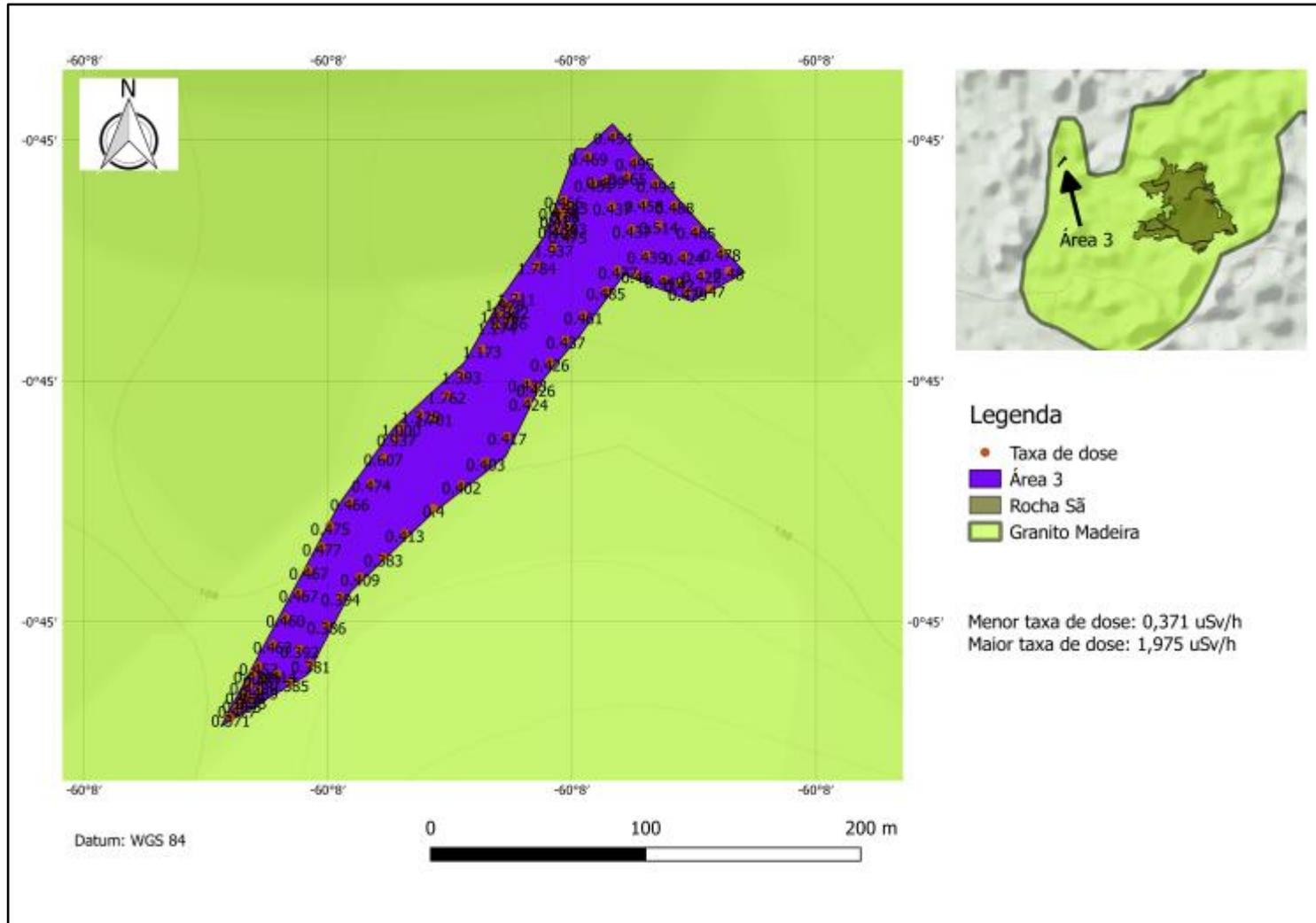


Figura 4. 19 – Distribuição espacial das taxas de dose da Área 4 (próximo a área explorada no passado).

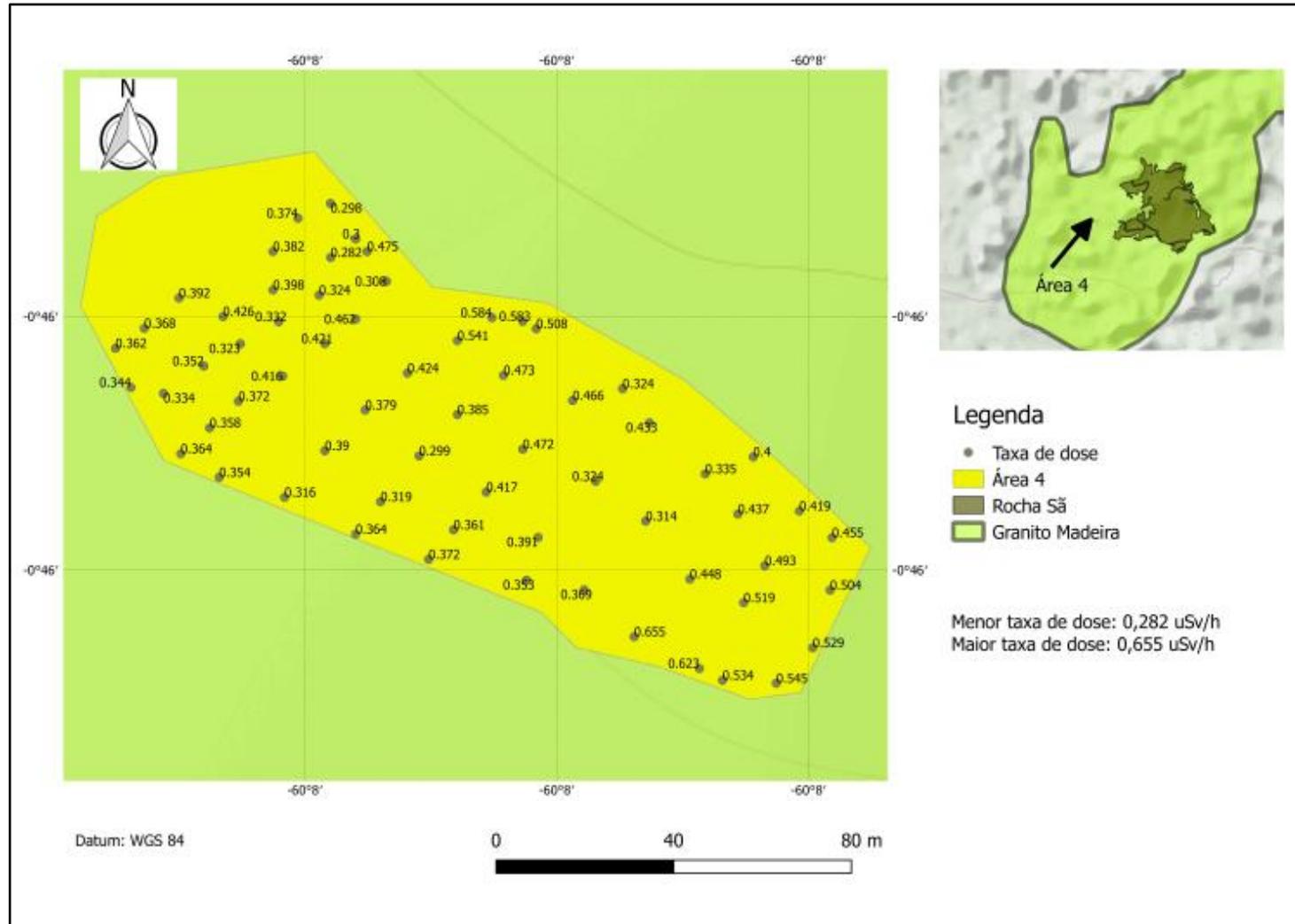


Figura 4.20 – Distribuição espacial das taxas de dose da Área 5 (próximo a área explorada no passado).

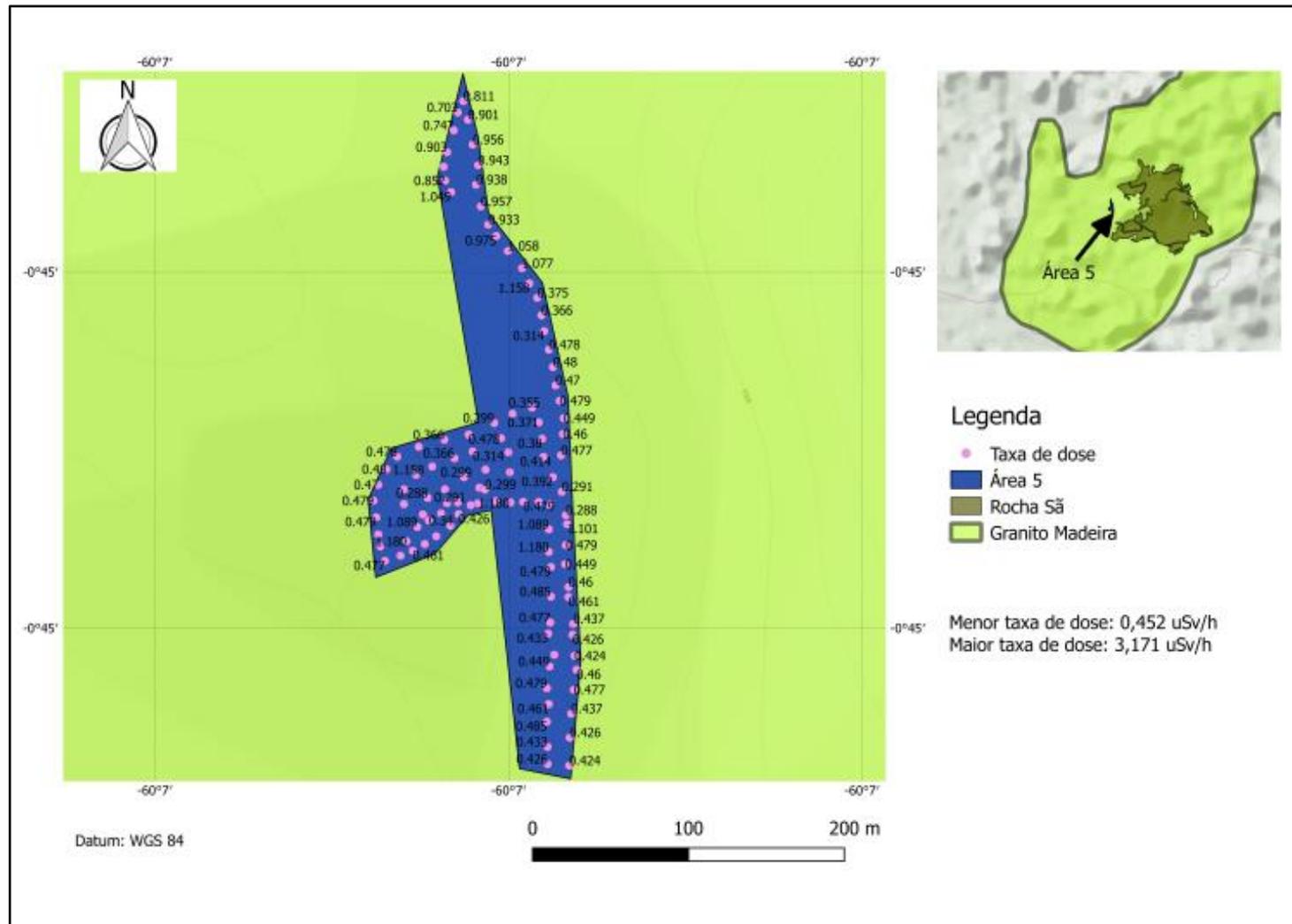


Figura 4.21– Distribuição espacial das taxas de dose da Área 6 (sem ação antrópica).

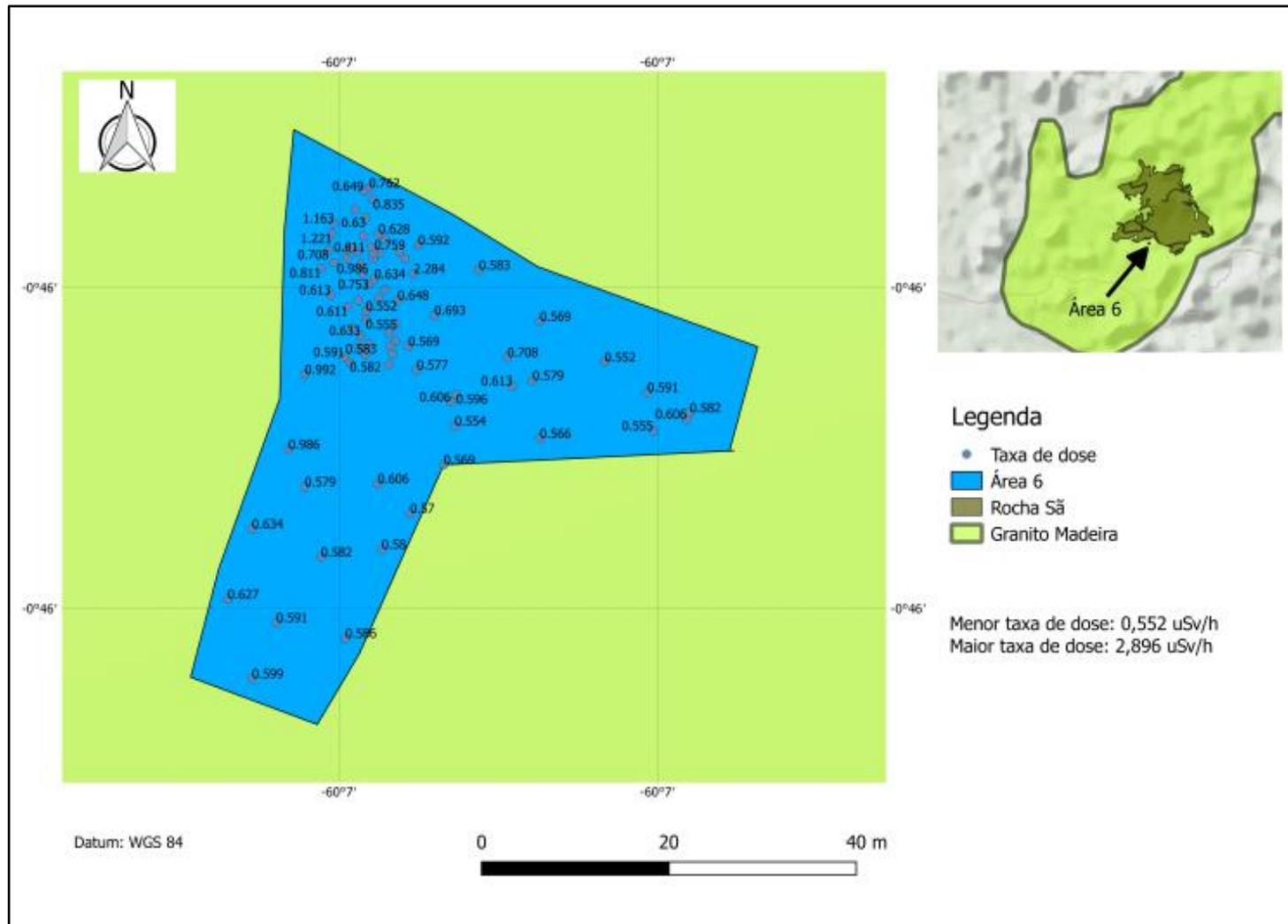


Figura 4. 22 – Distribuição espacial das taxas de dose da Área 7 (sem ação antrópica).

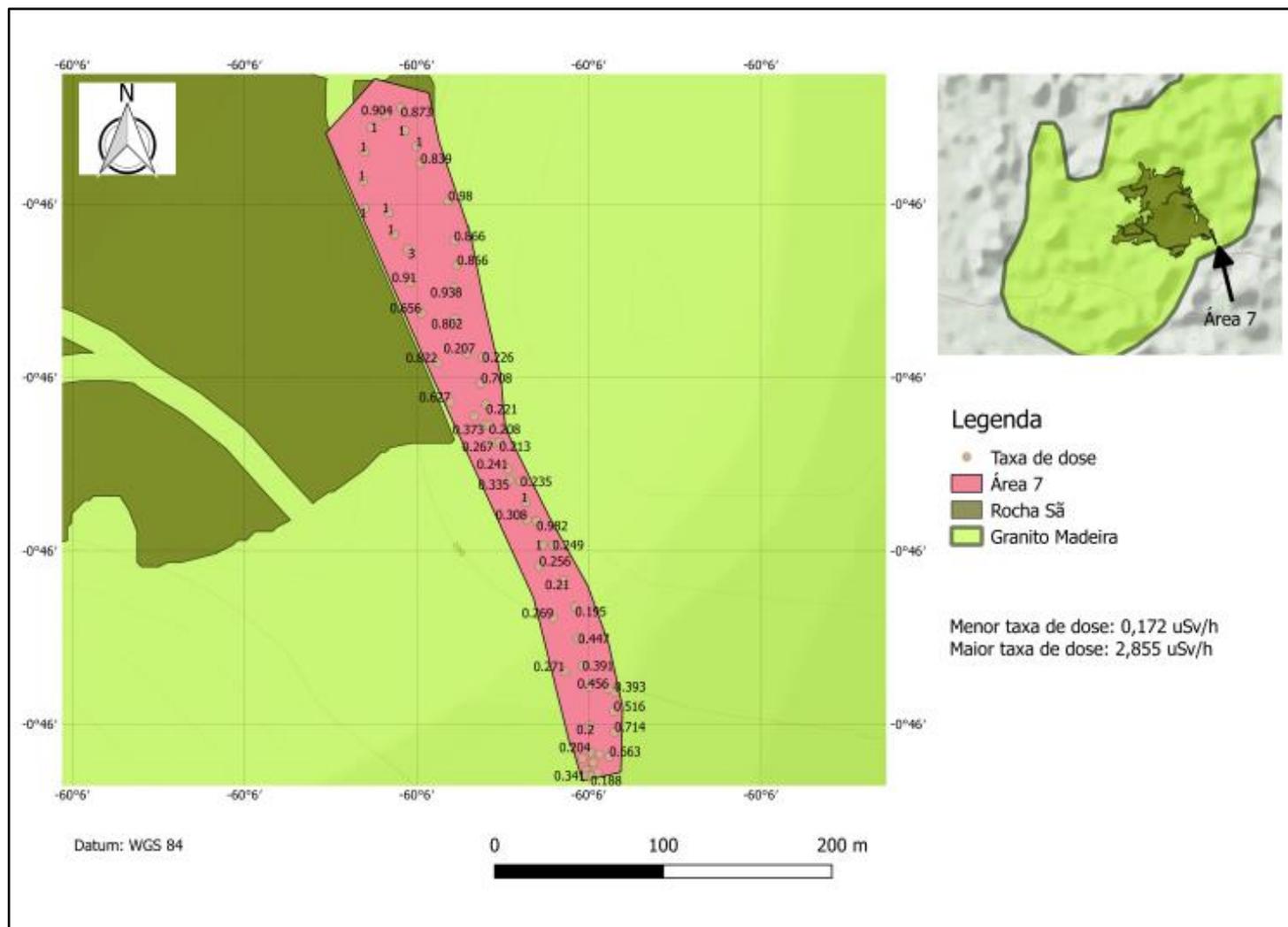


Figura 4.23 – Distribuição espacial das taxas de dose da Área 8 (área de sondagem).

