

**Nº 123  
TESE DE  
DOUTORADO**

**DOSIMETRIA TERMOLUMINESCENTE NA  
AVALIAÇÃO DA DOSE “INDOOR” DAS  
RESIDÊNCIAS DO MUNICÍPIO DE SÃO  
JOSÉ DE ESPINHARAS-PB**

**AUTOR: JAIRO DIAS BEZERRA**

**RECIFE – PERNAMBUCO – BRASIL  
AGOSTO – 2015**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR**

**COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR  
CENTRO REGIONAL DE CIÊNCIAS NUCLEARES DO NORDESTE**

**Programa de Pós-graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares**

**DOSIMETRIA TERMOLUMINESCENTE NA AVALIAÇÃO DA DOSE  
“INDOOR” DAS RESIDÊNCIAS DO MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ DE  
ESPINHARAS-PB**

**JAIRO DIAS BEZERRA**

**Orientador:** Prof. Dr. Romilton dos Santos Amaral  
(DEN - UFPE)

**Coorientador:** Prof. Dr. José Araújo dos Santos Júnior  
(DEN - UFPE)

**Recife - PE**

**Agosto, 2015**

**JAIRO DIAS BEZERRA**

**DOSIMETRIA TERMOLUMINESCENTE NA AVALIAÇÃO DA DOSE  
“INDOOR” DAS RESIDÊNCIAS DO MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ DE  
ESPINHARAS-PB**

Tese submetido ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco, para obtenção do título de Doutor em Ciências. Área de Concentração: Dosimetria e Instrumentação nuclear.

**Orientador:** Prof. Dr. Romilton dos Santos Amaral  
(DEN - UFPE)

**Coorientador:** Prof. Dr. José Araújo dos Santos Júnior  
(DEN - UFPE)

**Recife - PE**

**Agosto, 2015**

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

- B574d Bezerra, Jairo Dias.  
Dosimetria termoluminescente na avaliação da dose “indoor” das residências do Município de São José de Espinharas-PB / Jairo Dias Bezerra. - Recife: O Autor, 2015.  
87 folhas, il., gráfs., tabs.
- Orientador: Prof. Dr. Romilton dos Santos Amaral.  
Coorientador: Prof. Dr. José Araújo dos Santos Júnior.  
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2015.  
Inclui Referências.
1. Energia Nuclear. 2. Jazida de Urânio. 3. Radiação Gama. 4. TLD. 5. Doses efetivas Ambientais. 6. Doses indoor. I. Amaral, Romilton dos Santos. (Orientador). II. Santos Júnior, José Araújo dos. (Coorientador). III. Título.

UFPE

612.01448 CDD (22. ed.)

BCTG/2015-215

***DOSIMETRIA TERMOLUMINESCENTE NA  
AVALIAÇÃO DA DOSE “INDOOR” DAS  
RESIDÊNCIAS DO MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ DE  
ESPINHARAS-PB***

**Jairo Dias Bezerra**

**APROVADA EM: 07.08.2015**

**ORIENTADOR : Prof. Dr. Romilton dos Santos Amaral**

**ORIENTADOR : Prof. Dr. José Araújo dos Santos Júnior**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Prof. Dr. Romilton dos Santos Amaral - DEN/UFPE**

---

**Prof. Dr. José Nildo Tabosa – IPA**

---

**Prof(a). Patrícia Brandão da Silveira – CRCN-NE/CNEN**

---

**Prof. Dr. Jair de Lima Bezerra – DEN/UFPE**

---

**Prof(a). Dra. Vivianne Lúcia Bormann de Souza – CRCN-NE/CNEN**

**Visto e permitida a impressão**

---

**Coordenador(a) do PROTEN/DEN/UFPE**

**A Deus Pai Todo Poderoso;**

A minha mãe, **Cremilda Dias Bezerra**,  
e ao meu pai, **Pedro Gonçalves Bezerra**,  
(in Memoriam)  
por ter despertado em mim  
um espírito contínuo de luta;

A minha amada esposa, **Rosalva Martins**,  
por todo seu amor dedicado em cada amanhecer  
trilhado na busca desta conquista,

Aos meus filhos,  
**Ruan Martins** (in Memoriam) e **Rian Martins**,  
pelo apoio incondicional,  
e por todos os dias vividos na minha ausência,

Amo muito a todos;

**Dedico.**

*"A razão cardeal de toda a superioridade humana é sem dúvida a vontade. O poder nasce do querer. Sempre que o homem aplique a veemência e perseverante energia de sua alma a um fim, ele vencerá os obstáculos, e se não atingir o alvo, fará pelo menos coisas admiráveis."*

**JOSÉ DE ALENCAR**

## AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida e a Nossa Senhora por estarem sempre presentes em minha caminhada, contemplando-me com saúde, força de vontade, sabedoria e conhecimento, requisitos importantes para minha formação em mais uma conquista.

Aos meus pais, Pedro Gonçalves Bezerra e Cremilda Dias Bezerra (in Memoriam), pelas lições de vida, educação, compreensão, amizade, carinho e amor sempre dedicados.

A minha querida esposa Rosalva Martins Dias Bezerra pela compreensão, carinho, amor, confiança e apoio, principalmente quando precisei estar ausente na busca dessa conquista. Meu muito obrigado por tudo.

Ao meu filho Ruan Martins Dias Bezerra (in Memoriam), pelo amor e saudades que sentimos, mesmo sabedores que ao retornarmos ao convívio com Pai Celestial, estaremos juntos, unidos mais uma vez na fé e no amor de Deus, é o que serve de inspiração para sua família reverenciá-lo em todas as conquistas e orações diárias.

Ao meu filho Rian Martins Dias Bezerra, pelo apoio incondicional em todos os momentos desta caminhada, mesmo quando me ausentava na busca deste objetivo. Meu muito obrigado por tudo.

A minha querida irmã, Janece Bezerra Tavares de Melo e família, sempre pelo apoio, incentivo e carinho em mais uma conquista.

Ao meu Orientador Professor Dr. Romilton dos Santos Amaral pela oportunidade de fazer parte do grupo RAE, pelo apoio, amizade, compreensão e ensinamentos, quando das minhas diversas atribuições vivenciadas nesta conquista.

Ao meu Coorientador Professor Dr. José Araújo dos Santos Júnior, por sua verdadeira amizade e incentivo diário tanto no mestrado como também no doutorado. Pela confiança, ensinamentos tanto no campo científico como no pessoal. Agradeço também, pelo apoio nos momentos mais difíceis deste caminhar na busca desta conquista. Meu muitíssimo obrigado por tudo, que Deus Pai todo poderoso, cubra-lhe com seu manto de sabedoria e saúde sempre.

Aos Professores José Nildo Tabosa, José Wilson Vieira e Cláudio José Mesquita Menezes por comporem a banca de acompanhamento deste trabalho de doutorado com contribuições valiosas para esta conquista.

Aos Professores, José Nildo Tabosa, José Wilson Vieira, Cláudio José Mesquita Menezes, Jair de Lima Bezerra, Dário Costa Primo, Patrícia Brandão da Silveira e Vivianne Lúcia Bormann de Souza, que nas bancas do I e II seminários, qualificação e defesa, contribuíram muito com as discussões, indicando sugestões e correções. Meu muito obrigado por tudo.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudo que proporcionou o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Departamento de Energia Nuclear (DEN) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) pela infra-estrutura disponibilizada para a realização deste trabalho.

A todos os professores do DEN-UFPE na construção da minha formação, pelo incentivo diário e pelas amizades consolidadas.

A minha sogra Marlene Martins Gomes (in Memoriam), Marilene Martins de Paula, Eliene Ramos (Lena), Jaci Martins, cunhados e cunhadas, sobrinhos e sobrinhas, meu muito obrigado por tudo e por sempre acreditarem no meu potencial.

A todos os meus irmãos e irmãs, cunhados e cunhadas, sobrinhos e sobrinhas por acreditarem e apoiarem na busca deste meu objetivo. Meu muito obrigado.

A minha querida amiga Sloana Lemos e Família pela amizade, apoio e incentivo sempre, meu muitíssimo obrigado por tudo.

A Lúcia Damásio, Júnior do espetinho, Alene Ramos, Nilvania Monteiro, Kalidja Izabel e Floriano Melchiades pela amizade e companheirismo.

Aos meus colegas de grupo de pesquisa (RAE), pela amizade e companheirismo na busca deste meu ideal, meu muito obrigado.

A todos os amigos do mestrado e doutorado que dividiram momentos variados de descontração e preocupação na busca do conhecimento que transformam vidas.

A todos os funcionários do DEN-UFPE, do LPR, do LARCA como também do LMRI por acreditarem na vitória com palavras de incentivos e carinho, meu muito obrigado.

A todos aqueles que torceram por mim, colaborando de forma direta ou indireta na busca deste meu objetivo, meu muito obrigado por tudo.

# DOSIMETRIA TERMOLUMINESCENTE NA AVALIAÇÃO DA DOSE “INDOOR” DAS RESIDÊNCIAS DO MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ DE ESPINHARAS-PB

**Autor: Jairo Dias Bezerra**

Orientador: Prof. Dr. Romilton dos Santos Amaral

Coorientador: Prof. Dr. José Araújo dos Santos Júnior

## RESUMO

Estudos radioecológicos com dosimetria ambiental vêm sendo realizados mundialmente, principalmente para avaliar os níveis de radiação natural oriundos dos radionuclídeos primordiais presentes na crosta terrestre, tais como o  $^{40}\text{K}$  e os radionuclídeos das séries do  $^{238}\text{U}$  e do  $^{232}\text{Th}$ . Estes radionuclídeos são os que mais contribuem para a exposição gama externa em ambientes fechados, principalmente quando localizados em áreas que apresentam níveis diferenciados de radiação natural. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo, determinar as taxas de doses efetivas externas dentro das residências, dose “indoor”, localizadas próximas à jazida de urânio do município de São José de Espinharas no estado da Paraíba, que contêm altos níveis de radionuclídeos terrestres, os quais constituem os Materiais Radioativos de Ocorrências Naturais (NORM). Para caracterizar o estudo radiométrico, foram instalados 178 conjuntos de dosímetros termoluminescentes, com três TLDs do tipo LiF:Mg, Ti (Fluoreto de Lítio dopado com Magnésio e Titânio) nos quartos das residências, sendo substituídos a cada 90 dias. Toda pesquisa foi realizada no período de dezembro de 2012 a novembro de 2014. As taxas de doses efetivas ambientais calculadas para São José de Espinharas variaram de 0,71 a 2,07  $\text{mSv.a}^{-1}$ , com média de 0,90  $\text{mSv.a}^{-1}$ . Municípios adjacentes à área de estudo também foram monitorados no referido estudo, destacando-se: São Mamede, São José do Sabugi, Patos e Santa Luzia com valores intervalares e médias de 0,77 a 1,41  $\text{mSv.a}^{-1}$  (0,94  $\text{mSv.a}^{-1}$ ); 0,90 a 1,67  $\text{mSv.a}^{-1}$  (1,13  $\text{mSv.a}^{-1}$ ); 0,77 a 0,93  $\text{mSv.a}^{-1}$  (0,87  $\text{mSv.a}^{-1}$ ) e 1,10 a 1,27  $\text{mSv.a}^{-1}$  (1,18  $\text{mSv.a}^{-1}$ ), respectivamente. A média geral do referido estudo ficou em torno de  $0,99 \pm 0,10 \text{ mSv.a}^{-1}$ , correspondendo a um valor médio que é 2,5 vezes superior ao estimado para ambientes fechados conforme o Comitê Científico das Nações Unidas para os Efeitos das Radiações Atômicas (UNSCEAR) que é 0,41  $\text{mSv.a}^{-1}$ . Estes valores conferem aos municípios, influências exclusivas de materiais radioativos de ocorrências naturais devido à formação geológica da região, quando levado em consideração os níveis desses radionuclídeos. Observa-se que os resultados obtidos nesta monitoração radioecológica, não permite propor nenhuma condição de contaminação “indoor” sem antes monitorar a água, os alimentos, os materiais de construção, como também os habitantes para se predizer qualquer condição de risco real que esteja associada a população desses municípios.