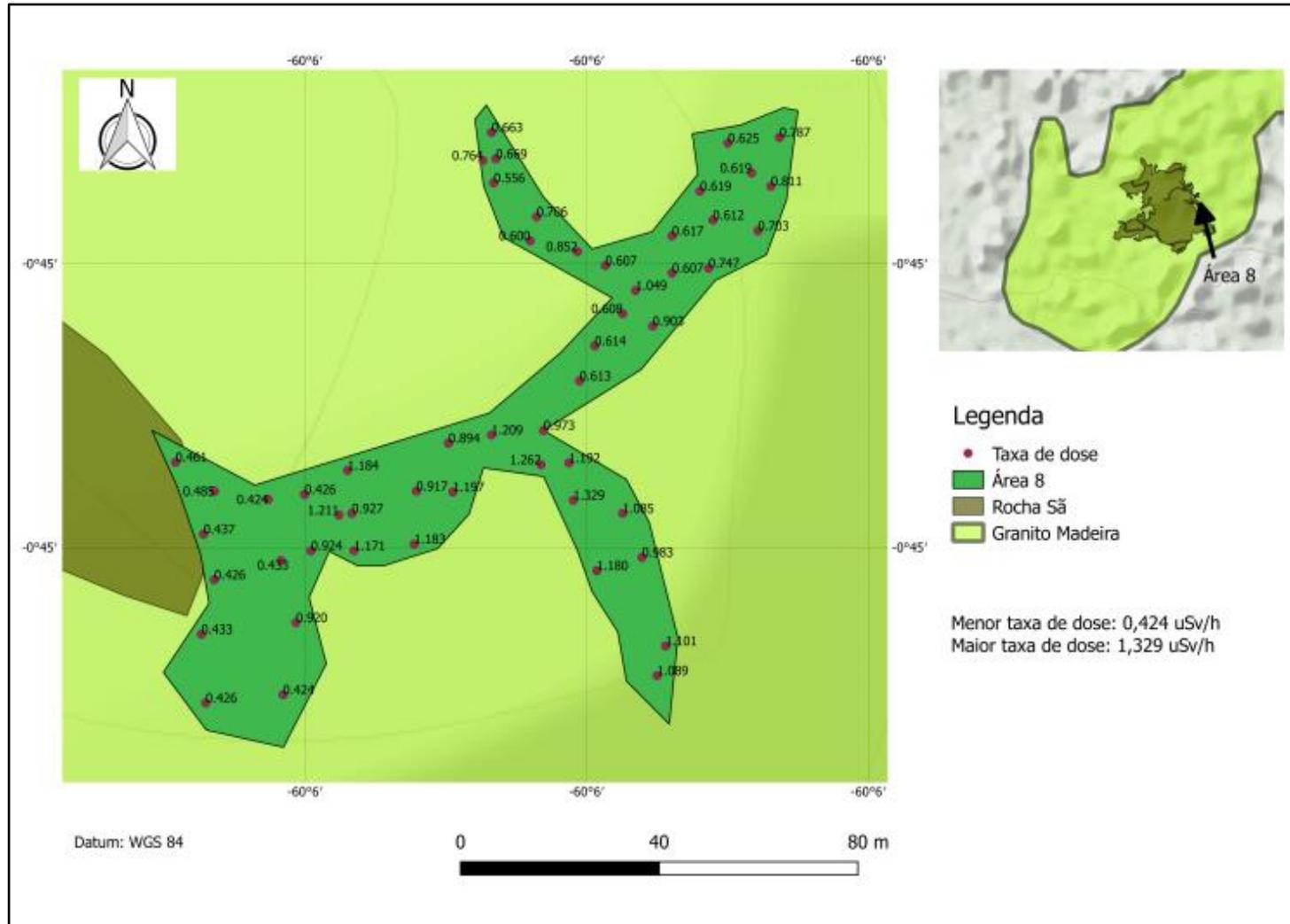


Figura 4.24 – Distribuição espacial das taxas de dose da Área 9 (próximo a área explorada no passado).

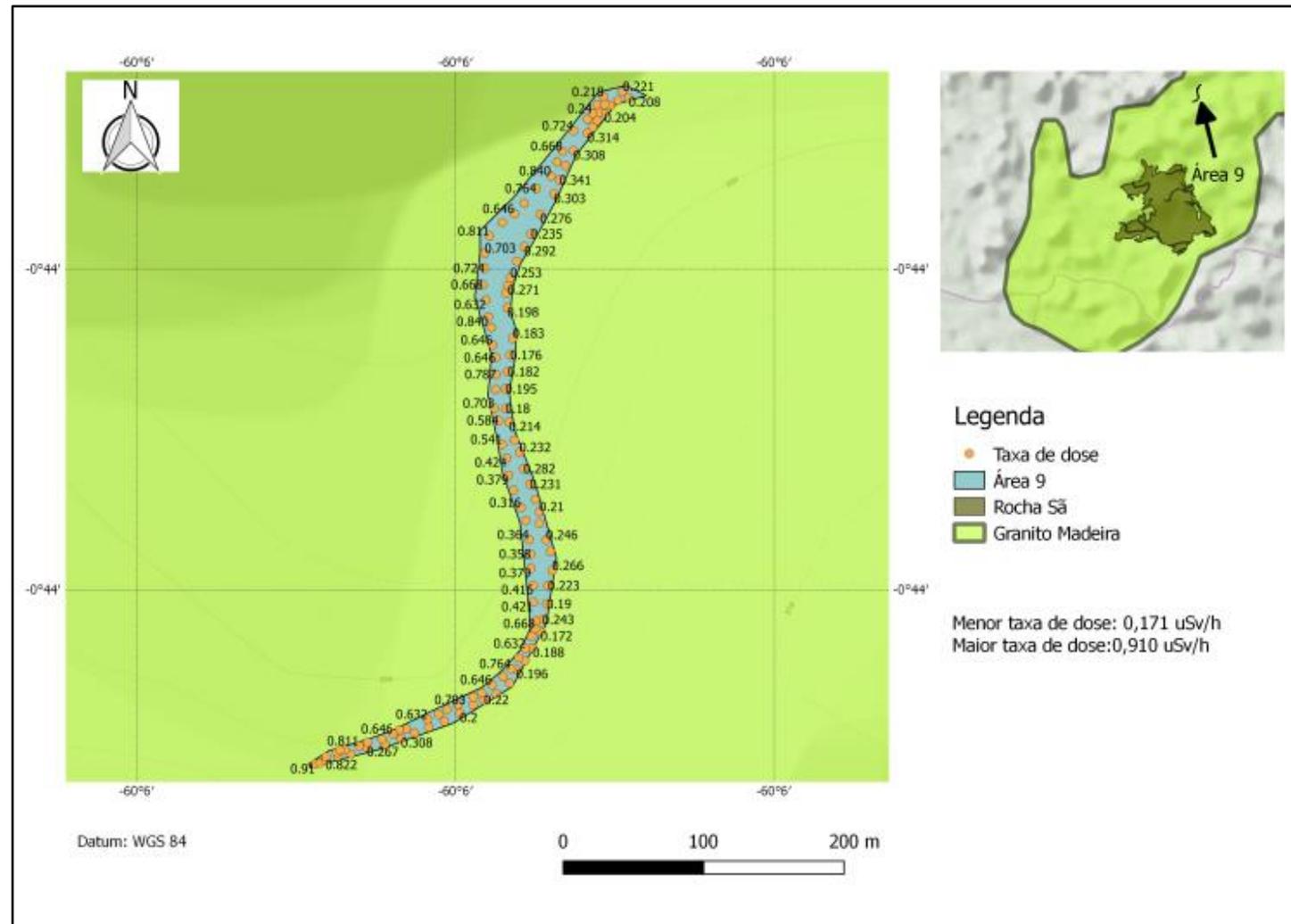


Figura 4. 25 – Distribuição espacial das taxas de dose da Área 10 (próximo a área explorada no passado).

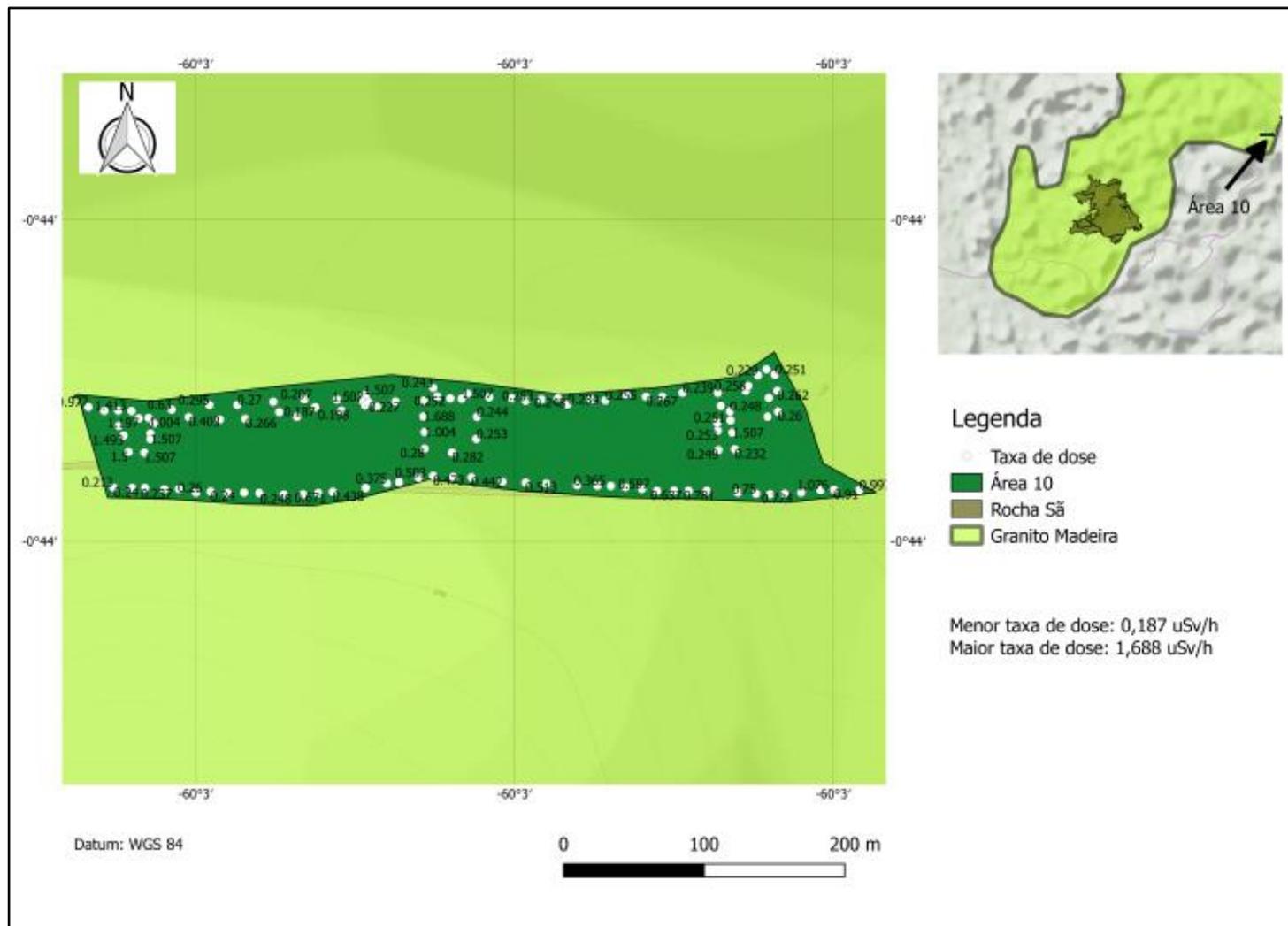


Figura 4.26 – Distribuição espacial das taxas de dose da Área 11 (sem ação antrópica).

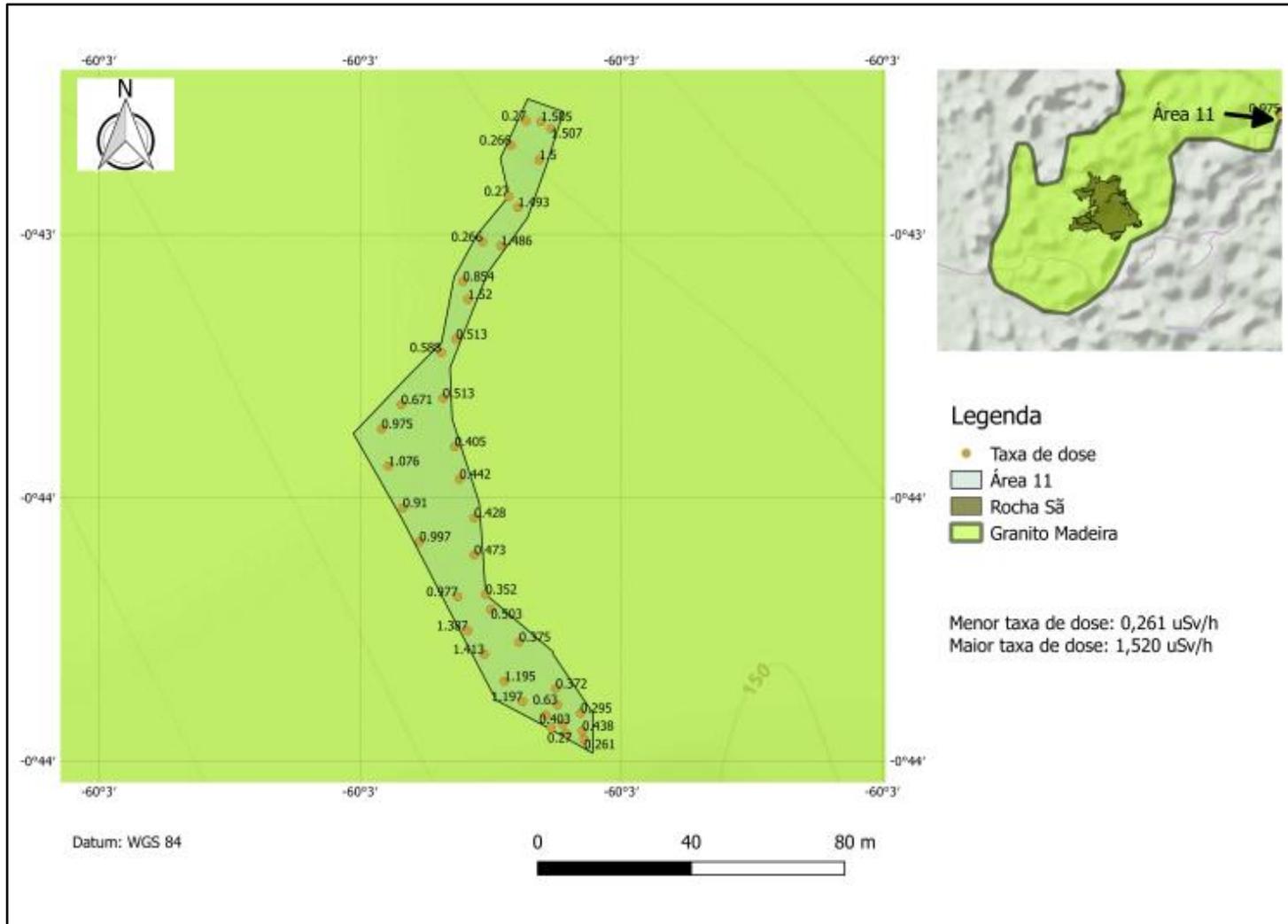


Figura 4.27 – Distribuição espacial das taxas de dose da Área 12 (área de sondagem).

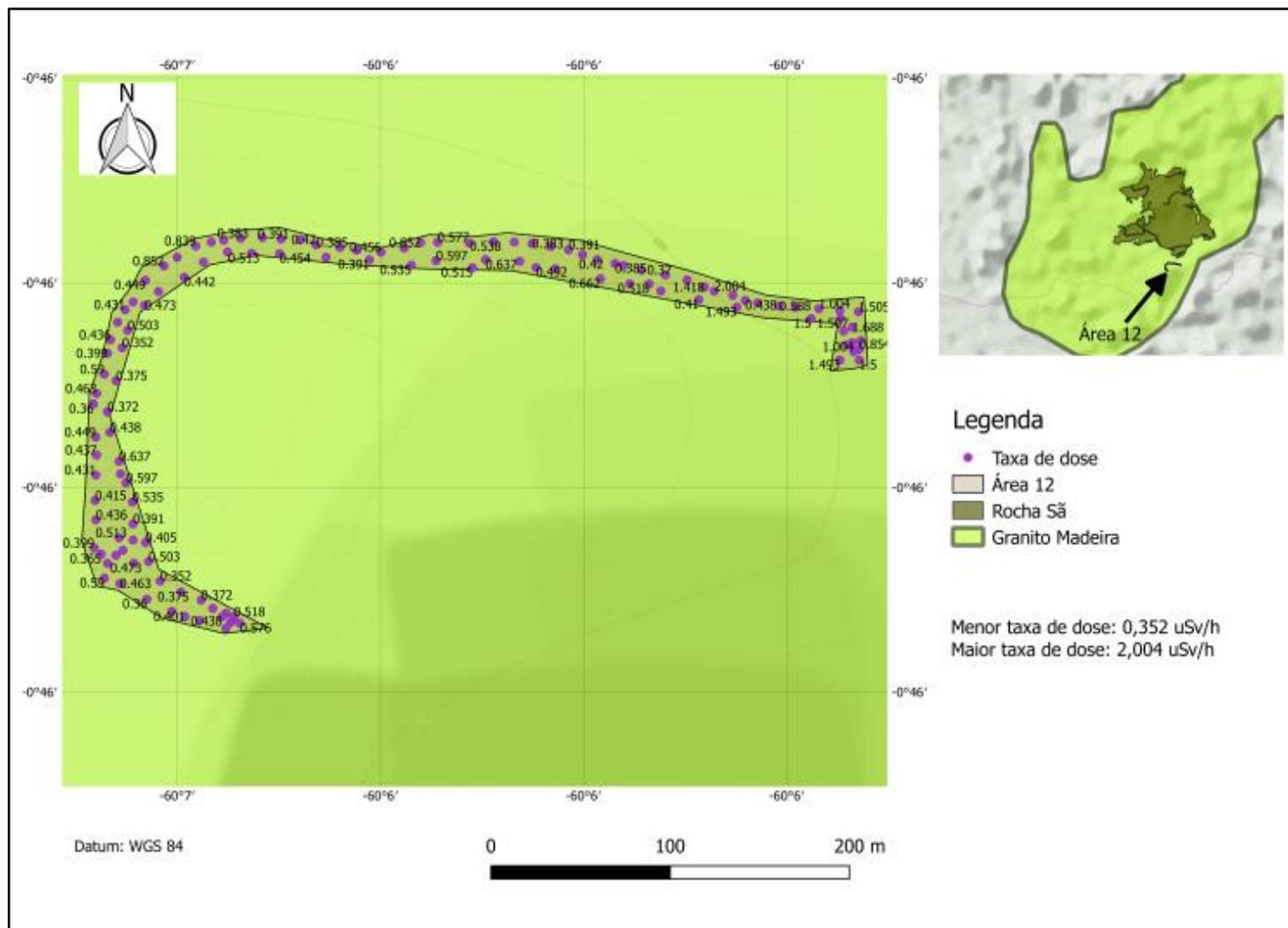


Figura 4.28 – Distribuição espacial das taxas de dose da Área 13 (sem ação antrópica).