**Palavras-chave:** Jazida de Urânio, Radiação Gama, TLD; Doses efetivas Ambientais; Doses Indoor.

# THERMOLUMINESCENT DOSIMETRY IN THE EVALUATION OF "INDOOR" DOSE AT RESIDENCES OF THE MUNICIPALITY OF SÃO JOSÉ OF ESPINHARAS-PB

**Author: Jairo Dias Bezerra**

Adviser: Prof. Dr. Romilton dos Santos Amaral

Coadviser: Prof. Dr. José Araújo dos Santos Júnior

## ABSTRACT

Radioecological studies of environmental dosimetry have been conducted worldwide, mainly to assess the natural levels of radiation coming from the primordial radionuclides present in the earth's crust, such as  $^{40}\text{K}$  and radionuclides from  $^{238}\text{U}$  and  $^{232}\text{Th}$  series. These radionuclides are the main contributors to external gamma exposure indoors, especially when they are located in areas with different levels of radiation. In this context, this study aimed to determine the external effective dose rates inside houses (indoor dose), located near the uranium mine in the city of São José de Espinharas in the state of Paraíba, Northeast region, Brazil, that contain high levels of terrestrial radionuclides, which are the Naturally Occurring Radioactive Material (NORM). To characterize the radiometric study, were installed 178 sets of thermoluminescent dosimeters, with three TLDs type LiF: Mg, Ti (lithium fluoride doped with Magnesium and Titanium) each, in the rooms of the residences, these being replaced on average, every 90 days, from December 2012 to November 2014. Environmental effective doses rates calculated for São José de Espinharas varied from 0.71 to 2.07  $\text{mSv.y}^{-1}$  with an average of 0.90  $\text{mSv.y}^{-1}$ . Municipalities adjacent to the study area were also monitored in the study, highlighting: São Mamede, São José do Sabugi, Patos and Santa Luzia with interval values and averages of 0.77 to 1.41  $\text{mSv.y}^{-1}$  (0.94  $\text{mSv.y}^{-1}$ ); 0.90 to 1.67  $\text{mSv.y}^{-1}$  (1.13  $\text{mSv.y}^{-1}$ ); 0.77 to 0.93  $\text{mSv.y}^{-1}$  (0.87  $\text{mSv.y}^{-1}$ ) and 1.10 to 1.27  $\text{mSv.y}^{-1}$  (1.18  $\text{mSv.y}^{-1}$ ), respectively. The overall average of the study was around  $0.99 \pm 0.10 \text{ mSv.y}^{-1}$ , corresponding to an average of 2.5 times higher than the estimated for indoors according to the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), which is 0.41  $\text{mSv.y}^{-1}$ , giving the municipalities, exclusive influences of radioactive materials of natural occurrences, due to the geological formation of the region, when taken into consideration the levels of these radionuclides. It is observed that the results of this radioecological monitoring, does not allow to propose any "indoor" contamination condition without first monitor water, food, building materials, as well as the residents to predict any real risk factor for the population of these municipalities.

**Key-words:** Uranium deposit, Gamma Radiation, TLD; Environmental Effective Dose; Indoor Dose.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

	<b>Página</b>
Figura 1. Distribuição da dose efetiva anual média, proveniente de fontes naturais e antropogênicas. ....	22
Figura 2. Contribuição da radiação natural. ....	23
Figura 3. Diagrama esquemático de excitação e estimulação térmica em um cristal TL.....	27
Figura 4. Curva de Resposta Termoluminescente (TL) em função da dose absorvida. ....	33
Figura 5. Curva de Luminescência Característica do TLD-100.....	37
Figura 6. Desvanecimento do LiF: Mg, Ti antes e depois de irradiado. ....	39
Figura 7. Mapa de localização da área de estudo. ....	44
Figura 8. Conjunto de medidas dos TLDs.....	47
Figura 9. Curva de emissão do LiF: Mg, Ti (TLD-100).....	49
Figura 10. Esquema de Funcionamento da Leitora de TLD. ....	50
Figura 11. Instalação do conjunto de TLDs na grade da cama.....	51
Figura 12. Comparação das taxas de doses do Detector e TLDs. ....	54
Figura 13. Coeficiente de variação por ponto monitorado. ....	54
Figura 14. Contribuição de amostragem por município estudado.....	60
Figura 15. Taxas de doses médias por município.....	62
Figura 16. Diagrama de box plot para os municípios estudados. ....	63
Figura 17. Histograma para os municípios SJE, SM e SJS. ....	64
Figura 18. Papel de probabilidade para os municípios SJE, SM e SJS. ....	64
Figura 19. Correlação linear entre SJE e SJS. ....	66
Figura 20. Correlação linear entre SJE e SM. ....	67
Figura 21. Correlação linear entre SJS e SM.....	67
Figura 22. Curvas de isodoses de SJE.....	69
Figura 23. Curvas de isodoses de SJS. ....	69
Figura 24. Curvas de isodoses de SM. ....	70

## LISTA DE TABELAS

	<b>Página</b>
Tabela 1. Principais radionuclídeos cosmogênicos. ....	20
Tabela 2. Séries naturais de decaimento radioativos. ....	21
Tabela 3. Taxas de doses efetivas naturais considerando ambientes externos e internos. ....	24
Tabela 4. Características dos dosímetros termoluminescentes. ....	30
Tabela 5. Intervalo de dose das regiões lineares de alguns TLDs. ....	33
Tabela 6. Características dos picos da curva TL do LiF: Mg, Ti (TLD-100). ....	38
Tabela 7. Desvanecimento de alguns materiais dosimétricos. ....	39
Tabela 8. Identificação dos pontos monitorados. ....	55
Tabela 9. Estatística descritiva. ....	61
Tabela 10. Parâmetros teóricos e empíricos para o teste de Kolmogorov-Smirnov para os municípios estudados. ....	65
Tabela 11. Taxas de doses efetivas ambientais determinadas com monitoração por TLDs para ambientes internos em alguns trabalhos a nível mundial. ....	71

## LISTA DE EQUAÇÕES

	<b>Página</b>
Equação 1. Função Densidade de estado.....	28
Equação 2. Função Distribuição de Fermi-Dirac. ....	28
Equação 3. Lei de Arrhenius. ....	28
Equação 4. Expressa o tempo de meia-vida da probabilidade desse elétron escapar de sua armadilha. ....	29
Equação 5. Resposta em Função da Dose. ....	32
Equação 6. Rendimento Termoluminescente. ....	34
Equação 7. Resposta Termoluminescente ....	34
Equação 8. Dependência Energética. ....	35
Equação 9 Resposta relativa (RER) em função da resposta do material irradiado na energia de referência. ....	35
Equação 10. Número atômico efetivo do material ( $Z_{\text{eff}}$ ). ....	36
Equação 11. Sensibilidade Relativa. ....	37
Equação 12. Dose Absorvida (D).....	40
Equação 13. Dose Equivalente ( $H_T$ ). ....	41
Equação 14. Dose equivalente quando o campo de radiação for composto por diferentes tipos de radiação com valores diferentes para o fator de qualidade.....	41
Equação 15. Dose Efetiva ( $H_E$ ). ....	41
Equação 16. o Coeficiente de Correção de cada TLD (ECC). ....	48
Equação 17. Fator de Calibração da Leitora de TLDs (RCF). ....	48
Equação 18. Dose Absorvida no ar nos quartos das residências. ....	48
Equação 19. Taxas de Doses Média indoor medidas nos quartos das residências dos municípios em estudo.....	52

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALARA	As Low as Reasonably Achievable
BC	Banda de condução
BG	Background
BP	Banda proibida
BV	Banda de valência
$\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Mn}$	Borato de Lítio dopado com Manganês
$\text{CaF}_2$	Fluorita
$\text{CaSO}_4:\text{Mn}$	Sulfato de Cálcio dopado com Manganês
$\text{CaF}_2:\text{Dy}$	Fluoreto de Cálcio dopado com Disprósio
$\text{CaSO}_4:\text{Tm}$	Sulfato de Cálcio dopado com Túlio
$\text{CaSO}_4:\text{Dy}$	Sulfato de Cálcio dopado com Disprósio
$\text{CaS}:\text{Sm}$	Sulfeto de Cálcio dopado com Sumário
$\text{CaF}_2:\text{Tm}$	Fluoreto de Cálcio dopado com Túlio
$\text{CaF}_2(\text{Eu})$	Fluoreto de Cálcio dopado com európio
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
$\text{CsI}(\text{Tl})$	Iodeto de céσιο dopado com tálio
$\text{CsI}(\text{Na})$	Iodeto de céσιο dopado com sódio
DNPN	Departamento Nacional de Produção Mineral
$D_{\text{T,R}}$	Dose Média Absorvida por um Órgão T Devido a Radiação R
$E_{\text{TL}}$	Energia emitida em forma de luz
ECC	Coefficiente de Correção do Elemento
ICRP	International Commission on Radiological Protection
IAEA	International Atomic Energy Agency
$^{40}\text{K}$	Potássio-40
LiF	Fluoreto de Lítio
LiF: Mg, Ti	Fluoreto de Lítio enriquecido com Magnésio e Titânio
LiF: Mg, Cu, P	Fluoreto de Lítio dopado com Magnésio, Cobre e Fósforo
LiI (Eu)	Iodeto de lítio dopado com európio
MeV	Mega elétron volts
$\text{mSv}\cdot\text{a}^{-1}$	Mili Sivert por ano
$\text{mm}^3$	milímetro cúbico

Mg	Magnésio
mg.kg <sup>-1</sup>	miligrama por quilograma
NaI(Tl)	Iodeto de sódio dopado com tálio
nC	nanoCoulomb
NUCLEBRÁS	Empresas Nucleares Brasileira S/A
OSL	Luminescência Opticamente Estimulada
Outliers:	Valor muito acima do esperado.
PT	Patos
Q <sub>TL</sub>	Sinal Termoluminescente Produzido pelo Fósforo
<sup>232</sup> Ra	Rádio-232
<sup>87</sup> Rb	Rubídio-87
RBE	Eficácia Biológica Relativa
RER	Resposta Relativa em Função da Resposta do Material Irradiado
ROI	Região de Interesse
S.I.	Sistema Internacional
S <sub>E</sub> (E)	Resposta do Material Irradiado
S <sub>E</sub> (Re f)	Resposta do Material de Referência
SL	Santa Luzia
SJE	São José de Espinharas
Ti	Titânio
TL	Termoluminescente
TLD	Thermoluminescent dosimeter (Dosímetro Termoluminescente)
<sup>232</sup> Th	Thório-232
TSC	Condutividade termicamente estimulada
TSCap	Capacitância termicamente estimulada
TSP	polarização termicamente estimulada
<sup>238</sup> U	Urânio-238
UV	Ultra Violeta
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiations
V	Volts
Y <sub>TL</sub>	Rendimento Termoluminescente
τ	Emissão de Luz

Gy	Gray
$\mu\text{Gy}$	micro Gray
$Z_{\text{eff}}$	Número Atômico Efetivo do Material
$w_R$	Fator de Qualidade da Radiação

# SUMÁRIO

## Página

1. INTRODUÇÃO .....	17
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	20
2.1 Radioatividade Natural .....	20
2.2 Dosimetria Termoluminescente.....	25
2.3 Utilização de Dosímetros Termoluminescentes na Dosimetria Ambiental .....	29
2.4 Parâmetros Dosimétricos para o TLD .....	31
2.4.1 Homogeneidade .....	31
2.4.2 Reprodutibilidade .....	31
2.4.3 Resposta em Função da Dose .....	32
2.4.4 Linearidade .....	34
2.4.5 Dependência Energética .....	34
2.4.6 Dependência Angular .....	36
2.4.7 Sensibilidade.....	36
2.4.8 Curva de Emissão .....	37
2.4.9 Desvanecimento do Sinal Luminescente .....	38
2.5 Grandezas Radiológicas.....	40
2.5.1 Dose Absorvida (D).....	40
2.5.2 Dose Equivalente ( $H_T$ ).....	40
2.5.3 Dose Efetiva ( $H_E$ ) .....	41
2.6 Monitoração de Áreas com Elevados Níveis de Radioatividade Ambiental ...	42
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	44
3.1 Área de Estudo.....	44
3.2 Sistemas de Medidas.....	46
3.3 Seleção e Calibração dos Dosímetros.....	47
3.4 Leitura dos Dosímetros Termoluminescentes .....	48
3.5 Distribuição dos TLDs na Área de Estudo .....	50
3.6 Cálculo da Taxa de Dose dentro das Residências (indoor) .....	51
3.7 Tratamento Estatístico dos Resultados .....	52
4. RESULTADOS E DISCUSSAO.....	53

4.1 Teste de Certificação e Validação da Dosimetria Termoluminescente .....	53
4.2 Cálculo das Taxas de Dose Obtidas nas Residências .....	55
5. CONCLUSÕES .....	74
REFERÊNCIAS .....	75

## 1. INTRODUÇÃO

O ser humano sempre esteve exposto às radiações ionizantes, principalmente as fontes naturais, constituídas basicamente pelos radionuclídeos primordiais pertencentes as séries do  $^{238}\text{U}$  e do  $^{232}\text{Th}$ , acompanhadas do  $^{40}\text{K}$  (SANTOS; MARQUES, 2003; SUJO et al., 2004; HAZRATI et al., 2010). Quando estes radionuclídeos e seus produtos de decaimento estão presentes no meio ambiente, contribuem significativamente para o aumento da dose de radiação ambiental recebida pela população, que corresponde em média a 85% da dose total, quando comparada com todas as formas de exposição existentes no planeta (UNSCEAR, 2000; MIAH, 2004).