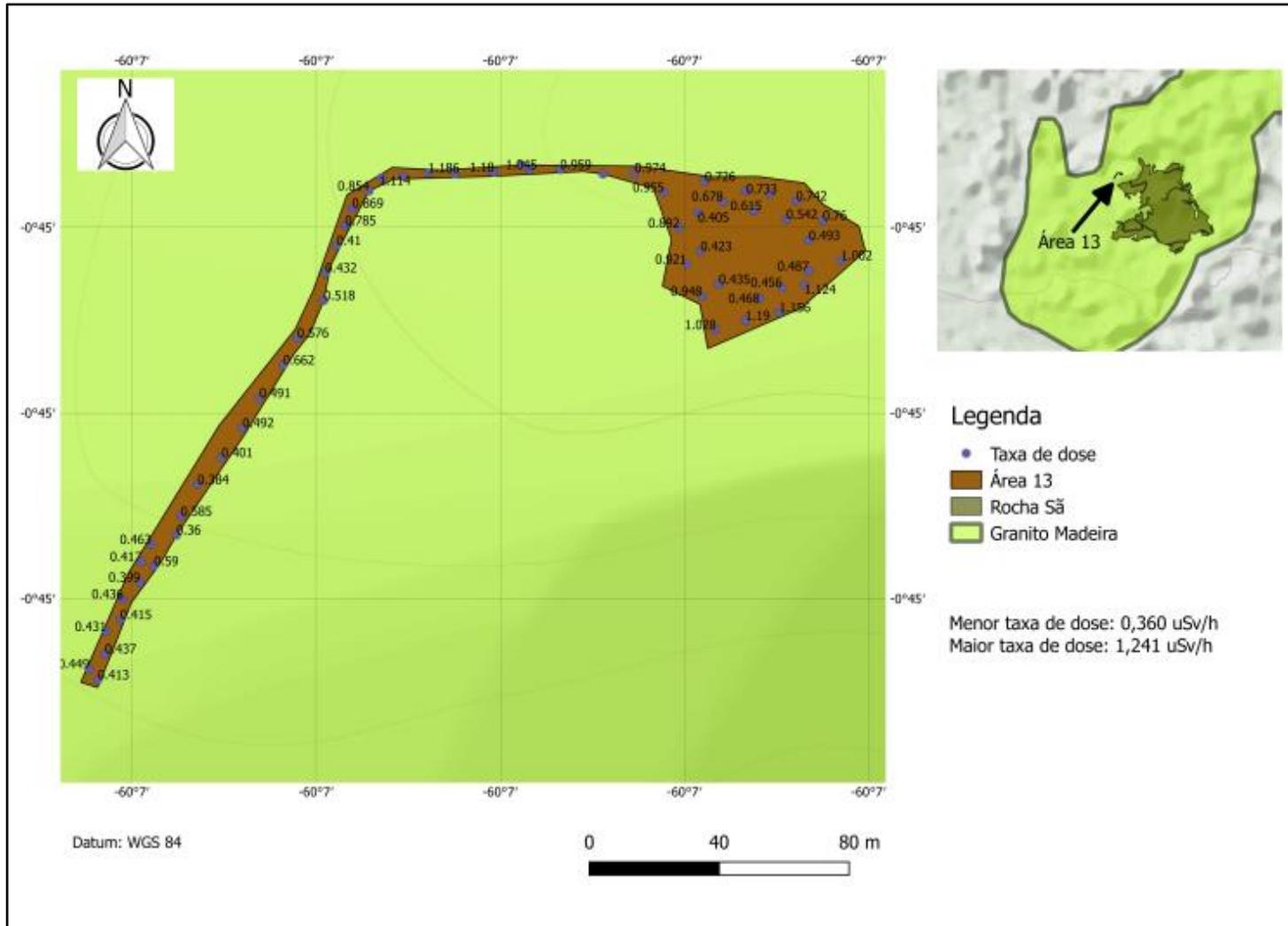
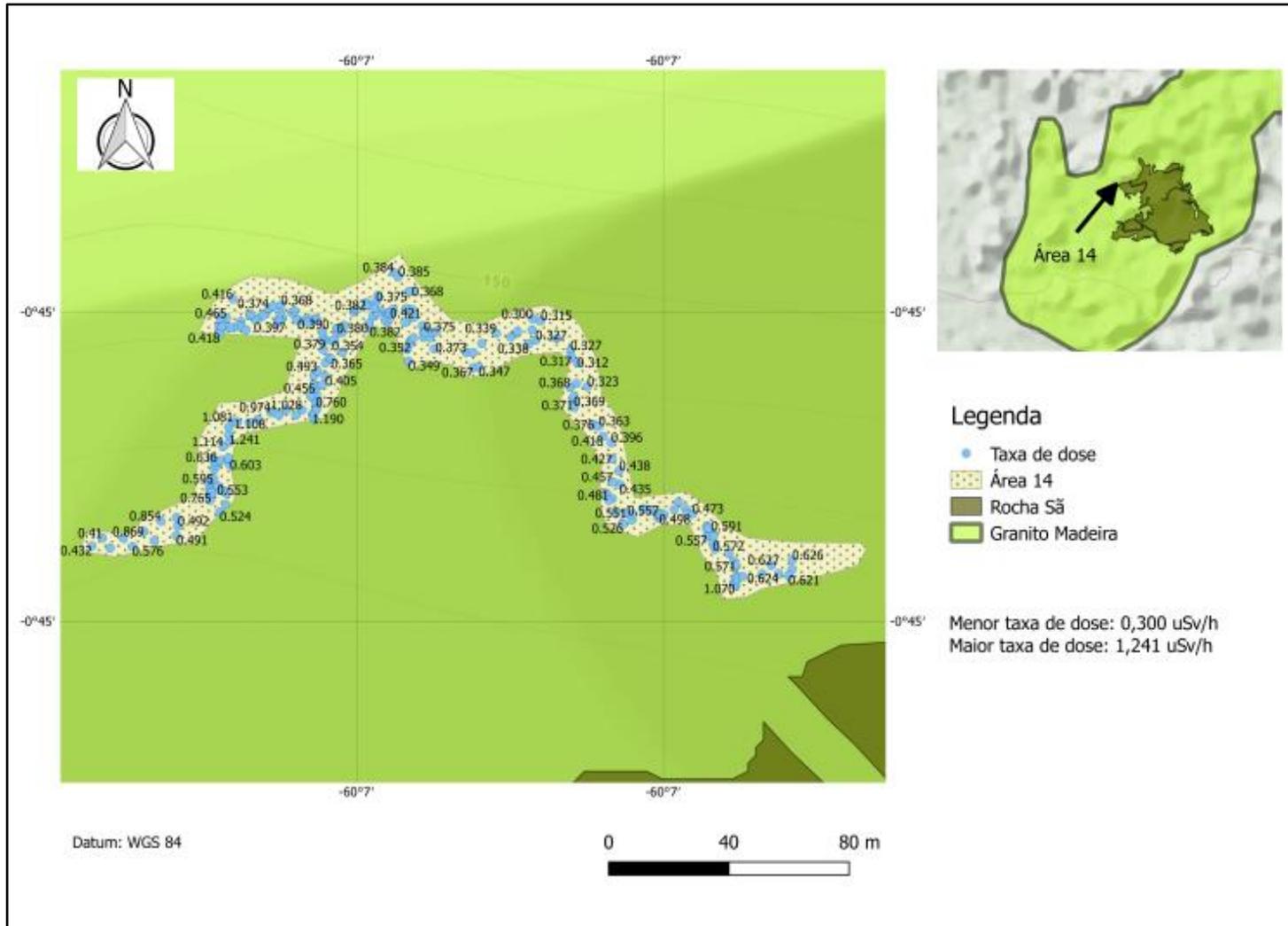


Figura 4.29 – Distribuição espacial das taxas de dose da Área 14 (sem ação antrópica).



4.1.3 Comparação das taxas de dose deste estudo com o de outros autores

De acordo com a Tabela 4.2, que compara as taxas de dose monitoradas neste estudo com o de outros autores, observa-se que, na região do Granito Madeira, a radioatividade natural de fundo é superior a média mundial.

Observa-se que mesmo comparando detectores do mesmo tipo e áreas com presença de material NORM, como é o caso deste estudo, o de SACHETT, 2002 e o de SANTOS, 2006, o Granito Madeira apresenta uma radioatividade natural de fundo superior – cerca de 7 vezes maior.

Tabela 4.2 – Comparação das taxa de dose deste trabalho com outras da literatura.

Local	Média ($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$)	Detector	Autor
Média mundial	0,05*	-	UNSCEAR, 2010
Águas da Prata-SP	0,11**	Iodeto de sódio	SACHETT, 2002
Poços de Caldas-MG	0,14**	Iodeto de sódio	SACHETT, 2002
Andradas-MG	0,10**	Iodeto de sódio	SACHETT, 2002
Caldas-MG	0,13**	Iodeto de sódio	SACHETT, 2002
Guarapari-ES	0,09**	Iodeto de sódio	SACHETT, 2002
Lagoa Real, Caetitê-BA	0,09	Iodeto de sódio	SANTOS, 2006,
Lagoa Real, Caetitê-BA	0,10	TLD	SANTOS, 2006,
Ribeirão Preto	0,03**	Cintilador plástico	CAVALCANTI, 2012
Fortaleza-CE	0,08**	Cintilador plástico	SOUZA et al., 2015
Costa do Sauipe-BA	0,05**	Cintilador plástico	SOUZA et al., 2015
Vitória-ES	0,10**	Cintilador plástico	SOUZA et al., 2015
Angra dos Reis-RJ	0,15**	Cintilador plástico	SOUZA et al., 2015
Rio de Janeiro-RJ	0,19	Iodeto de Sódio	SOUZA, 2016
Granito Madeira-AM	$0,7 \pm 0,4$	Iodeto de Sódio	Este trabalho

*No relatório da UNSCEAR o valor é dado em $\text{mSv}\cdot\text{ano}^{-1}$. Para chegar a este valor dividiu-se a dose média anual por 8760 horas. ** Usou-se o fator de conversão $1\text{Sv} = 1\text{Gy}$. ***Classe de taxa de equivalente de dose ambiental mais frequente.

Fonte: adaptado de UNSCEAR, 2010; SACHETT, 2002; CAVALCANTI, 2012; SOUZA et al., 2015. SOUZA, 2016.

4.2 Determinação da dose anual relativa à radiação gama

Realizando-se o produto das taxas de equivalente de dose ambiental pelo número de horas de um ano padrão (8760 horas) obtém-se a dose anual relativa à radiação gama no Granito Madeira, conforme a Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Doses anuais potenciais relativas à radiação gama no Granito Madeira.

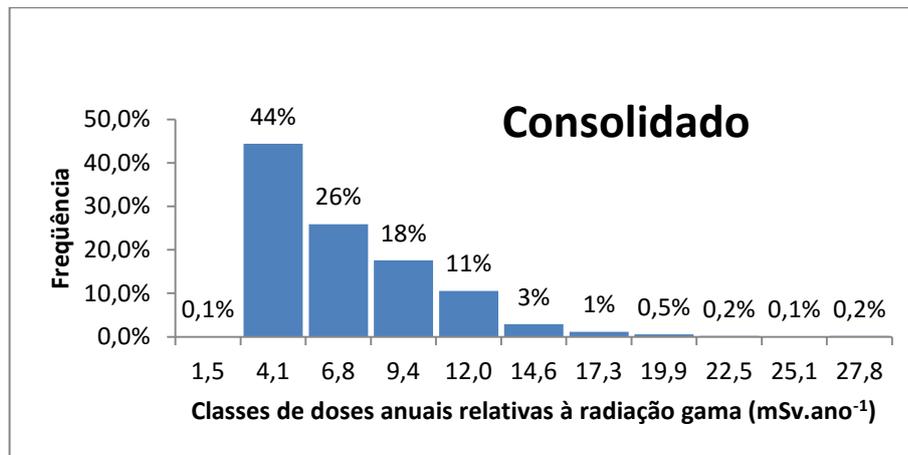
Área	Detalhe*	Menor dose anual (mSv)	Maior dose anual (mSv)	Média (mSv)
1	AS	4,0	27,8	9,0 ± 3,0
2	AS	2,4	18,7	4,0 ± 2,0
3	PA	3,2	17,3	5,0 ± 4,0
4	PA	2,5	5,7	3,0 ± 1,0
5	PA	2,4	10,3	5,0 ± 2,0
6	AS	4,8	25,4	7,0 ± 4,0
7	AS	1,5	25,0	4,0 ± 4,0
8	AS	3,7	11,6	7,0 ± 2,0
9	PA	1,5	8,0	4,0 ± 2,0
10	PA	1,6	14,8	5,0 ± 4,0
11	AS	2,3	13,2	7,0 ± 4,0
12	AS	3,1	17,6	6,0 ± 3,0
13	AS	3,2	10,9	6,0 ± 2,0
14	AS	2,6	10,9	5,0 ± 2,0
Consolidado	-	1,5	27,8	6,0 ± 3,0

*AS - Área de sondagem; AS - Sem ação antrópica; PA - Próximo a área explorada no passado.

**Taxa de equivalente de dose ambiental.
Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 4.45 apresenta o histograma das doses anuais relativas à radiação gama do Granito Madeira complementando as informações da Figura 4.46. Observa-se que 70% das doses situam-se entre as classes 4,1 mSv.ano⁻¹ e 6,8 mSv.ano⁻¹.

Figura 4. 30 – Histograma de doses anuais relativas à radiação gama no Granito Madeira.



4.2.1 Mapas com doses anuais

As doses anuais foram georreferenciadas e interpolados pelo método do inverso do quadrado pelo software Surfer. O resultado pode ser visualizado nos mapas a seguir.

Figura 4.31 – Doses anuais relativas a radiação gama na Área 1.

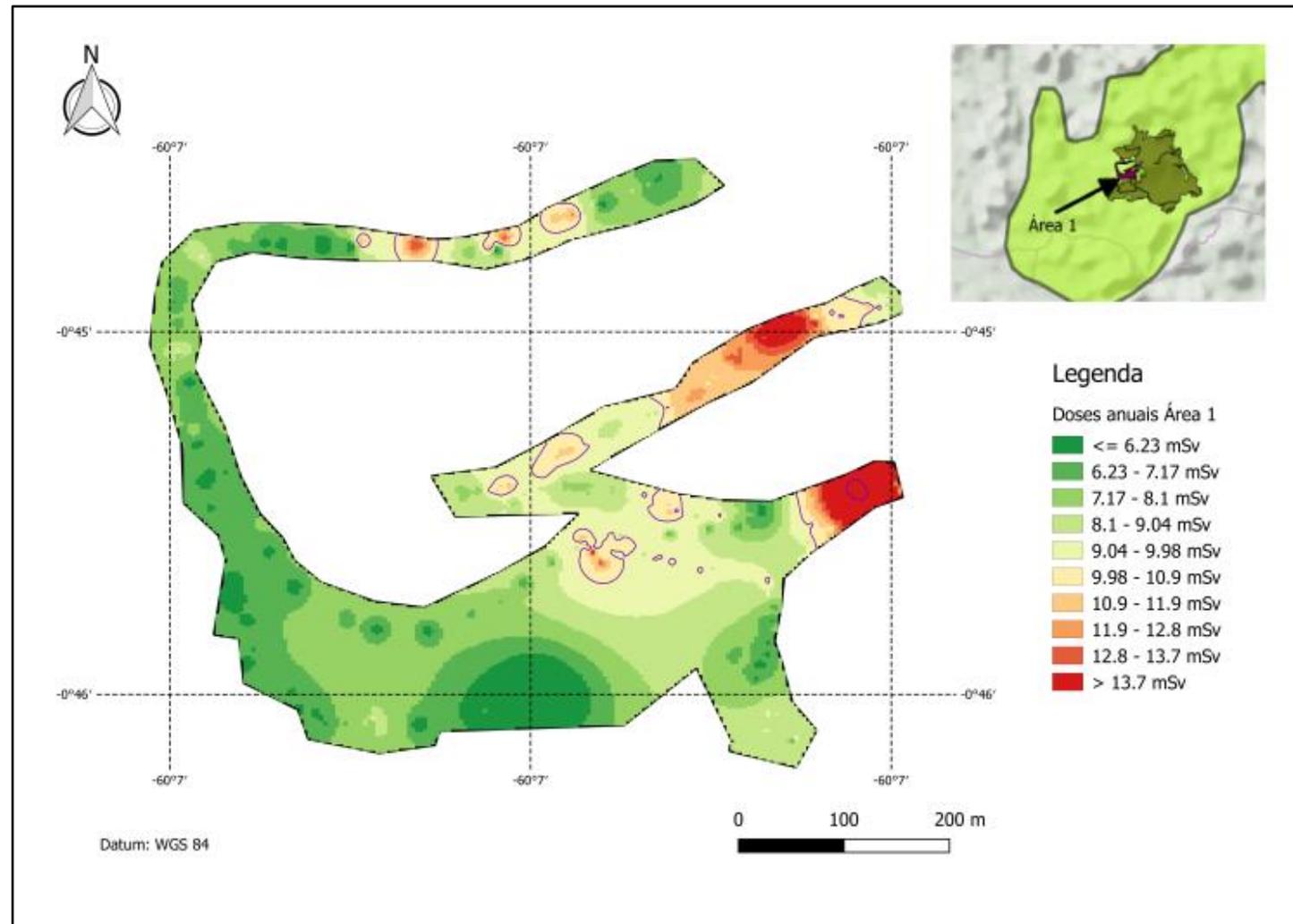


Figura 4. 32 – Doses anuais relativas a radiação gama na Área 2.

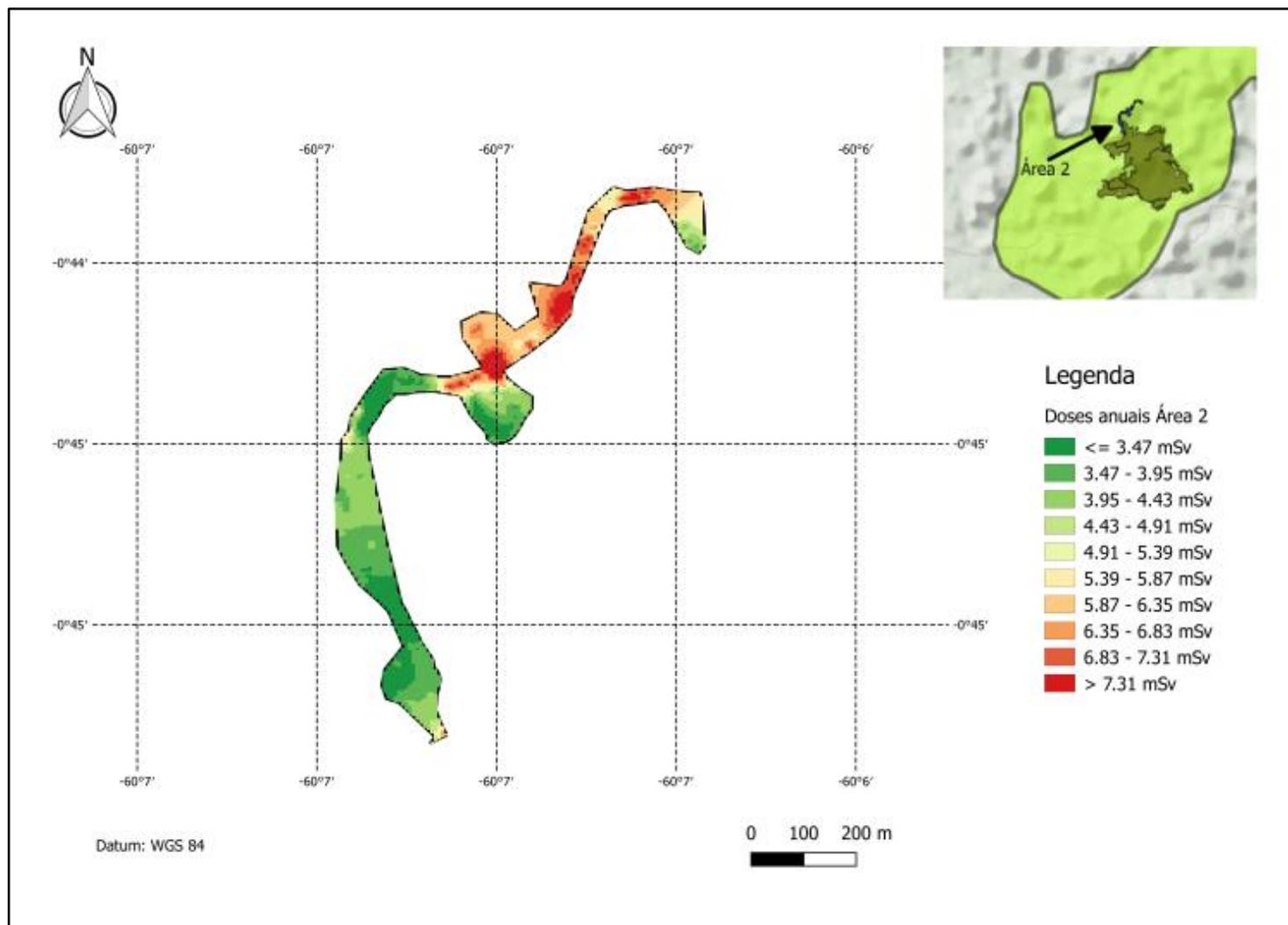


Figura 4. 33 – Doses anuais relativas a radiação gama na Área 3.