Em termos de proteção radiológica, identificar e mapear áreas com influência anômala de radionuclídeos naturais e/ou processos antropogênicos é fundamental para garantia da segurança da humanidade, tendo em vista que a presença de altos níveis de minerais de urânio e tório, assim como seus produtos de decaimento, contribuem significativamente para aumentar o risco determinístico decorrente da exposição da população as emissões radioativas, com maior ponderação para dosimetria interna decorrente da inalação do gás radônio e seus descendentes e partículas de poeira contendo radionuclídeos, assim como a ingestão de radionuclídeos presentes nos alimentos e na água, estes últimos geralmente com menor influência (PIRES, 1995; VASCONCELOS, 2009; MELO 2009).

A identificação e o mapeamento destas áreas anômalas ocorrem por intermédio das monitorações radiométricas que vêm sendo realizadas mundialmente, objetivando garantir melhores condições de vida para as populações, minimizando os possíveis efeitos estocásticos e determinísticos. Além disso, as investigações radiométricas fazem parte de um Programa de Monitoração Ambiental (PMA), que investiga os fatores ambientais e antrópicos que podem alterar as condições padrão do ecossistema e da população. Estas investigações, buscam analisar os fatores físicos e químicos como também as vias de transferências dos radionuclídeos no meio ambiente, dentre os quais se destacam a caracterização, determinação de teores, atividades específicas e doses absorvida e equivalente efetiva, principalmente nos ambientes fechados, residências, localizadas em áreas com histórico de influência dos Materiais Radioativos de Ocorrência Natural (sigla do inglês, NORM). Os resultados obtidos nas monitorações vêm servindo de base para os órgãos internacionais (IAEA - International Atomic Energy Agency e UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation, Sources and Effects of Ionizing Radiation), estimarem com maior confiabilidade e precisão a contribuição da dose equivalente efetiva anual para os indivíduos

do público. Com esses resultados calculados para cada região, o Comitê Científico das Nações Unidas sobre Efeitos das Radiações Atômicas a UNSCEAR, 2000, adotou como referência o valor de  $2,4 \text{ mSv.a}^{-1}$  para dose média anual, decorrente da exposição externa e interna aos organismos vivos.

No Brasil, algumas áreas apresentam elevados níveis de radioatividade natural devido à presença de depósitos de urânio e/ou tório. Entre elas, destacam-se a praia de Guarapari, porção sul da região metropolitana de Vitória - ES (EISENBUD; GESELL, 1997) e a região de minas de urânio próximo à cidade de Poço de Caldas no estado de Minas Gerais (LIMA, 1996).

Em relação à região nordeste, ainda deficiente de estudos radioecológicos, levantamentos aerocintilométricos e geológicos, foram realizados nos anos de 1977 a 1982 pelas Empresas Nucleares Brasileiras S.A. (NUCLEBRAS) com o objetivo de se detectar áreas anômalas em urânio (SANTOS JÚNIOR et al., 2006). Como resultados das investigações se destacaram o distrito Uranífero de Lagoa Real (Bahia) e o de Itatiaia (Ceara), além da jazida de urânio do município de São José de Espinharas no estado da Paraíba. Este último município foi edificado nas imediações de uma jazida de urânio que apresenta uma reserva estratégica de 12 toneladas de  $\text{U}_3\text{O}_8$  com um teor médio de  $1.200 \text{ mg.kg}^{-1}$  de urânio (DNPM, 2009). A Jazida de São José de Espinharas está localizada nas adjacências da cidade com uma população de aproximadamente 4.800 pessoas (IBGE, 2010), desenvolvendo atividades agrícolas das quais se destacam principalmente, a agricultura de subsistência, a pecuária de bovinos, suínos, caprinos e a avicultura com a criação de galináceos e produção de ovos.

Desta forma, não se pode descartar a possibilidade de migração destes radionuclídeos naturais para áreas de maior convívio humano, não apenas pelo processo de formação de um novo solo, mais principalmente, pela sua exploração desordenada, onde ocorrem degradação e alteração do meio ambiente. Segundo Abu-haija (2012), as maiores preocupações quando da exploração destes radionuclídeos, além da exposição, é a emissão do gás radônio emanado das duas séries naturais, principalmente daquela do  $^{238}\text{U}$ , facilmente inalado, especialmente em ambientes fechados (residências) com pouca ventilação, podendo este, trazer danos à saúde humana.

O presente trabalho foi motivado tendo em vista que, nesta região uranífera, não existe nenhuma referência em relação à monitoração radioecológica dentro das residências e que descreva com precisão sua influência na população local, quando da exposição gama

natural. Partindo da necessidade de se conhecer os níveis de radiação "indoor", este trabalho teve como objetivo, determinar as doses efetivas ambientais dentro das residências deste município, influenciadas pela jazida, utilizando-se da dosimetria termoluminescente, estabelecendo um valor de referência de dose efetiva para o município que permitirá futuramente, modelar a dosimetria pessoal, ou seja, diretamente no indivíduo.