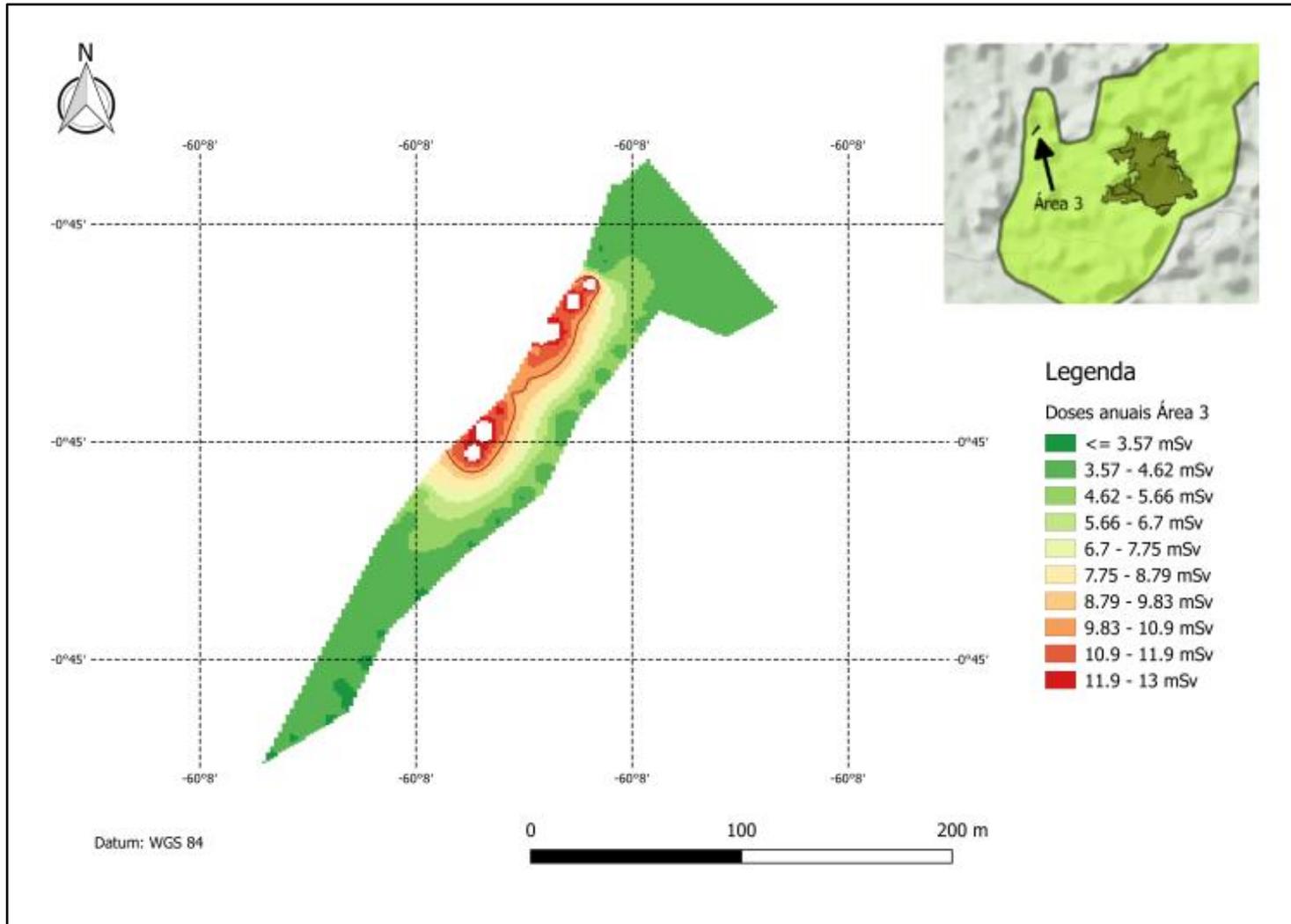


Figura 4. 34 – Doses anuais relativas a radiação gama na Área 4.

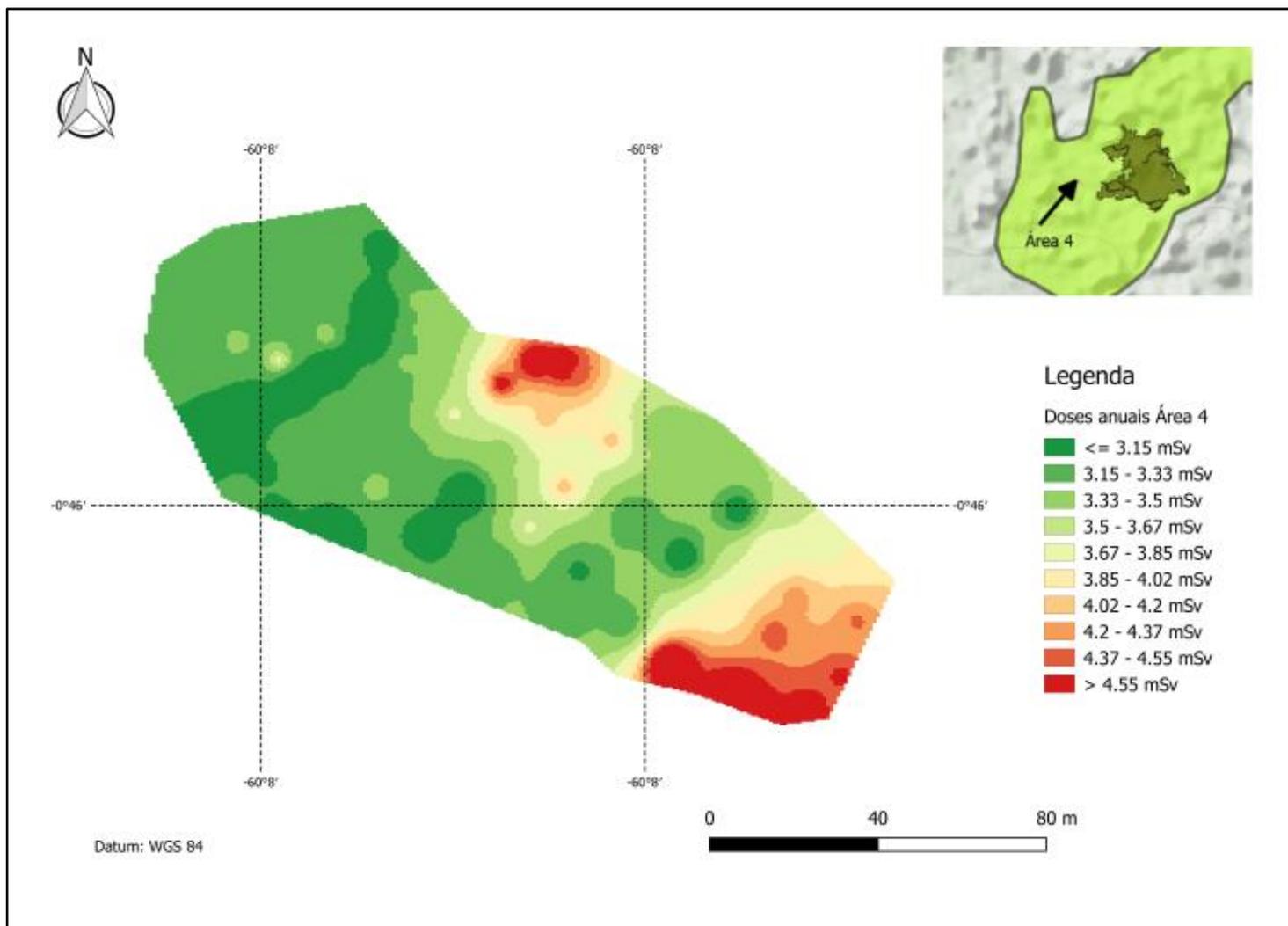


Figura 4. 35 – Doses anuais relativas a radiação gama na Área 5.

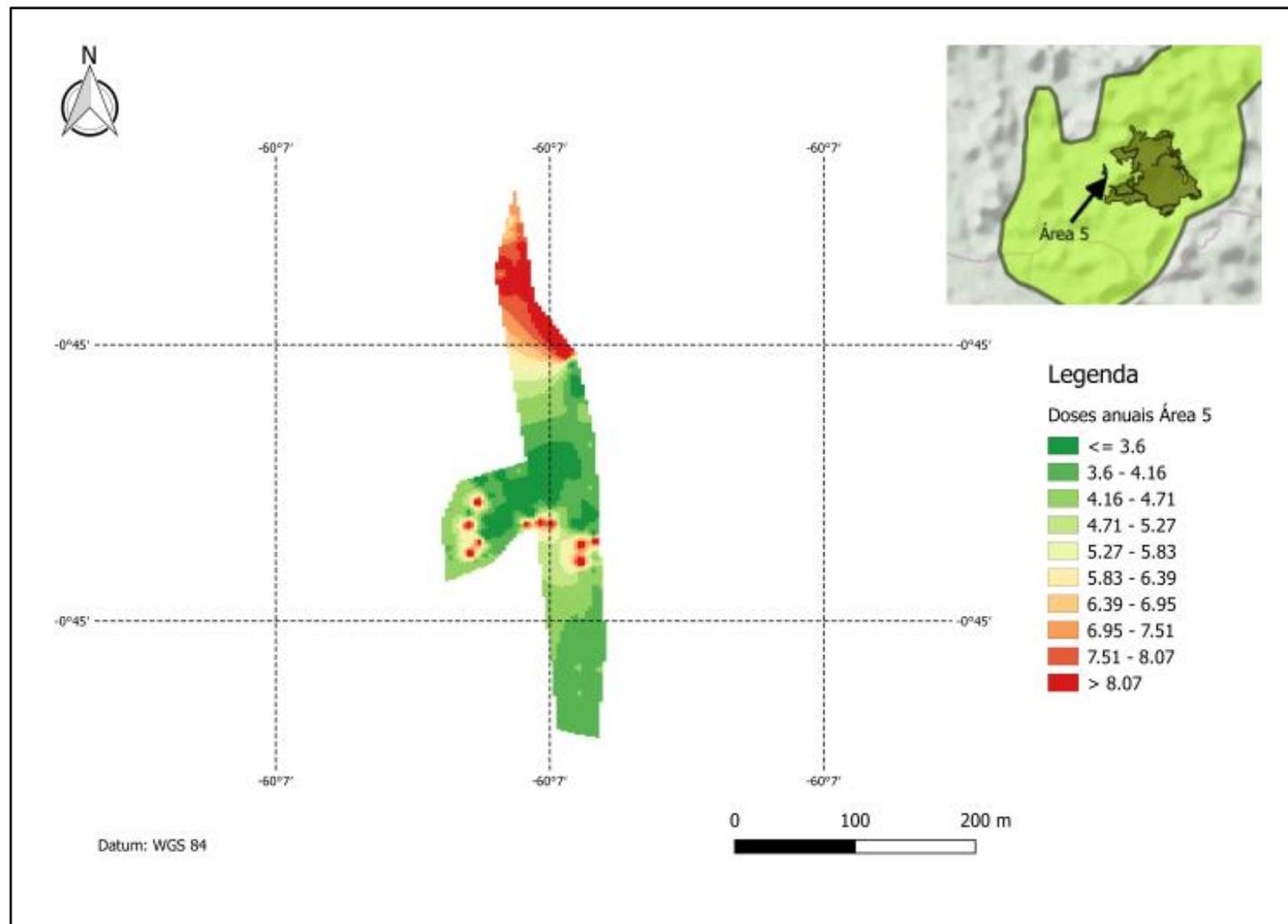


Figura 4.36 – Doses anuais relativas a radiação gama na Área 6.

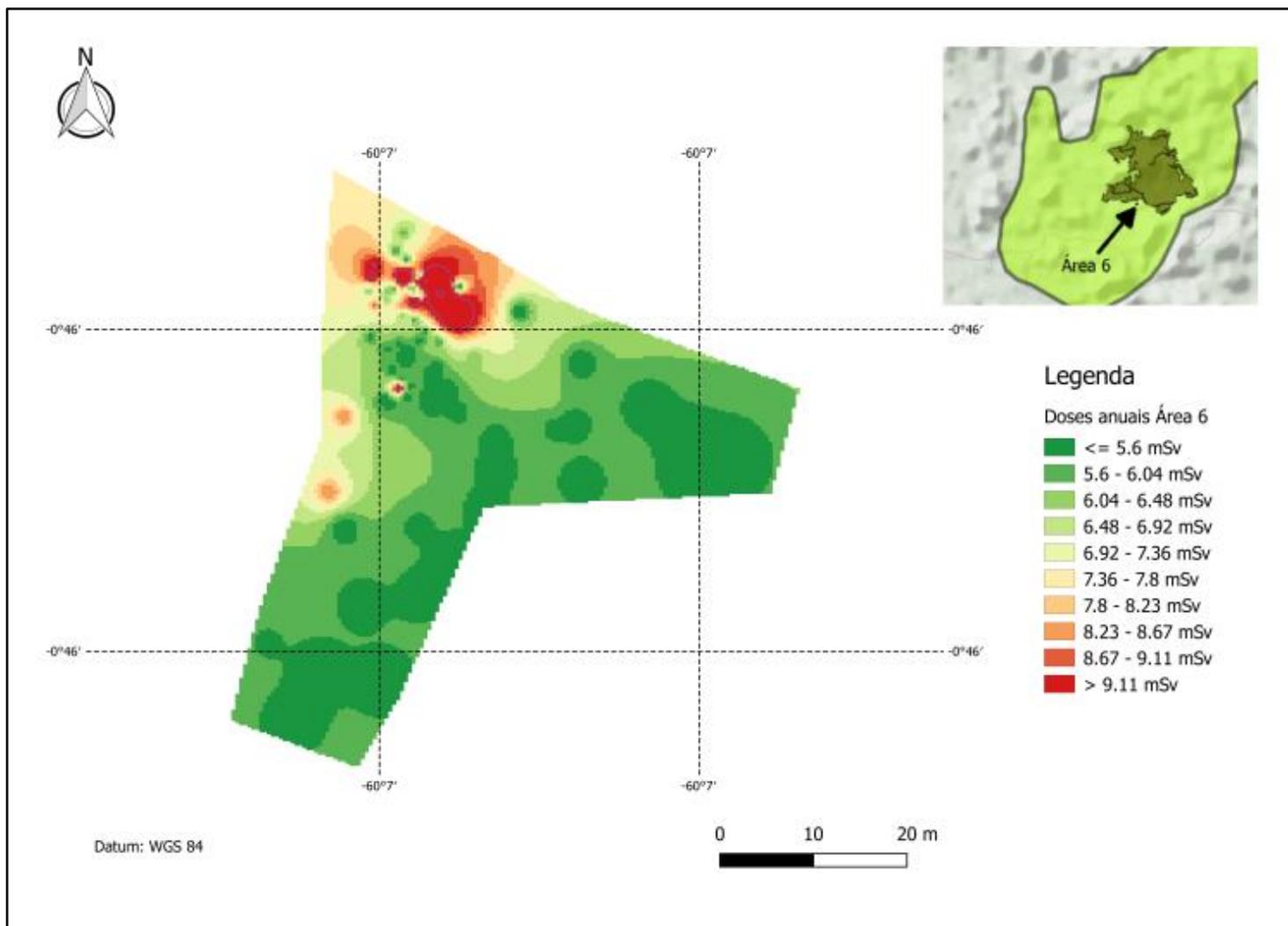


Figura 4. 37 – Doses anuais relativas a radiação gama na Área 7.

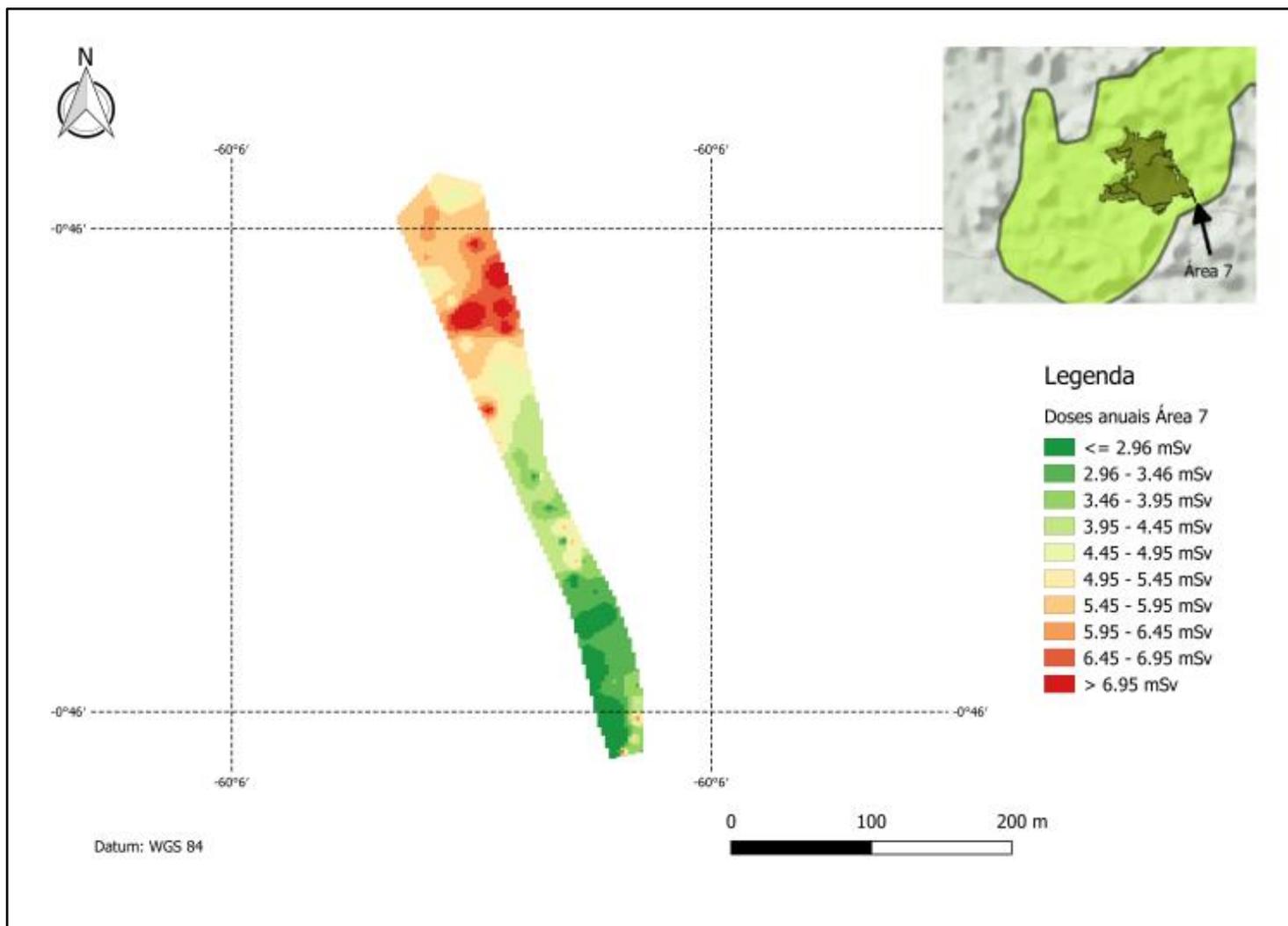


Figura 4. 38 – Doses anuais relativas a radiação gama na Área 8.

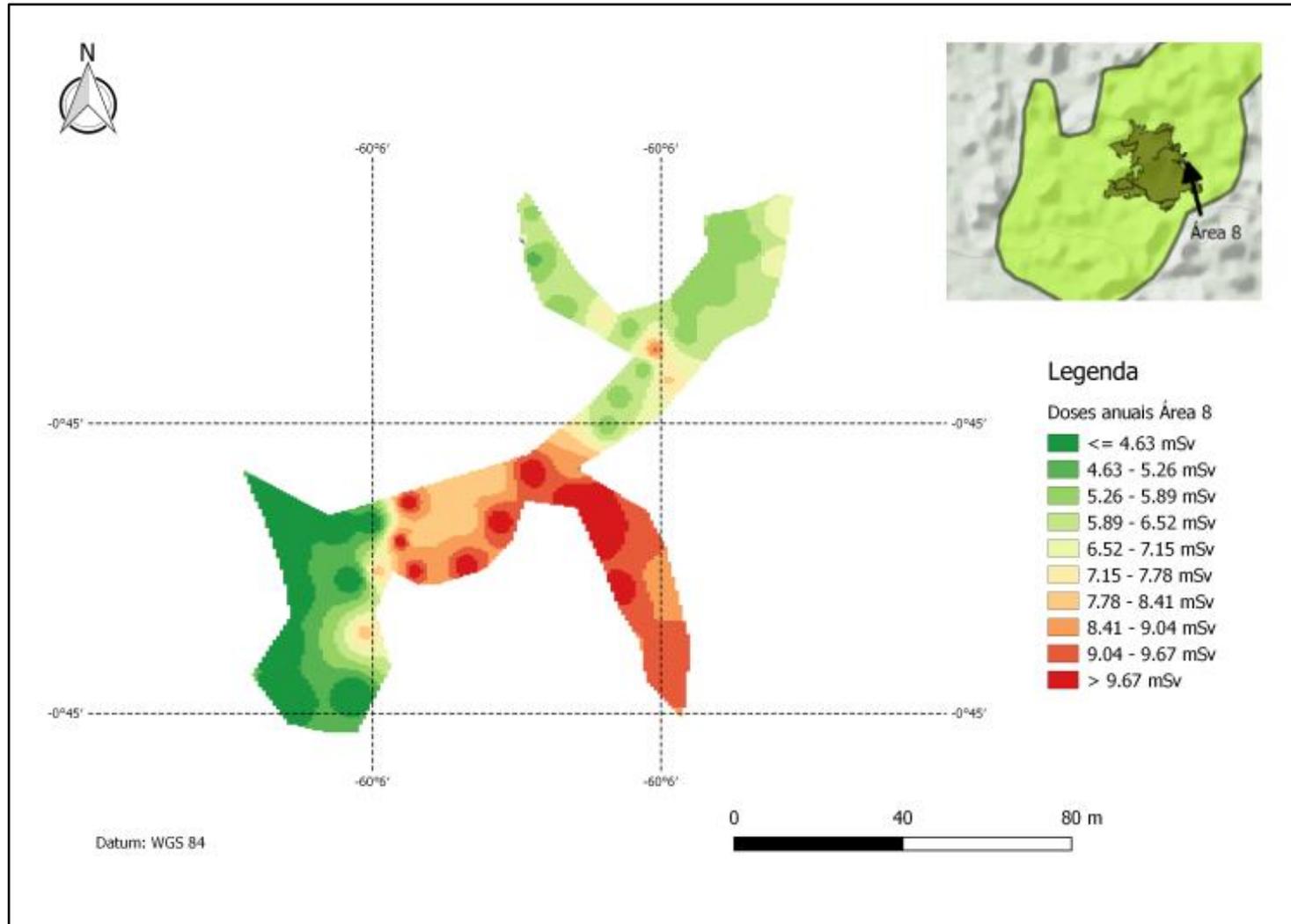


Figura 4. 39 – Doses anuais relativas a radiação gama na Área 9.

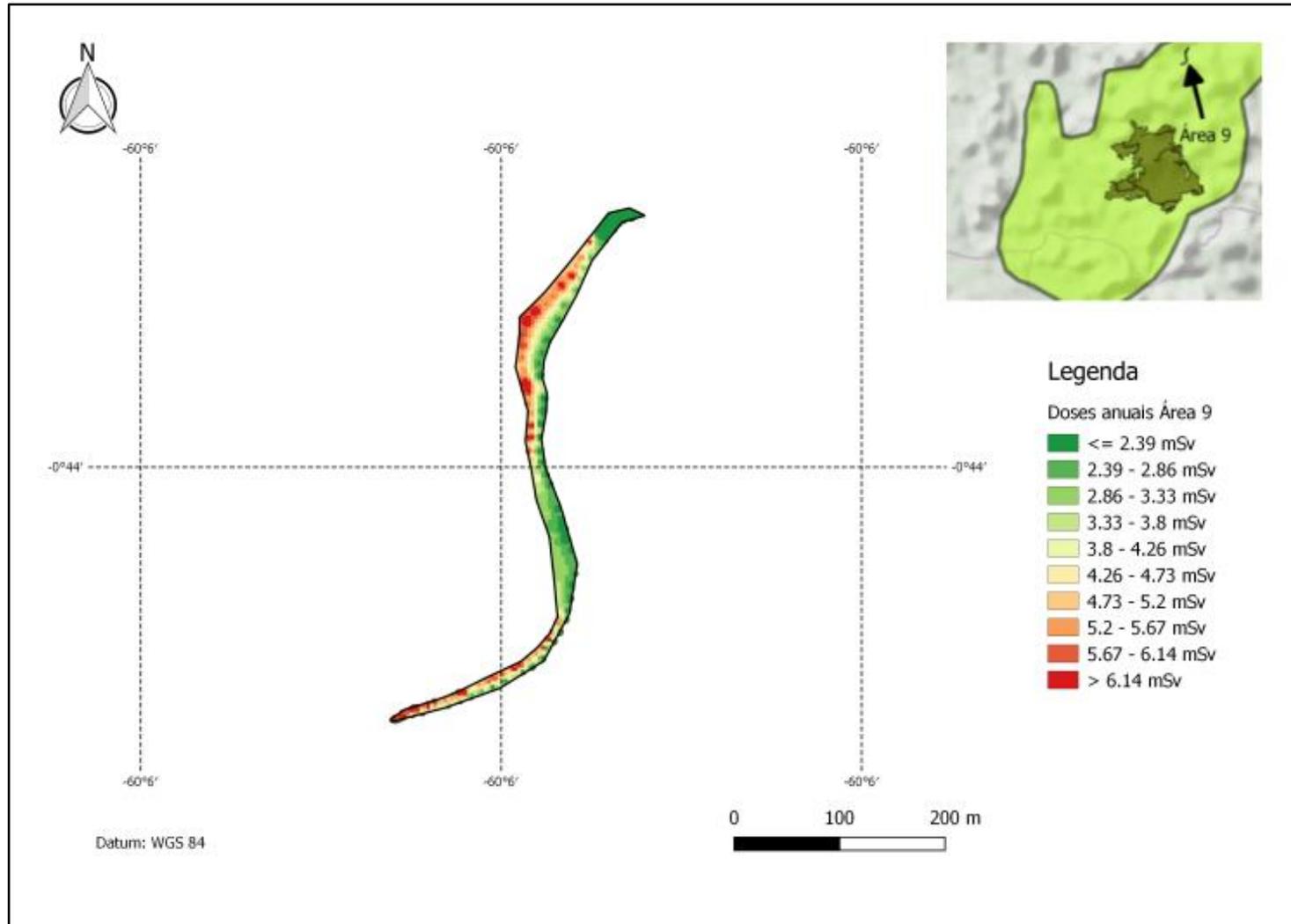


Figura 4. 40 – Doses anuais relativas a radiação gama na Área 10.

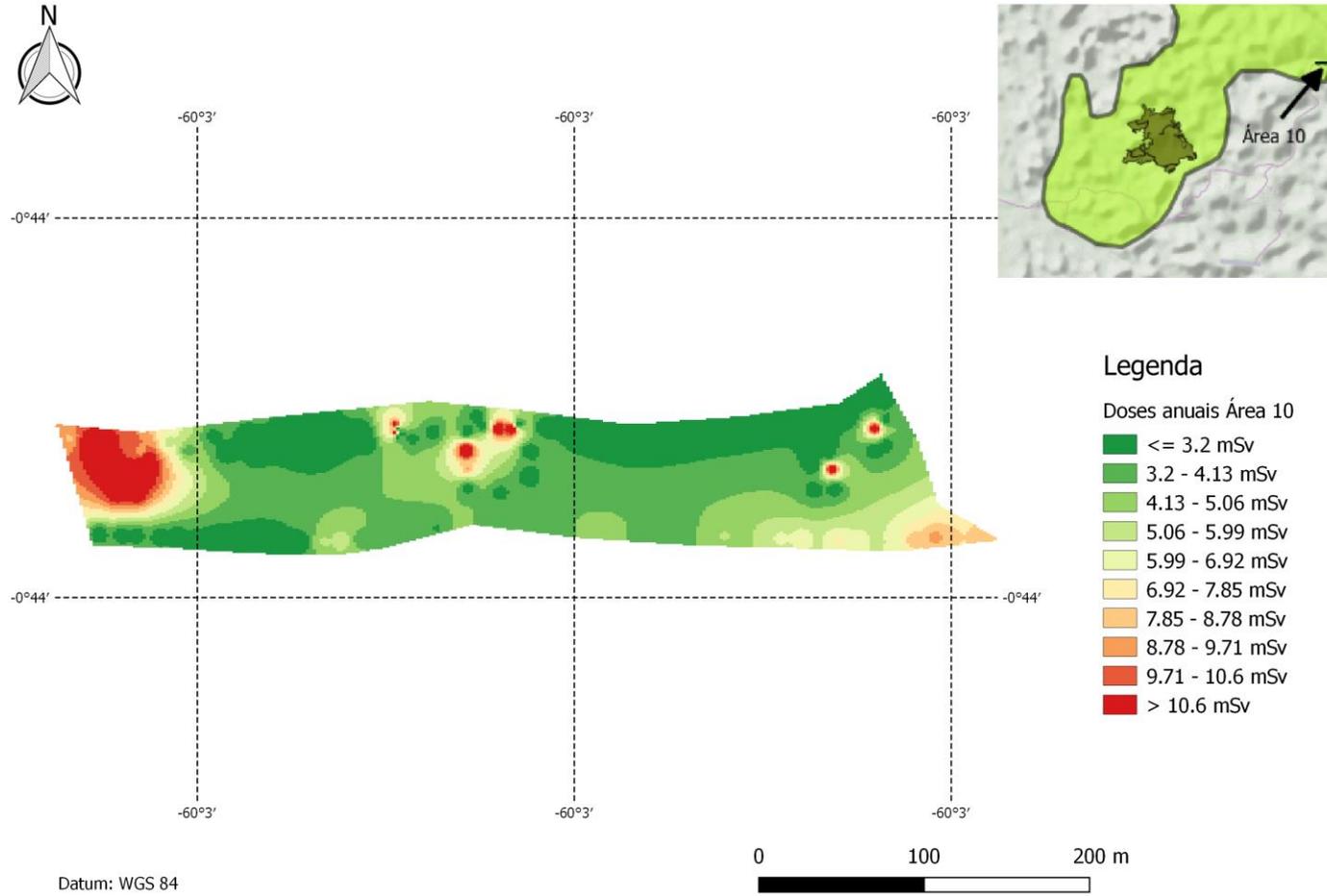


Figura 4.41 – Doses anuais relativas a radiação gama na Área 11.

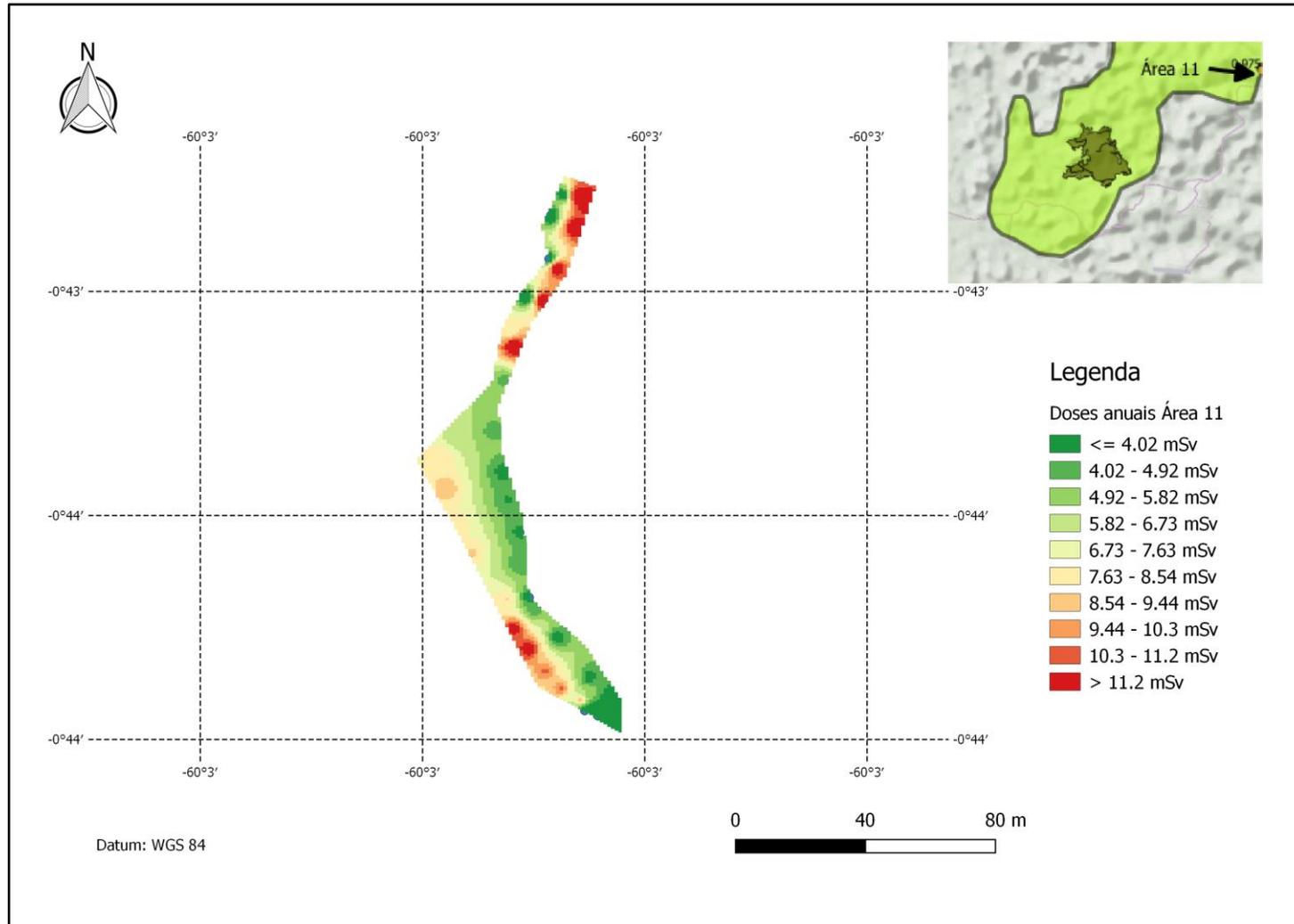


Figura 4.42 – Doses anuais relativas a radiação gama na Área 12.

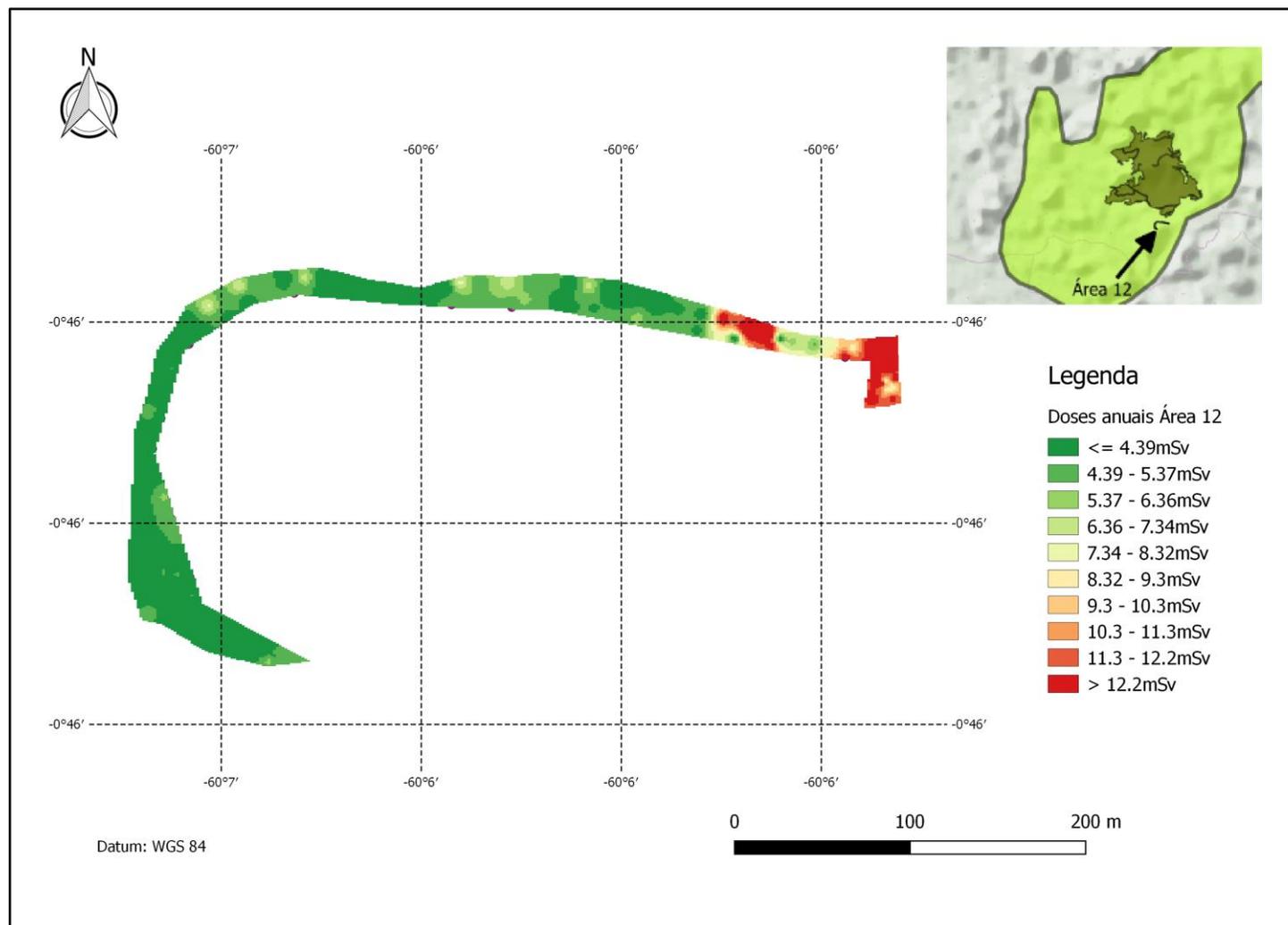


Figura 4.43 – Doses anuais relativas a radiação gama na Área 13.