Convêm observar que o referido trabalho faz parte de um conjunto de projetos desenvolvidos pelo Grupo de Radioecologia (RAE) do Departamento de Energia Nuclear (DEN) em diferentes vertentes científicas, como caracterização de radionuclídeos na jazida de urânio e adjacências, investigação da dosimetria "outdoor", análise de radionuclídeos e metais pesados em água, análise biodosimétrica, investigação de elementos traços em cabelo e modelagem para estudo da transferência de radionuclídeos nos diferentes compartimentos do ecossistema.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Radioatividade Natural

A radioatividade natural é originada de fontes cósmicas e de elementos radioativos presentes na crosta terrestre (KUMAR et al., 2008; ABOJASSIM, 2014). Os radionuclídeos cosmogênicos (Tabela 1), são produzidos constantemente na atmosfera pelo bombardeamento de núclídeos estáveis por raios cósmicos altamente energéticos de aproximadamente 50 MeV, através das reações de espalhamento e captura de nêutron cujas meias-vidas variam de dias até milhões de anos (MÁDUA, 2000). Grandes partes destes radionuclídeos apresentam uma contribuição insignificante para a dose radioativa natural em função de suas baixas abundâncias, levando-se em consideração que a sua produção depende basicamente da altitude, latitude e do ciclo solar (UNSCEAR, 2000; TYKUA; BERG, 2004; SUJO et al., 2004). Conforme a Tabela 1, os radionuclídeos cosmogênicos que mais contribui para a exposição do homem no meio ambiente são  $^3\text{H}$ ,  $^7\text{Be}$  e  $^{14}\text{C}$ .

**Tabela 1.** Principais radionuclídeos cosmogênicos.

ISÓTOPO	MEIA-VIDA (ano)	PRODUÇÃO (Átomo/cm <sup>2</sup> s)	CONCENTRAÇÃO NO AR (Bq/m <sup>3</sup> )
$^3\text{H}$	12,26	0,25	0,167
$^7\text{Be}$	0,15	0,08	$1,7 \times 10^{-3}$
$^{10}\text{Be}$	$2,5 \times 10^6$	0,05	$10^{-7}$
$^{14}\text{C}$	5760	2,5	$6,7 \times 10^{-2}$
$^{22}\text{Na}$	2,6	$8,6 \times 10^{-5}$	$1,7 \times 10^{-6}$
$^{32}\text{Si}$	280	$1,6 \times 10^{-4}$	$3,3 \times 10^{-8}$
$^{32}\text{P}$	0,04	$8,1 \times 10^{-4}$	$3,3 \times 10^{-4}$
$^{33}\text{P}$	0,07	$6,8 \times 10^{-4}$	$2,5 \times 10^{-4}$
$^{35}\text{S}$	0,24	$1,4 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-4}$
$^{36}\text{Cl}$	$3,8 \times 10^5$	$1,1 \times 10^{-3}$	$5,0 \times 10^{-10}$

Fonte: ANDRELLO (2004).

Enquanto que, os radionuclídeos terrestres ou primordiais, por apresentarem meias-vidas compatíveis com a idade da Terra (EISENBUD; GESELL, 1997), produzem em seus decaimentos, grupos de radionuclídeos com diferentes propriedades químicas e físicas possuindo amplas faixas de meias-vidas (BONOTTO, 1996; ANDRELLO, 2004). A radiação gama proveniente dos radionuclídeos naturais, principalmente a do  $^{40}\text{K}$ , como também, a dos elementos pertencentes as séries radioativas do  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  acompanhados dos seus produtos

de decaimento (Tabela 2), constituem-se nas principais fontes de exposição gama ao qual o ser humano encontra-se exposto (KANNAN et al., 2002; Al-SALEH, 2007; ALMGREN et al., 2008; ABOJASSIN, 2014).

**Tabela 2.** Séries naturais de decaimento radioativos.

URÂNIO – 238			TÓRIO – 232		
ISÓTOPO	EMIÇÃO	$T_{1/2}$	ISÓTOPO	EMIÇÃO	$T_{1/2}$
$^{238}\text{U}$	$\alpha$	$4,5 \times 10^9$ a	$^{232}\text{Th}$	$\alpha$	$1,4 \times 10^{10}$ a
$^{234}\text{Th}$	$\beta^-$	24,1d	$^{228}\text{Ra}$	$\beta^-$	5,7 a
$^{234}\text{Pa}$	$\beta^-$	1,2 m	$^{228}\text{Ac}$	$\beta^-$	6,13 h
$^{234}\text{U}$	$\alpha$	$2,5 \times 10^5$ a	$^{228}\text{Th}$	$\alpha$	1,9 a
$^{230}\text{Th}$	$\alpha$	$8,0 \times 10^4$ a	$^{224}\text{Ra}$	$\alpha$	3,64 d
$^{226}\text{Ra}$	$\alpha$	1.600 a	$^{220}\text{Rn}$	$\alpha$	55,6 s
$^{222}\text{Rn}$	$\alpha$	3,8 d	$^{216}\text{Po}$	$\alpha$	0,15 s
$^{218}\text{Po}$	$\alpha$	3,05 m	$^{212}\text{Pb}$	$\beta^-$	10,6 h
$^{214}\text{Pb}$	$\beta^-$	26,8 m		$\alpha$ (33,7%)	
$^{214}\text{Bi}$	$\beta^-$	19,8 m	$^{212}\text{Bi}$	$\beta^-$ (66,3%)	60,6 m
$^{214}\text{Po}$	$\beta^-$	$1,62 \times 10^{-4}$ s	$^{208}\text{Tl}$	$\beta^-$	3,1 m
$^{210}\text{Pb}$	$\alpha$	22 a	$^{212}\text{Po}$	$\alpha$	$3,0 \times 10^{-7}$ s
$^{210}\text{Bi}$	$\beta^-$	5,0 d	$^{208}\text{Pb}$	ESTÁVEL	
$^{210}\text{Po}$	$\alpha$	138,4 d			
$^{206}\text{Pb}$	ESTÁVEL				

a = ano; d = dia; h = hora; m = minuto; s = segundo;  $T_{1/2}$  = meia-vida física.

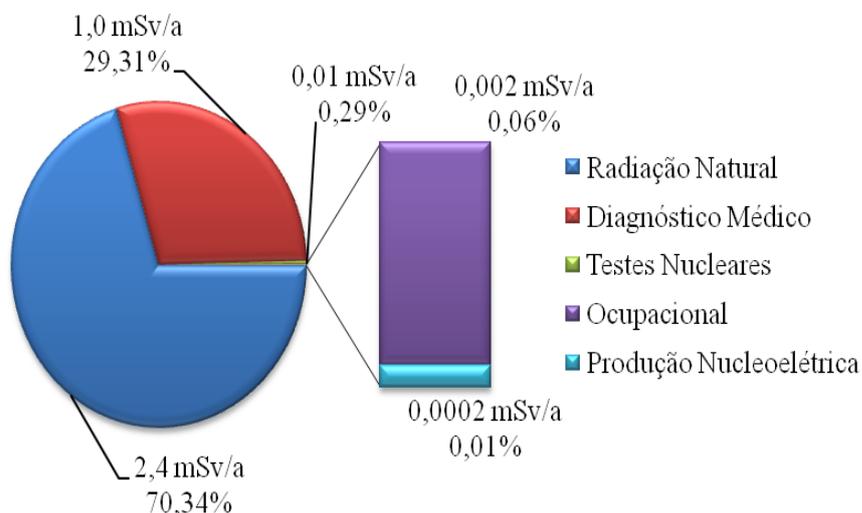
**Fonte:** SANTOS JÚNIOR (2009), adaptado.

A exposição dos indivíduos a esta radiação natural, está diretamente associada à radioatividade do ambiente, cujos níveis dependem basicamente das condições geológicas e geoquímicas de cada área do planeta, como também, das concentrações destes radionuclídeos nas estruturas das rochas, que de certa forma, viabilizarão a formação dos solos (ANJOS et al., 2005). Rochas ígneas de composição granítica geralmente apresentam concentrações de urânio e tório acima da média global, cujas concentrações médias variam de 5,0 a 15,0  $\text{mg.kg}^{-1}$  respectivamente. Por outro lado, rochas de composição basáltica e ultramórficas apresentam concentrações de urânio menores que 1,0  $\text{mg.kg}^{-1}$ . Entretanto, não podemos descartar a possibilidade de encontrarmos também, altos níveis de radionuclídeos naturais em alguns tipos de xistos e de rochas fosfáticas (SANTOS JÚNIOR, 2009).

Estas regiões que apresentam elevadas concentrações de radionuclídeos naturais em sua constituição, sempre despertarão grande interesse da comunidade científica, tendo em vista, a necessidade de se avaliar as atividades destes radionuclídeos naturais e/ou antropogênicos e, conseqüentemente, suas prováveis contribuições para o aumento da dose ambiental recebida pela população (AMARAL et al., 2005). Neste contexto, pode ser

observada na Figura 1, a distribuição da dose efetiva anual para os radionuclídeos presentes no meio ambiente.

**Figura 1.** Distribuição da dose efetiva anual média, proveniente de fontes naturais e antropogênicas.



**Fonte:** UNSCEAR (2000), adaptado.

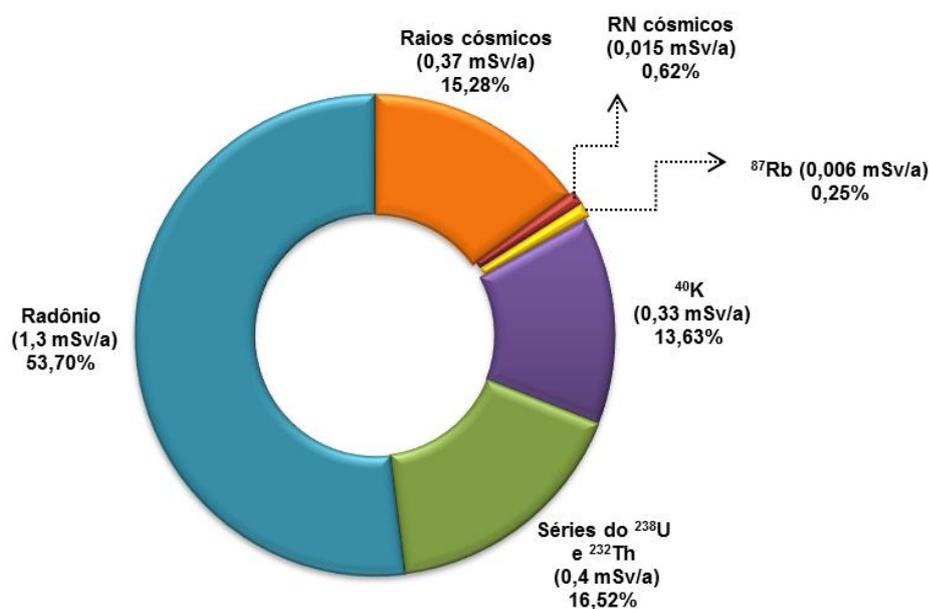
Observa-se nesta figura, que o ser humano está sujeito a uma dose efetiva ambiental média de aproximadamente 3,41 mSv/a, sendo a maior contribuição, cerca de 70,34% proveniente da radiação natural.

Tendo em vista a classificação atribuída aos radionuclídeos naturais conforme a Figura 1, a dose média efetiva anual a qual os habitantes estão expostos pode variar de 1 a 15 mSv.a<sup>-1</sup> (UNSCEAR, 2000), dependendo basicamente da posição geográfica como também da formação geológica da área. Vale salientar que, o valor médio estimado pela UNSCEAR para a exposição da população mundial é de 2,4 mSv.a<sup>-1</sup>. Sendo assim, a Figura 2, ilustra a distribuição da dose efetiva média anual recebida pela população mundial decorrente da radiação natural.

Destes radionuclídeos presente no ecossistema terrestre (Figura 2), verifica-se que o radônio, radionuclídeo secundário derivado das séries radioativas do <sup>238</sup>U e do <sup>232</sup>Th, juntamente com seus produtos de decaimento, são os que mais contribuem para a dosimetria ambiental, com aproximadamente 53% (ICRP, 1993). Entretanto, as concentrações desse gás no ar, encontram-se bastante heterogêneas em virtude da composição dos solos, rochas como também do clima aonde as pessoas residem e trabalham. Logo em seguida, as contribuições

que mais se destacam é a dos outros radionuclídeos das séries do  $^{238}\text{U}$  e do  $^{232}\text{Th}$  com 17%, do  $^{40}\text{K}$  com 14% e por último dos raios cósmicos com aproximadamente 15%. Numa análise geral, observa-se que regiões de alto BG natural são de grande interesse para estudos radioecológicos, principalmente quando da análise dos radionuclídeos primordiais, por apresentarem uma contribuição de aproximadamente 84,1% para a dose média de radiação.