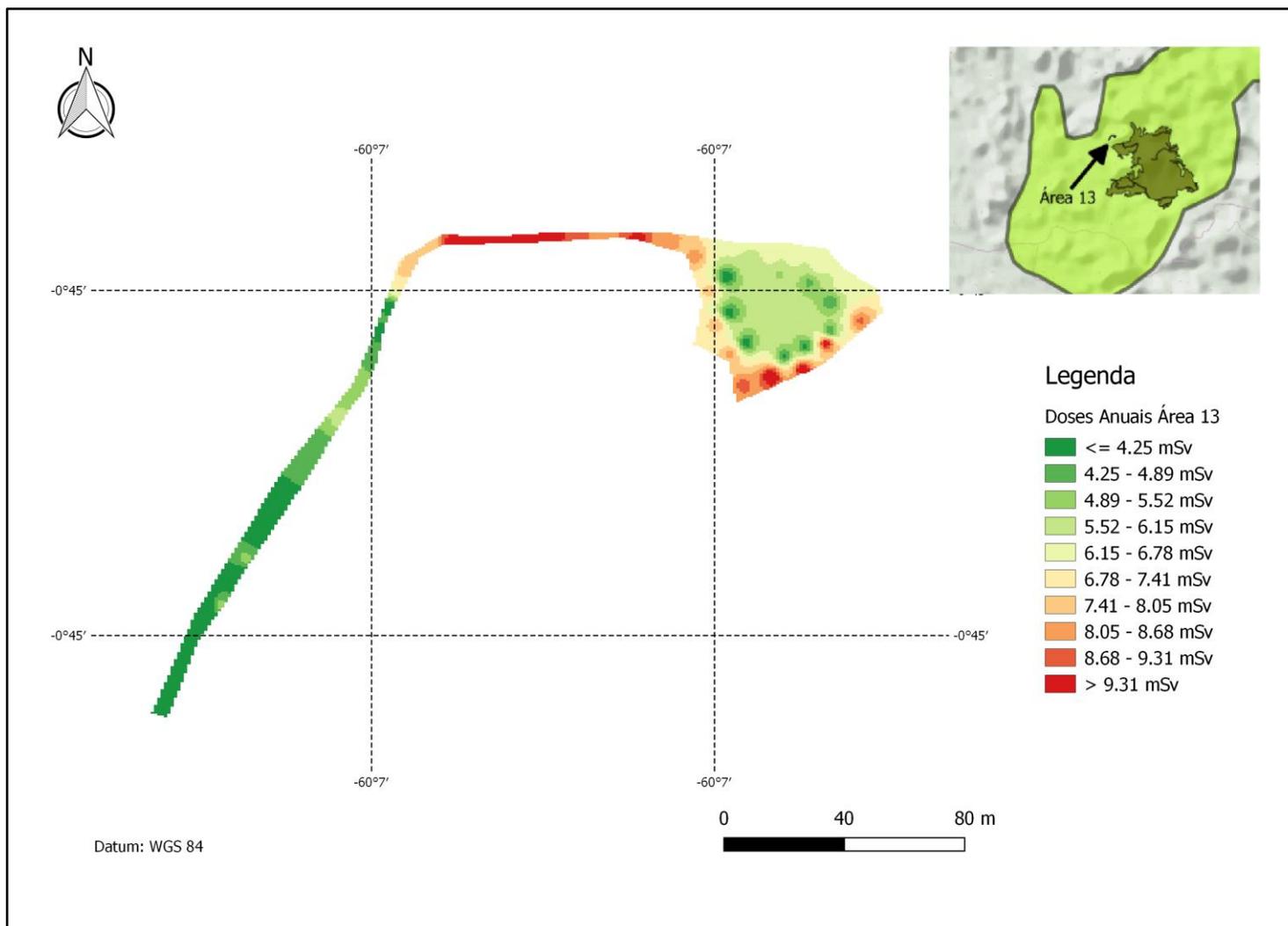


Figura 4. 44 – Doses anuais relativas a radiação gama na Área 14.

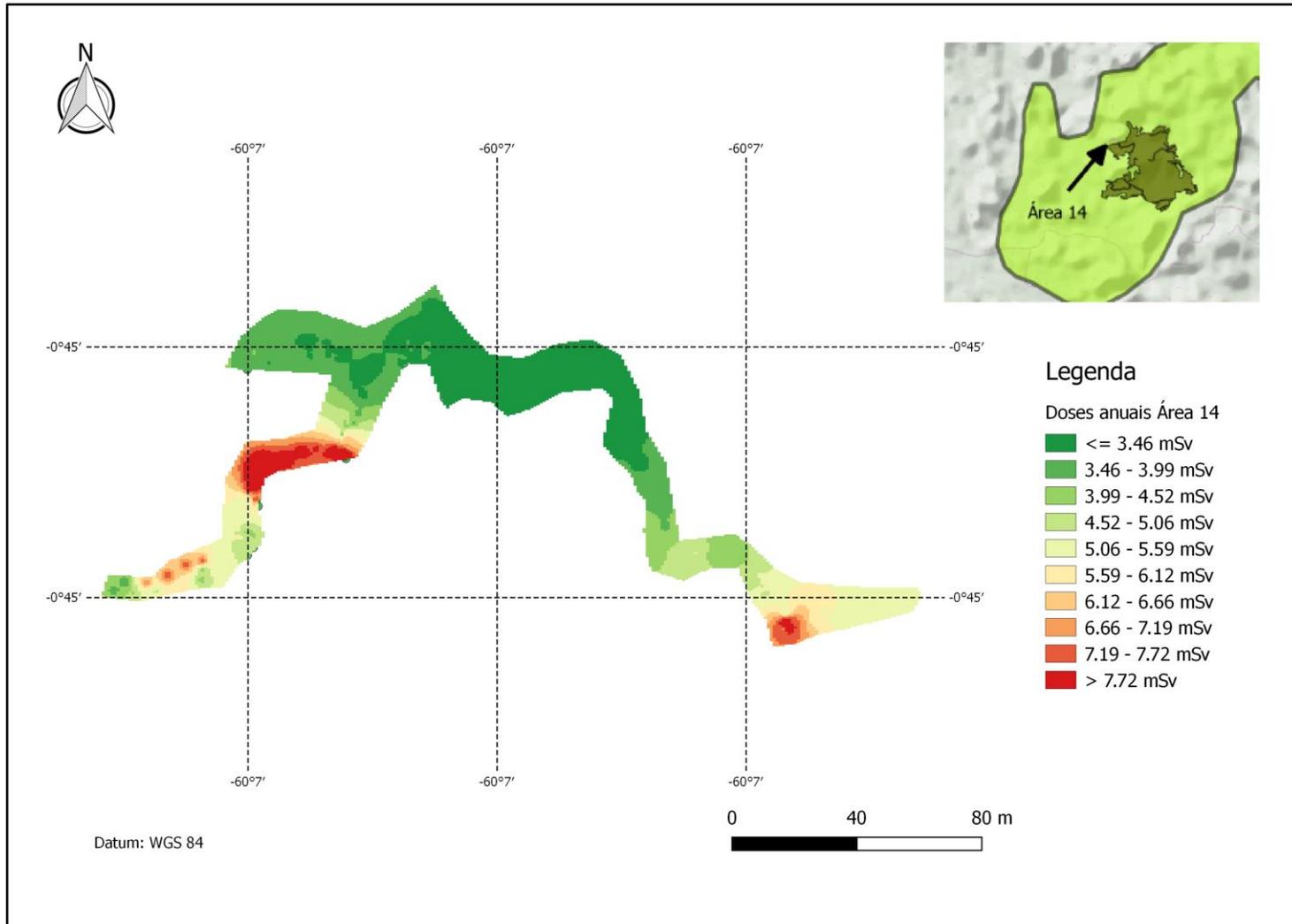
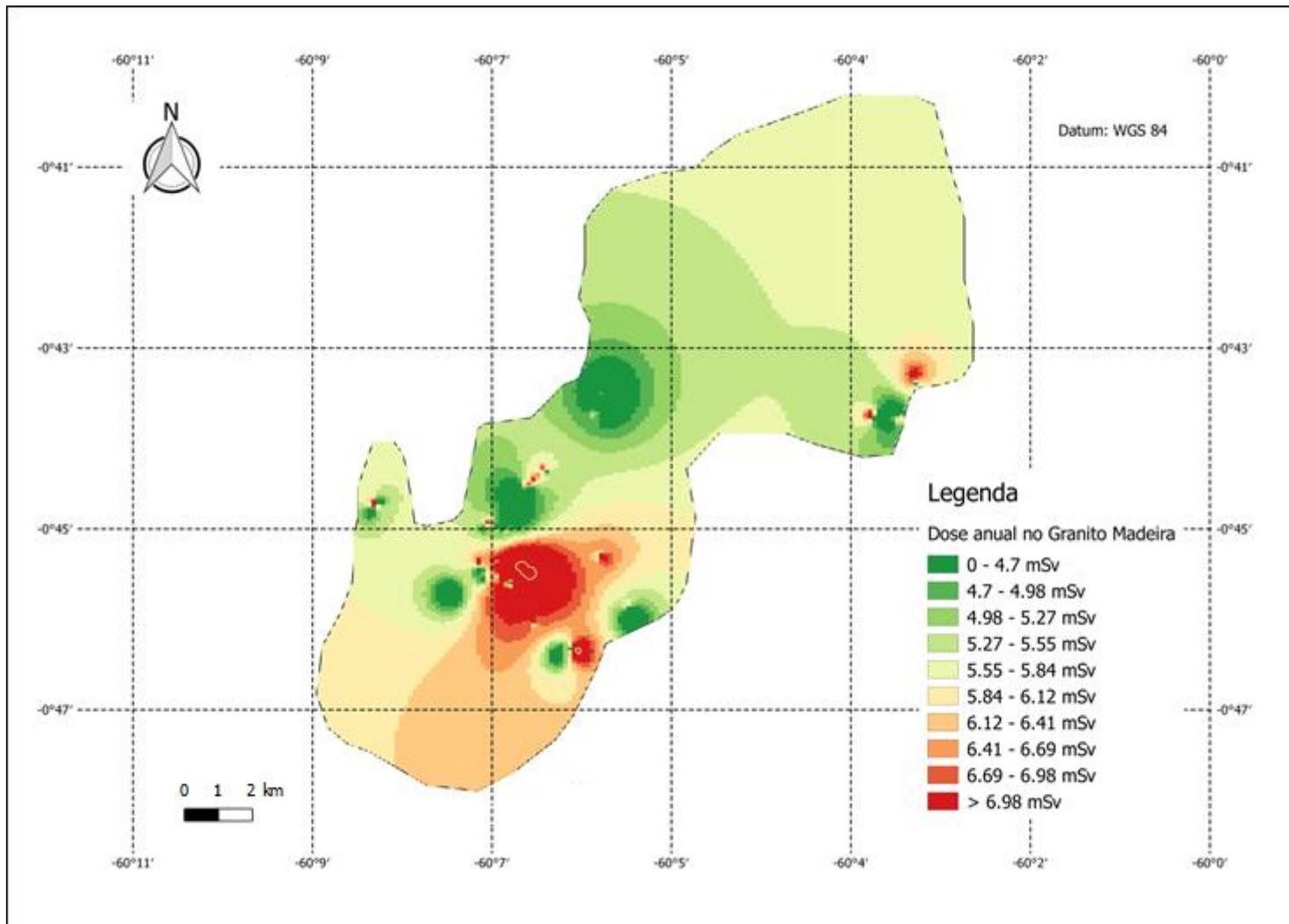


Figura 4. 45 – Doses anuais relativas a radiação gama no Granito Madeira – consolidação dos dados



4.1.2 Comparação da dose anual deste estudo com o de outros autores

Comparando este estudo com o de outros autores, conforme a Tabela 4.4, nota-se que a média das doses anuais no Granito Madeira é superior a média mundial e a de outros locais com material NORM. Isto ocorre mesmo considerado as menores doses anuais estimadas, como a da Área 7: $1,5 \text{ mSv.ano}^{-1}$. Assim o Granito Madeira é uma anomalia radiológica muito significativa.

Tabela 4. 4 – Comparação das doses anuais deste trabalho com outras da literatura.

Local	Dose anual (mSv)	Detector	Autor
Média mundial	0,48	-	UNSCEAR
Águas da Prata-SP	0,65	Iodeto de sódio	SACHETT, 2002
Poços de Caldas-MG	0,89	Iodeto de sódio	SACHETT, 2002
Andradas-MG	0,61	Iodeto de sódio	SACHETT, 2002
Caldas-MG	0,80	Iodeto de sódio	SACHETT, 2002
Guarapari-ES	0,73	Iodeto de sódio	SACHETT, 2002
Poços de Caldas-MG	0,95	Cintilador plástico	SILVA, et al, 2009
Ribeirão Preto	0,03	Cintilador plástico	CAVALCANTI, 2012
Granito Madeira-AM*	$6,0 \pm 3,0$	Iodeto de Sódio	Este trabalho
Granito Madeira-AM**	4,1	Iodeto de Sódio	Este trabalho
Granito Madeira-AM***	1,5	Iodeto de Sódio	Este trabalho

*Média anual.

**Classe das doses mais frequentes (44%).

*** Menor dose anual registrada – Área 7.

Fonte: Adaptado de UNSCEAR, 2010; SACHETT, 2002; SILVA, et al, 2009 e CAVALCANTI, 2012.

5 CONCLUSÕES

Foram feitas medidas de taxa de equivalente de dose ambiental em 14 áreas do Granito Madeira, norte do Amazonas com o objetivo de mapear e avaliar a radiação natural de fundo, ou seja, o *background* da região. Os resultados obtidos foram comparados com o de outros autores. Para tanto utilizou-se de um detector cintilador de iodeto de sódio.

Em relação às áreas selecionadas para a monitoração, pode-se afirmar que, apesar de pequenas em relação à superfície do granito como um todo, constituem um amostragem significativa, pois contemplam cenários próximos daqueles onde ocorreu exploração no passado; onde irá ocorrer exploração (área de sondagem); próximo onde ocorre exploração e onde não ocorreu exploração.

Foram coletadas cerca de 30.000 medidas de taxa de dose com o sistema AT6101C. Estas informações foram classificadas, tratadas e georeferenciadas pelos *softwares* listados na Tabela 3.2. Posteriormente, estes dados foram utilizados para a confecção de mapas com a localização das taxas de dose e para interpolação com o objetivo de obter a representação geográfica da dose anual relativa à radiação gama.

O mapeamento das taxas de dose indicou que próximo a Rocha Sã encontram-se as maiores leituras. Isso já era previsto devido principalmente a maior riqueza dos minerais de interesse neste local e, em segundo plano, devido à atividade de mineração. Em consequência a estes fatos nestas áreas foram interpoladas as maiores taxas e doses anuais relativas à radiação gama. No caso da Área 1, por exemplo, obteve-se taxas de equivalente de dose ambiental com picos de $3,71 \text{ uSv.h}^{-1}$ e doses anuais acima e $6,0 \text{ mSv}$.

Mesmo nos locais de menor média, como é o caso das áreas 4 e 9, com taxas de equivalente de dose ambiental iguais a $0,4 \text{ uSv.h}^{-1}$ e dose anual de $3,0 \text{ mSv.ano}^{-1}$, o valor é ainda muito superior a media mundial. Este é um indicativo claro de que o Granito Madeira é uma anomalia radiológica.

Observou-se que existem algumas áreas no Granito Madeira onde houve alteração da radiação natural de fundo, de acordo com os histogramas de frequências de taxas de equivalente dose ambiental. No caso das áreas de sondagem (Área 8 e Área 11), existe a possibilidade de contaminação do local com minerais devido a atividade da instalação que

explora o granito. Chama a atenção que esta “contaminação” se deu por minerais que aumentaram as frequências das taxas de dose de menor valor. Outros locais, como a Área 6 e a Área 7, onde não houve ação antrópica, ocorreu a concentração de taxa de dose em uma classe específica. Já a Área 13, teve comportamento similar ao de locais com possibilidade de contaminação, apesar de ser área sem ação antrópica.

Em relação a comparação com outros autores, observa-se que houve uma diferença muito significativa nos valores obtidos neste trabalho mesmo quando comparados com localidades onde existe a presença de material NORM, como é o caso de Caldas e Guarapari. Este fato é devido às diferenças intrínsecas dos equipamentos utilizados (detectores cintiladores, TLD, etc.), das metodologias utilizadas (“monitoração a pé”, em veículo, aérea), da composição das rochas no subsolo dentre outras.

Os resultados obtidos neste trabalho, apesar de superiores a média mundial, devem ser considerados pela empresa que realiza a exploração mineral do Granito Madeira como um limite de dose a ser atingido na fase pós descomissionamento, já que se trata da radiação natural de fundo (*background*) da região. A metodologia de mapeamento de taxas de dose e interpolação de resultados usadas neste estudo deverá ser aproveitada por outras instalações NORM como procedimento de obtenção de *background* radioativo.

Este estudo pode ser ponto de partida para outros mais amplos, tais como:

I) Monitorar a concentração de radônio no Granito Madeira e cruzar com as informações das áreas monitoradas para uma estimativa da dose efetiva.

II) Analisar matrizes, tais como ar, solo, sedimentos e água superficial do Granito Madeira para avaliação do impacto ambiental, em especial nas áreas com suspeita de alteração da radioatividade natural de fundo.

III) Mapear a radiação natural de fundo de mais áreas do granito, relacionar os dados de composição das rochas com as taxas de dose e elaborar um planejamento para a extração de minérios de interesse associados ao urânio e tório ou a própria mineração destes.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 1001: Medidores e monitores portáteis: taxa de exposição de raios X e para uso em radioproteção.** Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10520: Informação e documentação – Citações em documentos – Apresentação.** Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10719: Informação e documentação — Relatório técnico e/ou científico — Apresentação.** Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6023: Informação e documentação - Referências – Elaboração.** Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6024: Informação e documentação - Numeração progressiva das seções de um documento escrito – Apresentação.** Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6027: Informação e documentação - Sumário – Apresentação.** Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ALVES, S.F. **Utilização do Modelo de Dispersão ARTM Associado a Recursos de Geoprocessamento para Simulação do Impacto Ambiental Radiológico de Emissores Atmosféricos de um Reator de Pesquisa.** 2013. 178f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais) – CDTN/CNEN, Belo Horizonte, 2013.

ARAMBURU, X. O.; BISBAL, J. J. **Radiaciones Ionizantes – Utilización y riesgos.** Barcelona: Edicions UPC, 1994.

ATOMTEX, Scientific and Production Enterprise. **Atas Scanner Mobile – Software User’s Manual**. Minsk: ATOMTEX, 2010.

ATOMTEX, Scientific and Production Enterprise. **Calibration Certificate s/n 10101**. Minsk: ATOMTEX, 2011.

ATOMTEX, Scientific and Production Enterprise. **GARM Program – Software User’s Manual**. Minsk: ATOMTEX, 2010.

ATOMTEX, Scientific and Production Enterprise. **Spectrometer AT6101C – Spectral Radiation Scanner – User Manual**. Minsk: ATOMTEX, 2010.

BARBOSA, S. J. **Estudo das características funcionais de um sistema de espectrometria gama a cristal de NaI(Tl)**. 1993. 36f. Monografia (XV Curso de Introdução à Engenharia Nuclear). Recife: UFPE, 1993.

BARRETO, C.J.S.; LAFON, J. M.; COSTA, L. R.; LIMA, E. V. Vulcanismo félsico paleoproterozoico do Grupo Iricoumé, Domínio Erepecuru-Trombetas, Província Amazônia Central: dados de campo, caracterização petrográfica e geocronologia Pb-Pb em zircão. In: **Geologia USP, Série Científica**. Março de 2013, p. 47-72.

BARRETO, P. M. C.; AUSTERLITZ, C.; MALHEIROS, T.; LOVBORG, L. **Radioactive concrete sources for calibration of uranium exploration and environmental fields instruments constructed at IRD/CNEN, Brazil**. Rio de Janeiro: IRD, 1986.

CARNEIRO, JANETE C.G.G. ; BETTI, FLAVIO; SANCHES, MATIAS P. ; SORDI, GIAN M.A.A.; PECEQUILO, BRIGITTE R.S. **Contribution of Natural Background Radiation to Annual Effective Dose in Different Areas of Sao Paulo City**. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL RADIATION PROTECTION ASSOCIATION, October 19-24, 2008, Buenos Aires, Argentina.

CAVALCANTI, F. **Avaliação das Doses Efetivas e Efetivas Coletivas da Radiação Natural da Região de Ribeirão Preto (SP)**. 2012. 85f. Dissertação (Mestrado em Física Aplicada à Medicina e Biologia). São Paulo: USP, 2012.

CAVALCANTI, F., SILVA, N. C.; ALMEIDA, A. Effective dose rate evaluation from natural gamma radiation in the region of Ribeirão Preto, SP-Brasil. In: **Radioprotection**, vol 46, nº 6, 2011, s145-s150. EDP Sciences.

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Glossário de Segurança Nuclear**. Rio de Janeiro: CNEN, 2015. Disponível em <http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/glossario.pdf>. Acesso em 01/02/2016.

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Norma-NE CNEN-NN 5.01 Transporte de Material Radioativo**. Rio de Janeiro: CNEN, 1988. Disponível em <http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm501.pdf>. Acesso em 01/04/2016.

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Posição Regulatória PR3.01:002 – Fatores de Ponderação para Grandezas de Proteção Radiológica. Norma CNEN-NN 3.01 - Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica**. Rio de Janeiro: CNEN, 2011. Disponível em http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/pr301_02.pdf.

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Resolução 164/2014: Norma CNEN-NN 3.01 - Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica**. Rio de Janeiro: CNEN, 2014. Disponível em <http://www.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm301.pdf>. Acesso em 02/02/2015.

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Resolução Resolução 028/04: Norma CNEN-NN 4.01 – Requisitos de Segurança e Proteção Radiológica para Instalações Mínero-Industriais**. Rio de Janeiro: CNEN, 2014. Disponível em <http://www.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm401.pdf>. Acesso em 02/02/2015.

CONTI, C. C. **Método de espectrometria gama in situ para determinação de dose gama ambiental**. 1995. 93 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Nuclear). Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia (IME), 1995.

COSTA, C. F. M. **Evolução Geológica da Região de Pitinga (Amazonas) e suas Implicações na Gênese da Mineralização de Sn-Nb-Ta-F (Y-ETR-Li) Associada ao Granito Madeira**. 2010. 133f. Tese (Doutorado em Geologia): Porto Alegre: UFRGS, 2010.

COSTI, H. T.; BORGES, R. M. K.; DALL'AGNOLL, R.,. Depósitos de Estanho da Mina Pitinga, Estado Amazonas. In: **Caracterização de Depósitos Minerai s em Distritos Mineiros da Amazônia**. Brasília, 2005, p. 391-476. Disponível em: http://www.adimb.com.br/site/publicacoes_amazonia/informacoeseditoriais.php. Acesso em 20/07/2015.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil. **Geologia e Recursos Minerai s do Estado do Amazonas**. Manaus: CPRM, 2006.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil. **Rochas Vulcânicas da Área do Projeto Uatumã-Abonari (Bloco I) - Relatório de Supervisão Técnica**. Rio de Janeiro: CPRM, 2009.

DIAS, D. C. D.; SILVA, N. C. **A Importância Do Geoprocessamento Nas Monitorações Radiométricas**. Laboratório de Poços de Caldas - LAPOC. Poços de Caldas: LAPOC, 2010, p. 205-6.

DICKSON , B. L. & SCOTT , K. M. Interpretation of aerial gamma-ray surveys - adding the geochemical factors. **AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics**, 1997, pp. 187-200.

FUCK, R., Pimentel M. M.; Machado, N.; Daoud, W. E.-K. Idade U-Pb do Granito Madeira, Pitinga (AM). **4ª CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA**, 1993, pp. 246-249.

IAEA - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Intercompasion of Measurements of Personal Dose Equivalent Hp(10) in Photon Field in the West Asia Region – IAEA-TECDOC-CD-1567.** Viena: IAEA, 2007.

IAEA – International Atomic Energy Agency. **Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards.** Viena: IAEA, 2014. Disponível em <http://www-ns.iaea.org/standards/> acesso em 02/11/2016.

IAEA - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material 2012 Edition - Specific Safety Requirements No. SSR-6.** Viena: IAEA, 2012.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Normas de Apresentação Tabular.** Rio de Janeiro: IBGE, 1993, 3ª edição.

ICRP, International Commission on Radiological Protection. **1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection - ICRP Publication 60.** Viena: ICRP, 1991, Pergamon Press.

ICRU 1958 – INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS (ICRU). **Report 39 – Determination of Dose Equivalents Resulting Form External Radiactions Sources.** Bethesda: ICRU, 1985.

IUPAC - INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY. **Atomic Weights Of The Elements: Review 2000 (IUPAC Technical Report).** Genebra: IUPAC, 2003.

IUPAC - INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY. **Glossary of Terms in Quantities and Units in Clinical Chemistry.** Genebra: IUPAC, 1996.

MARTIN, J. E. **Physics for Radiation Protection.** Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, 2006.

MENOR, E. N. **Mapeamento Gravimétrico e Cintilométrico da Bacia da Paraíba entre as Latitudes de Pitumbu e Ponta do Funil (Porção Ocidental)**. 2006. 56f. Monografia (Graduação em Geologia). Recife: UFPE, 2006.

MINAS GERAIS – SECRETARIA DE ESTADO DA SAÚDE. **Projeto Planalto de Poços de Caldas. Pesquisa câncer e radiação natural: Minas Gerais**. Belo Horizonte: SESMG 2009.

MOURA, V.; PEREIRA, C.; Martins, A. K. Equação para determinação da atividade específica de minérios e concentrados em equilíbrio secular. In: **VIII Congresso NORM, 2016, Rio de Janeiro, Anais...** Rio de Janeiro: IRD, 2016, disponível em <http://normviii.ird.gov.br/>.

MRA – MRA Comércio de Instrumentos Eletrônicos LTDA – Centro de Ensaios e Pesquisas em Metrologia. **Certificado de Calibração 16-0451**. Ribeirão Preto: MRA, 2016.

NASCIMENTO, L.S. **Análise de Dados de Espectrometria-Gama Aérea e de Sensoriamento Remoto do Estado do Rio de Janeiro por Redes Neurais Artificiais. Aplicação ao Mapeamento Geológico Digital**. 2003. 138f. Dissertação (Mestrado em Geofísica). Rio de Janeiro: Observatório Nacional, 2003.

NETO, A. C. B.; PEREIRA, V. P.; LIMA, E. F.; FORRON, J. M.; MINUZZI, O.; PRADO, M.; RONCHI, L. H.; FLORES, J.; FRANTZ, J. C.; PIRES, A.; PIEROSAN, R.; HOFF, R.; BOTELHO, N. F.; ROLIM, S. B.; ROCHA, F.; ULMANN, L. A Jazida de Criolita da Mina Pitinga (Amazonas). In: **Caracterização de Depósitos Minerai s em Distritos Mineiros da Amazônia**. Brasília: ADIMP, 2005, pp. 477-552. Disponível em: http://www.adimb.com.br/publicacoes_amazonia/Indice/Cap_VIII.pdf. Acesso: em 20/08/2015.

OLIVEIRA, G. J. **O drone como fator adicional de risco decorrente de condições não previstas na segurança radiológica de grandes eventos**. 2015. 69 f. Monografia (Especialização - Programa de Pós- Graduação em Proteção Radiológica e Segurança de Fontes Radioativas). Rio de Janeiro: IRD, 2015.

OLIVEIRA, J. de. **Determinação dos Níveis de Radioatividade Natural em Águas Utilizadas para Abastecimento Público no Estado de São Paulo**. 1988. 47f. Tese (Doutorado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Aplicações). São Paulo: IPEN, 1988.

PERNA, A. F. N. et al. **Caracterização da Radioatividade Natural de Materiais Utilizados na Construção Civil da Região Metropolitana de Curitiba**. 2011 International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2011, 2011. Belo Horizonte.

PETTA, R.A.; CAMPOS, T.F.C. Estimativa da Radioatividade Regional nas Instalações Petrolíferas e Industriais do Canto do Amaro (RN). **Revista de Geologia**, Vol. 26, nº 2, 35-44, 2013. Disponível em www.revistadegeologia.ufc.br acesso em 25/02/2016 às 14h.

PETTA, R.A.; CAMPOS, T.F.C; NASCIMENTO, P.S.R. Geoprocessamento no monitoramento da radioatividade natural das instalações de petróleo do Canto do Amaro (RN). **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE.

PIRES, A. C. et al. A xenotima do albita granito Madeira (mina Pitinga, AM): variações composicionais e mecanismos de incorporação do F e ETRP. In: **XIII Congresso Brasileiro de Geoquímica dos Países do Mercosul**. 9 a 14 de outubro de 2011, Gramado-RS.

PRADO, M. **O Granito Europa e o Grupo Iricoumé na Parte Leste do Distrito Mineiro de Pitinga (Amazonas)**. 2006. 133f. Dissertação (Mestrado em Geologia): Porto Alegre: UFRGS, 2006.

PRESS, F.; SIEVER R.; GROTZINGER J.; JORDAN T.H. **Para entender a Terra**. Porto Alegre: Bookman, 2006.

QGIS PROJECT. **QGIS User Guide Release 1.8**. 2014. Disponível em <http://docs.qgis.org/1.8/pdf/QGIS-1.8-UserGuide-en.pdf> - acesso em 22/04/2016.

SACHETT, I.A. **Caracterização da Radiação Gama Ambiental em Áreas Urbanas utilizando uma Unidade Móvel de Rastreamento**. 2002. 180f. Tese (Doutorado). Rio de Janeiro: UERJ, 2002.

SAITO, K; PETOUSSI-HENSS, N.; ZANK, M. Calculation of the effective dose and its variation from environmental gamma ray sources. **Health physics**, v. 74, n 6, p. 698-706, jun. 1998.

SANTOS, E. F. S. **Espectrometria Gama Aérea da Província Uranífera de Lagoa Real (CAETITÉ, BA): Aspectos Geoambientais e Distribuição da Dose Absorvida no ar**. 2006. 130 f. Dissertação (Mestrado em Radioproteção e Dosimetria). Rio de Janeiro: IRD, 2006.

SANTOS, T. **Distribuição da Concentração de Radônio em Residências e Outras Construções da Região Metropolitana de Belo Horizonte – RMBH**. 2010. 147 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares). Belo Horizonte: UFMG, 2010.

SHULTIS, J. K. & FAW, R. E., **Fundamentals of Nuclear Science and Engineering**. Nova Iorque: Marcel Dekker, Inc. 2002.

SILVA, N. C.; MACACINI, J. F.; ALBERTI, H. L. C. **Geoprocessing as a technical tool for radiological assessment in the urban area of Poços de Caldas, MG**. 2009 International Nuclear Atlantic Conference – INAC 2009, 2009. Rio de Janeiro.

SILVA, R. M. da. **Introdução ao Geoprocessamento: conceitos, técnicas e aplicações**. Novo Hamburgo: Feevale, 2007.

SOUZA, E. M. Use of NaI(Tl) detectors for environmental gamma survey and gamma background radiation mapping of venues and other strategic locations for major public events. In: **VIII Congresso NORM, 2016, Rio de Janeiro, Anais...** Rio de Janeiro: IRD, 2016, disponível em <http://normviii.ird.gov.br/>.

SOUZA, E. M.; ROCHEDO, E. R. R.; CONTI, C. C. External dose rates in coastal urban environments in Brasil. In **X Congresso Regional Latino Americano IRPA de Protección y Seguridad Radiológica “ Radioprotección: Nuevos Desafios para um Mundo en Evolución”**. Buenos Aires, 12 a 17 de abril, 2015.

STOLNIK, D. **Caracterização da Xenotímia nas Fácies Pegmatítica do Albita Granito de Núcelo, Pitinga (AM)**. 2015. 67f. Monografia (Graduação em Geologia). Porto Alegre: UFRGS, 2015.

TURNER, J. E. **Atoms, Radiation, and Radiation Protection**. 3ª ed. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co., 2007.

UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Sources and Effects of Ionizing Radiation, report to the General Assembly with Scientific Annexes**. Nova Iorque: UNSCEAR, 2010.

VASCONCELOS, D. C.; REIS, P. A. L.; PEREIRA, C.; OLIVEIRA, A. H. de O.; SANTOS, T. O.; ROCHA, Z. Modelling Natural Radioactivity in Sand Beaches of Guarapari, Espírito Santo State, Brazil. **World Journal of Nuclear Science and Technology**, 2013, pp. 65-71, disponível em https://www.researchgate.net/publication/258816426_Modelling_Natural_Radioactivity_in_Sand_Beaches_of_Guarapari_Espirito_Santo_State_Brazil. Acesso em: 20/07/2015.

VEDANA, L. A. **Balanço Geoquímico de Massa entre as Fácies do Granito Madeira - Pitinga (AM)**. 2010. 95f. Dissertação (Mestrado em Geociências). Porto Alegre: UFRGS, 2010.

XAVIER, A. M.; GAIDANO, E.; MORO J. T.; HEILBRON, P. F. **Princípios Básicos de Segurança e Proteção Radiológica**. Porto Alegre, 2014, UFRGS. Disponível em http://www.cnen.gov.br/images/CIN/PDFs/Seguranca_Protecao_Radiologica.pdf. Acesso em 20/01/2016.

APÊNDICE I – GLOSSÁRIO

Neste glossário listam-se alguns conceitos e definições utilizados ao longo da dissertação.

Aluvião. É um depósito sedimentar formado por materiais tais como areia, cascalho e minerais mais ou menos soltos transportados por águas de rios. Desenvolve-se nas planícies de inundação, com lamias por extensas áreas, e em sopés de montanhas.

Atividade. Segundo CNEN, 2014, p. 4:

atividade (de uma quantidade de radionuclídeo em um determinado estado de energia em um instante de tempo) – grandeza definida por $A=dN/dt$, onde dN é o valor esperado do número de transições nucleares espontâneas daquele estado de energia no intervalo de tempo dt . A unidade no sistema internacional é o recíproco do segundo (s^{-1}), denominada becquerel (Bq).

Cassiterita. Mineral de estanho (SnO_2).

Columbita. é um mineral que consiste em óxido de nióbio, óxido de tântalo, ferro e manganês.

Datum. Em cartografia refere-se ao modelo matemático teórico da representação da superfície da Terra ao nível do mar. De uma forma muito simplificada, datum providencia o ponto de referência a partir do qual a representação gráfica dos paralelos e meridianos, e conseqüentemente do todo o resto que for desenhado no mapa. Como exemplo, citam-se o WGS84, utilizado neste trabalho.

Escudo ou escudo cristalino. É uma grande área de rochas ígneas e metamórficas que formam zonas tectonicamente estáveis.

Equilíbrio secular. Quando as atividades de todos os membros da cadeia de decaimento são iguais àquela do isótopo que encabeça a série tem-se o equilíbrio secular. Entretanto, essa condição só ocorre se o sistema tenha permanecido fechado, ou seja, não tenha havido trocas químicas e físicas com o meio externo, durante um longo período de tempo.

Fluorescência de raios-X. É uma técnica analítica não destrutiva capaz de identificar elementos através dos raios X característicos dos elementos que estão presentes em uma amostra particular.

Grupo Geológico. Rochas de origem comum pertencem a um mesmo grupo. Assim o Grupo Iricoumé, citado na dissertação, compreende rochas vulcânicas oriundas de um mesmo evento (BARRETO et al, 2013).

Granito intrusivo. Trata-se de rochas ígneas que se formaram pelo arrefecimento lento do magma, em geral a grandes profundidades e em grandes massas.

Interpolação do quadrado da distância. O método do inverso da potência das distâncias é um procedimento para estimativa ou interpolação determinista em recurso a um conjunto de dados separados, geralmente no espaço.

Levantamento radiométrico. O mesmo que monitoração.

Monitoração. Segundo CNEN, 2015, p. 38 monitoração é o:

acompanhamento, por meio de instrumentos e procedimentos operacionais, da presença e da atividade de radionuclídeos em pessoas, em um determinado compartimento de uma instalação ou em materiais específicos. Seu objetivo pode ser o controle da contaminação ou a avaliação da exposição à radiação, incluindo a interpretação dos resultados.

NORM. *Naturally Occurring Radioactive Material.* Materiais radioativos de ocorrência natural. Como exemplo citam-se alguns tipos de minerais tais como columbita, xenotímio, torita, etc.

Pré-Cambriano. Período geológico. Iniciou-se há cerca de 4 bilhões de anos, com a formação da crosta terrestre, e terminou há cerca de 542 milhões de anos.

Província. É uma entidade espacial com atributos geológicos comuns. A província uranífera de Lagoa Real em Caetité é um exemplo.

Série de decaimento. Séries radioativas correspondem ao conjunto de átomos que estão relacionados por sucessivos decaimentos.

Suite. É um arranjo de rochas sedimentares formadas pela deposição cronológica de camadas de rochas intrusivas ou metamórficas.

Taxa de dose. Dose por unidade de tempo.

Trato digestivo. É a parte da anatomia que possui relação com o processo da digestão.

Trato respiratório. É a parte da anatomia que possui relação com os processos da respiração.

WGS 84. É um tipo de datum.

APÊNDICE II – DETERMINAÇÃO DA ATIVIDADE ESPECÍFICA DA FONTE DE ZIRCONITA

A zirconita utilizada para produzir as fontes de aferição foi analisada por fluorescência de raios-X. Nos próximos parágrafos segue a dedução da equação utilizada para determinar sua atividade específica.

Inicialmente, seja a definição de atividade:

$$A = \lambda N = \left(\frac{\ln 2}{T_{1/2}} \right) \left(\frac{N_A}{M} \cdot m \right) \quad (\text{A.1})$$

onde λ é a constante de decaimento; N o número de partículas radioativas; $T_{1/2}$ é a meia-vida do radionuclídeo; N_A é o número de Avogadro; M é a massa atômica e m a massa do minério.

Dividindo-se os dois lados da equação pela massa m , obtém-se a atividade específica A_e .

$$A_e = \left(\frac{\ln 2}{T_{1/2}} \right) \left(\frac{N_A}{M} \right) \quad (\text{A.2})$$

No caso de minérios NORM, o material radioativo das substâncias sólidas naturais ou concentradas são os radionuclídeos das séries do urânio e do tório naturais. Assim podemos reescrever a equação 2 como:

$$A_e = \left(\frac{\ln 2}{T_{1/2-U}} \right) \left(\frac{N_A}{M_U} \right) + \left(\frac{\ln 2}{T_{1/2-Th}} \right) \left(\frac{N_A}{M_{Th}} \right) \quad (\text{A.3})$$

onde o índice U indica urânio e Th tório.

A abundância do isótopo 232 do tório na natureza é de 100%. Já o urânio possui 3 isótopos: U-238 com 99,274%; U-235 com 0,7204% e o U-234 com 0,0054% (IUPAC, 2003). Deste modo, a equação 3 deve ser reescrita levando-se em conta estes radionuclídeos. Assim:

$$A_e = \ln 2 \cdot N_A \cdot \left[\frac{0,992742}{(T_{1/2_U-238})(M_{U-238})} + \frac{0,007204}{(T_{1/2_U-235})(M_{U-235})} + \frac{0,0054}{(T_{1/2_U-234})(M_{U-234})} \right] + \left(\frac{\ln 2}{T_{1/2_Th-232}} \right) \left(\frac{N_A}{M_{Th-232}} \right) \quad (\text{A.4})$$

No caso de uma análise química por fluorescência de raios-X em que o resultado fornecido esteja em porcentagem de óxido, segue da A.4:

$$A_e = a_U A_{e_U} + a_{Th} A_{e_Th} \quad (\text{A.5})$$

onde A_{e_U} e A_{e_Th} são as atividades específicas do urânio e do tório respectivamente; a_U e a_{Th} são os teores medidos de óxidos de urânio e tório. Como estes são, em geral, apresentados como percentuais de dióxido de tório (ThO_2) e de octóxido de triurânio (U_3O_8) é necessário inserir dois fatores de correção relativos à composição das moléculas já que o oxigênio não é radioativo. Deste modo:

$$A_e = a_U A_{e_U} \left(\frac{3m_U}{3m_U + 8m_O} \right) + a_{Th} A_{e_Th} \left(\frac{m_{Th}}{m_{Th} + 2m_O} \right) \quad (\text{A.6})$$

onde m_U , m_{Th} e m_O são as massas do urânio, do tório e do oxigênio, respectivamente.

Estando o minério em equilíbrio secular, a atividade do pai da série de decaimento

será igual a atividade dos filhos da série. Assim, para o U-238² a atividade será multiplicada por 14; já para o Th-232³ a atividade será multiplicada por 10.

$$A_e = 14 \cdot \left[a_U A_{e-U} \left(\frac{3m_U}{3m_U + 8m_O} \right) \right] + 10 \cdot \left[a_{Th} A_{e-Th} \left(\frac{m_{Th}}{m_{Th} + 2m_O} \right) \right] \quad (\text{A.7})$$

Na tabela 2 seguem as constantes da A.7.

Tabela A.1 – Constantes da Equação A.7.

Massa (g.mol ⁻¹)	Meia vida (anos)	Abundância isotópica (%)
U-238	238,051	4,47E+09
U-235	235,044	7,04E+08
U-234	234,041	2,46E+05
Th-232	232,028	1,41E+10
Oxigênio	15,9949	-

Fonte: Adaptado de http://www.kayelaby.npl.co.uk/atomic_and_nuclear_physics/.

Inserindo os dados da Tabela A.1 e a constante de Avogadro dada por 6,0221x10²³g/mol (IUPAC, 1996) a Equação A.7 pode ser reescrita como:

$$A_e = 3.01 \times 10^5 a_U + 3.57 \times 10^4 a_{Th} \quad (\text{A.8})$$

² O U-238 foi escolhido, porque é mais abundante que o U-235 e pai do U-234.

³ Na cadeia do Th-232 existem 11 radionuclídeos. Consideram-se 10, porque o Bi-212 pode decair para ou para o Tl-208 com 36% de probabilidade, ou para o Po-212 com 64% de probabilidade [5].

A Equação A.8 representa a atividade específica de uma amostra de minério em função da análise química por fluorescência de raios-X.

Usando os dados da Tabela A.2 na Equação A.8 obtém-se a atividade específica da zirconita utilizada na fonte de aferição deste estudo:

$$A_e = 937,1 \text{ Bqg}^{-1}$$

Tabela A.2 – Resultado da análise química da zirconita utilizada nas fontes de aferição.

Óxido	Concentração (%)
ZrO ₂	58,003
U ₃ O ₈	0,211
ThO ₂	0,846

Fonte: Laboratório SGS.

APÊNDICE III – RESUMOS E TRABALHOS ACEITOS

Na Tabela A.3 seguem resumos e trabalhos aceitos que tiveram origem neste estudo.

Tabela A. 3 – Resumos e trabalhos desenvolvidos deste estudo.

Título	Evento	Cidade	Autores
Background Radioativo do Granito Madeira, Norte do Amazonas	III Sencir – 2016	Belo Horizonte	V. V. Moura C. Pereira A. K. Martins
Proteção Radiológica em Mineradoras NORM	III Sencir – 2016	Belo Horizonte	V. V. Moura C. Pereira A. K. Martins
Equation for determining the specific activity of ores and concentrates in secular equilibrium	VIII Congresso NORM	Rio de Janeiro	V. V. Moura C. Pereira A. K. Martins
Difficulties in Applying the Rules Specified the NORM Mining and Milling Industry in Brazil	VIII Congresso NORM	Rio de Janeiro	V. V. Moura C. Pereira A. K. Martins
Radioactive background of Granito Madeira, north Amazonas, Brazil	INAC 2017	Belo Horizonte	V. V. Moura C. Pereira A. K. Martins

ANEXO I – SÉRIES DE DECAIMENTO DO URÂNIO-238 E DO TÓRIO-232

Na figura abaixo segue a série de decaimento do U-238. Fonte: MARTIN, 2006.

Nuclide	Half-life	α		β^-		γ	
		E (MeV)	Y_j (%)	E (MeV) ^[a]	Y_j (%)	E (keV)	Y_j (%)
^{238}U	4.468×10^9 y	4.15	21				
α		4.2	79				
^{234}Th	24.10 d			0.08	2.9	63.3	4.8
β^-				0.1	7.6	92.4	2.8
				0.1	19.2	92.8	2.8
				0.2	70.3		
$^{234\text{m}}\text{Pa}^{[b]}$	1.17 m			2.27	98.2	766	0.3
IT						1,001	0.84
^{234}Pa	6.75 h						
β^-				22 β^- s $E_{\text{avg}} = 0.224$ $E_{\text{max}} = 1.26$		1,313	18
						1,527	5.97
^{234}U	2.457×10^5 y	4.72	28.4				
α		4.78	71.4				
^{230}Th	7.538×10^4 y	4.62	23.4				
α		4.69	76.3				
^{226}Ra	1600 y	4.6	5.55			186.2	3.6
α		4.79	94.5				
^{222}Rn	3.8235 d	5.49	99.9			510	0.08
α							
$^{218}\text{Po}^{[b]}$	3.11 m	6	100.0				
α							
^{214}Pb	26.8 m			0.19	2.35	53.2	1.11
β^-				0.68	46.0	242	7.5
				0.74	40.5	295.2	18.5
				1.03	9.3	351.9	35.8
$^{214}\text{Bi}^{[b]}$	19.9 m			0.79	1.45	609.3	44.8
β^-				0.83	2.74	768.4	4.8
				1.16	4.14	934.1	3.03
				1.26	2.9	1,120.3	14.8
				1.26	1.66	1,238.1	5.86
				1.28	1.38	1,377.7	3.92
				1.38	1.59	1,408.9	2.8
				1.43	8.26	1,729.6	2.88
				1.51	16.9	1,764.5	15.4
				1.55	17.5	2,204.2	4.86
				1.73	3.05	2,447.9	1.5
				1.9	7.18	Nine other γ s	
				3.27	19.9		
^{214}Po	164.3 μ s	7.69	99.99				
α							
^{210}Pb	22.3 y			0.02	84	46.5	4.25
β^-				0.06	16		
$^{210}\text{Bi}^{[b]}$	5.013 d			1.16	100	1,764.5	15.4
β^-							
^{210}Po	138.376 d	5.3	100.0				
α							
^{206}Pb	(Stable)						

a Maximum beta energy.

b Branching occurs in 0.13% of $^{234\text{m}}\text{Pa}$ to ^{234}Pa by IT; 0.02% of ^{218}Po to ^{218}At by β^- ; 0.02% of ^{214}Bi to ^{210}Tl by α ; 0.00013% of ^{210}Bi to ^{206}Tl by α .

Source: NNDC (1995).

Na figura abaixo segue a série de decaimento do Th-232. Fonte: MARTIN, 2006.

Nuclide	Half-life	α		β^-		γ	
		E (MeV)	Y_j (%)	E (MeV) ^[a]	Y_j (%)	E (keV)	Y_j (%)
^{232}Th	14.05×10^9 y	3.95	22.1				
α		4.01	77.8				
^{228}Ra	5.75 y			0.02	40		
β^-				0.04	60		
$^{228}\text{Ac}^{[b]}$	6.15 h			0.45	2.6	209.3	3.88
β^-				0.5	4.18	270.2	3.43
				0.61	8.1	328	2.95
				0.97	3.54	338.3	11.3
				1.02	5.6	463	4.44
				1.12	3	794.9	4.34
				1.17	31	835.7	1.68
				1.75	11.6	911.2	26.6
				2.08	10	964.8	5.11
						969.9	16.2
						1,588	3.3
^{228}Th	1.9131 y	5.34	28.2			84.4	1.27
α		5.42	71.1				
^{224}Ra	3.62 d	5.45	5.06			241	3.97
α		5.69	94.9				
^{220}Rn	55.6 s	6.29	99.9				
α							
^{216}Po	0.145 s	6.78	100				
α							
^{212}Pb	10.64 h			0.16	5.17	238.6	43.3
β^-				0.34	82.5	300.1	3.28
				0.57	12.3		
^{212}Bi	60.55 m	6.05	25.13	0.63	1.87	727.3	6.58
α		6.09	9.75	0.74	1.43	785.4	1.1
β^-				1.52	4.36	1,621	1.49
				2.25	55.5		
35.9%							
^{212}Po	0.299 μs	8.79	100				
β^-							
64.1%							
^{208}Tl	3.053 m			1.03	3.1	277.4	6.3
β^-				1.29	24.5	510.8	22.6
				1.52	21.8	583.2	84.5
				1.8	48.7	763.1	1.8
						860.6	12.4
						2,615	99.2
^{208}Pb	(Stable)						

a Maximum beta energy.

b Only gammas with yield greater than 2% listed.

Source: NNDC (1995).

ANEXO II – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO - AT6101C

Nas 2 figuras a seguir o certificado de calibração do AT6101C. Fonte: MRA, 2016.

CÓPIA CONTROLADA		CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO		16 - 0451																																							
01		01 de junho de 2016		01 de junho de 2016																																							
<p>1 - INSTITUIÇÃO TITULAR DO INSTRUMENTO CNPJ/CPF: 34.019.962/0018-05</p> <p>[REDACTED]</p>																																											
<p>2 - ESPECIFICAÇÕES DO INSTRUMENTO - Os dados do instrumento estão na tabela 1.</p> <p> <table border="1"> <caption>Tabela 1 - Dados do Instrumento</caption> <thead> <tr> <th rowspan="3">INSTRUMENTO</th> <th rowspan="3">FABRICANTE</th> <th colspan="4">SONDAS</th> </tr> <tr> <th colspan="2">DE ÁREA</th> <th colspan="2">DE CONFIRMAÇÃO</th> </tr> <tr> <th>EXTERNA</th> <th>INTERNA</th> <th>EXTERNA</th> <th>INTERNA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>GETAC</td> <td>ATOMTEX</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>NAUTIZ X7</td> <td>AT 6101 C</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>NC</td> <td>10101</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>NC</td> <td>2014346</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> </tbody> </table> </p>						INSTRUMENTO	FABRICANTE	SONDAS				DE ÁREA		DE CONFIRMAÇÃO		EXTERNA	INTERNA	EXTERNA	INTERNA	GETAC	ATOMTEX	-	-	-	-	NAUTIZ X7	AT 6101 C	-	-	-	-	NC	10101	-	-	-	-	NC	2014346	-	-	-	-
INSTRUMENTO	FABRICANTE	SONDAS																																									
		DE ÁREA		DE CONFIRMAÇÃO																																							
		EXTERNA	INTERNA	EXTERNA	INTERNA																																						
GETAC	ATOMTEX	-	-	-	-																																						
NAUTIZ X7	AT 6101 C	-	-	-	-																																						
NC	10101	-	-	-	-																																						
NC	2014346	-	-	-	-																																						
<p>3 - FONTES DE RADIAÇÃO - A tabela 2 mostra as fontes utilizadas pela METROBRAS.</p> <p> <table border="1"> <caption>Tabela 2 - Fontes de referência para área</caption> <thead> <tr> <th rowspan="2">RADIAÇÃO</th> <th rowspan="2">INCLUIÇÃO</th> <th rowspan="2">FABRICANTE</th> <th rowspan="2">MODELO</th> <th colspan="2">ATIVIDADE ATUAL</th> </tr> <tr> <th>Tb</th> <th>Ci</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">GAMA</td> <td>¹³⁷Cs</td> <td>JL Shepherd</td> <td>28 - SA Calibrator</td> <td>0,363</td> <td>9,7</td> </tr> <tr> <td>⁶⁰Co</td> <td>AECL</td> <td>5000000 #</td> <td>3,664</td> <td>102,8</td> </tr> </tbody> </table> </p>						RADIAÇÃO	INCLUIÇÃO	FABRICANTE	MODELO	ATIVIDADE ATUAL		Tb	Ci	GAMA	¹³⁷ Cs	JL Shepherd	28 - SA Calibrator	0,363	9,7	⁶⁰ Co	AECL	5000000 #	3,664	102,8																			
RADIAÇÃO	INCLUIÇÃO	FABRICANTE	MODELO	ATIVIDADE ATUAL																																							
				Tb	Ci																																						
GAMA	¹³⁷ Cs	JL Shepherd	28 - SA Calibrator	0,363	9,7																																						
	⁶⁰ Co	AECL	5000000 #	3,664	102,8																																						
<p>4 - RASTREABILIDADE - A rastreabilidade da grandeza de calibração é estabelecida pela utilização de câmaras de ionização PTW, modelos TN 3202 e TN 30013, séries 0278 e 3059 acopladas aos eletrômetros PTW, modelo UNIDOS, séries T1005-50423 e T1005-50480, calibrados pelo Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes - LNMRI / IRD / ONEN (certificados LNMRI 0196/2015 e LNMRI 0194/2015).</p>																																											
<p>5 - CONDIÇÕES DE CALIBRAÇÃO</p> <p>5.1 - GEOMETRIA DE CALIBRAÇÃO - O eixo longitudinal da sonda foi posicionado perpendicularmente ao eixo central do feixe de radiação. A distância entre os centros geométricos da fonte e da sonda foi considerada como a distância de referência fonte-detector.</p> <p>5.2 - CONDIÇÕES AMBIENTAIS - expressas como GRANDEZA (Valor Medido ± Metade da Variação) unidade</p> <p>TEMPERATURA: (23,28 ± 0,60) °C PRESSÃO: (95,125 ± 0,01) kPa UMIDADE: (35,75 ± 0,25) %</p>																																											
<p>6 - RECALIBRAÇÃO - Devido às características do instrumento, recomenda-se que o mesmo seja calibrado com a periodicidade estabelecida em normas dos órgãos reguladores das atividades do usuário. Uma recalibração será necessária sempre que ocorrer qualquer dano, alteração e/ou manutenção que possa modificar a resposta do instrumento.</p>																																											
<p>7 - RESULTADOS - O método utilizado foi o de campo de radiação conhecido. Os valores medidos foram comparados com os respectivos Valores Verdadeiros Convencionais VVC fornecidos por dosímetros dos campos de radiação utilizados, referenciados a 20 °C e 101,325 kPa, conforme procedimento PQ 020 da METROBRAS.</p> <p>Os resultados indicados na tabela 3, referem-se à média \bar{M} de 10 medidas efetuadas para cada VVC. As incertezas expandidas U_p declaradas foram calculadas de acordo com o ISO GUM - Guia para Expressão da Incerteza da Medição, INMETRO (1998), adotando um fator de abrangência $k = 2$, referente a um nível de confiança de $\approx 95\%$.</p>																																											
<p>Rua Domercano Leite de Azeite, 367 Distrito Industrial Ado Rassi Jardimópolis - SP CEP 13.640-000</p> <p>CNPJ 07.041.984/0001-00 I.E. 356.870.979.117 Tel (16) 3963 - 8804 Fax (16) 3963 - 8892</p>					1 / 2																																						

Tabela 3 - Resultados do procedimento de calibração, referenciados à radiação gama de Cs-137

PUNTO DE ESCALA	TAXA DE EQUIVALENTE DE DOSE AMBIENTE VVC		MÉDIA DAS MEDIDAS - M		FATOR DE CALIBRAÇÃO F _c = VVC / M	ACERTEZA EXPANDIDA M, 1% I
			ANTES AJUSTE	APÓS AJUSTE		
1	0,20	μSv/h	-	0,24	0,84	5,8
	0,50	μSv/h	-	0,55	0,89	3,3
	0,80	μSv/h	-	0,88	0,91	2,7
10	2,00	μSv/h	-	2,00	0,99	2,3
	5,00	μSv/h	-	5,05	0,99	2,2
	8,00	μSv/h	-	8,07	0,99	2,1
100	20,0	μSv/h	-	20,4	0,98	2,2
	50,0	μSv/h	-	51,7	0,97	2,1
	80,0	μSv/h	-	81,7	0,98	2,1

8 - INFORMAÇÕES ADICIONAIS - Na tabela 3, os valores de Taxa de Equivalente de Dose Ambiente, H⁽¹⁰⁾, foram obtidos multiplicando-se valores fornecidos pela dosimetria do campo de radiação das fontes de Cs-137 e Co-60, em kenna no ar, respectivamente, por 1,20 e 1,16 Sv/Gy, conforme recomenda o SRS-16 da Agência Internacional de Energia Atômica.

9 - OBSERVAÇÕES - O instrumento acusa no visor 100 μSv/h (OL) em um VVC de 99 μSv/h.


Mariana A. Pires
Responsável Técnico


Fabiane Zambiasi
Técnico