**Figura 2.** Contribuição da radiação natural.



**Fonte:** UNSCEAR (2000), adaptado.

Além dos radionuclídeos naturais, podemos encontrar também na natureza cerca de 340 nuclídeos, dos quais, 70 são radioativos, formados geralmente entre os elementos pesados. Elementos com número atômico superior a 80 apresentam radioisótopos radioativos, como por exemplo:  $^{214}\text{Pb}$  e  $^{209}\text{Bi}$  e todos os outros superiores a 83 são radioativos, tais quais:  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{227}\text{Ac}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{231}\text{Pa}$  entre outros, liberando radiação particulada e eletromagnética que promoverão interações com a matéria. Contudo, isto não significa dizer que não existam elementos radioativos com número atômico inferior a 80, como é o caso do  $^{14}\text{C}$  e  $^{132}\text{Cs}$  (ANDRELLO, 2004; SANTOS JÚNIOR, 2009).

Por serem formados naturalmente no ar, água, solos e rochas, os radionuclídeos primordiais podem ser encontrados nos materiais de construção utilizados nas residências. Estes materiais são basicamente formados pela mistura de diversos tipos de argilas,

constituídas basicamente por folhas tetraédricas de silício e octaédricas de alumínio e com menor frequência de magnésio, ferro e potássio (MELLO et al., 2012), podendo estas, apresentarem elevadas concentrações destes radionuclídeos, quando levado em consideração as exposições internas, devido a inalação do  $^{222}\text{Rn}$  e a exposição à radiação gama de seus moradores. A Tabela 3 apresenta as taxas de doses efetiva médias anuais (média mundial e intervalo) para exposição às fontes de radiação ionizante natural, conforme estabelecido pela UNSCEAR (2008) para os ambientes externos e internos.

**Tabela 3.** Taxas de doses efetivas naturais considerando ambientes externos e internos.

FONTE DE EXPOSIÇÃO	DOSE EFETIVA MÉDIA ( $\text{mSv.a}^{-1}$ )	
	MÉDIA MUNDIAL	VARIAÇÃO
Radiação Cósmica	0,39	0,3 – 1,0
<b>Radiação Terrestre Externa</b>		
Ambientes ao ar livre	0,07	
Ambientes fechados	0,41	
<b>Total</b>	<b>0,48</b>	<b>0,3 – 1,0</b>
<b>Radiação Terrestre Interna</b>		
Inalação	1,26	0,2 – 10,0
Ingestão	0,29	0,2 – 10,0
<b>Total Geral</b>	<b>2,40</b>	<b>1,0 – 15,0</b>

Fonte: UNSCEAR (2008).

Nos ambientes internos, a dose efetiva devida a radiação terrestre pode aumentar 85,42% em média, quando comparada com a exposição ao ar livre, sendo isto, justificado pela contribuição dos materiais de construção como também pela introdução nestes ambientes do  $^{222}\text{Rn}$  quando da circulação do ar proveniente do ambiente externo (CAVALCANTE, 2012). As principais vias de entrada deste gás nobre nas residências acontecem pelos espaços entre o solo e o assoalho ou paredes de porões, drenos, bombas de água e esgoto, pontos de ligação da construção (argamassa, ligação entre chão e paredes, canos frouxos ou soltos), drenagens de pisos, solo exposto e fendas em paredes e pisos, em instalações de água subterrânea de poços artesianos e também pode se infiltrar através do ar externo, da água e do gás natural (ARAÚJO, 2014).

Quando da introdução destes radionuclídeos naturais nos organismos vivos pela ingestão ou inalação, o poder de penetração da radiação gama, dependerá basicamente das diferentes energias. Nos seres vivos estes radionuclídeos participam dos processos biológicos, entretanto, nos seres humanos, certos órgãos tais quais: pulmões, estômago e fígado, sofrem mutações e conseqüentemente o surgimento de alguns tipos de câncer (FERNANDES et al.,

2004). Segundo Freitas & Souza (1988), órgãos reprodutores por serem mais sensíveis a radiação, podem desenvolver rapidamente efeitos irreversíveis a nível genético e hereditário.

## 2.2. Dosimetria Termoluminescente

A termoluminescência propriamente dita é a emissão de luz devido a um estímulo térmico de um material que foi previamente irradiado. Alguns cristais, em equilíbrio termodinâmico, quando expostos à radiação ionizante, retêm parte desta energia durante a irradiação em estados metaestáveis de energia (subníveis de energia). Após uma relaxação termicamente estimulada, o sistema retorna a situação de equilíbrio, emitindo para o meio a radiação absorvida na forma de luz ultravioleta (UV), visível ou infravermelha, ocorrendo desta forma um fenômeno conhecido como luminescência, onde o material irradiado é conhecido como Termoluminescente (CUNHA, 2006; NUNES, 2008; SOUZA, 2008). Este fenômeno depende do intervalo de tempo entre a excitação (absorção de energia) e a emissão de luz ( $\tau$ ), podendo ser classificado em fluorescência e fosforescência e ser observados nos sólidos, líquidos ou até mesmo nos gases (CAMPOS, 2009).

Quando a emissão de luz for quase que simultânea a excitação ( $\tau < 10^{-8}$  s), o processo é denominado de fluorescência, enquanto que, na fosforescência, quando do desaparecimento da excitação, a emissão de luz ocorrerá, após um longo período de tempo ( $\tau > 10^{-8}$  s), podendo este, ainda ser chamado de Luminescência Opticamente Estimulada (OSL) (NUNES, 2008; CAMPOS, 2009; MATSUSHIMA, 2010; BATISTA, 2011). Entretanto, para curtos intervalos de tempo, a distinção entre fluorescência e fosforescência não é tão fácil de distinguir, a não ser por meios de estudo do efeito da temperatura sobre o decaimento da luminescência. A fluorescência independe da temperatura para o decaimento luminescente, enquanto que, a fosforescência exibe forte dependência para seu decaimento luminescente.

Os materiais termoluminescentes, na sua grande maioria não são condutores elétricos, são geralmente semicondutores ou isolantes, que em geral, são constituídos por cristais iônicos. Estes cristais são transparentes na região do espectro visível. Para minimizar a constante perda de energia, são introduzidos em sua rede cristalina, elementos químicos, chamados de impurezas. Sempre que ocorrer a presença de um defeito estrutural no cristal, como a presença destas impurezas ou lacunas, a periodicidade da rede é quebrada,

possibilitando a existência de níveis de energia localizados na banda proibida do cristal (CUNHA, 2006; SILVEIRA, 2006; OLIVEIRA, 2008; MATSUSHIMA, 2010). Estes defeitos estruturais contribuem para a captura de íons negativos ou positivos, através de interações eletromagnéticas (SOUZA, 2008).

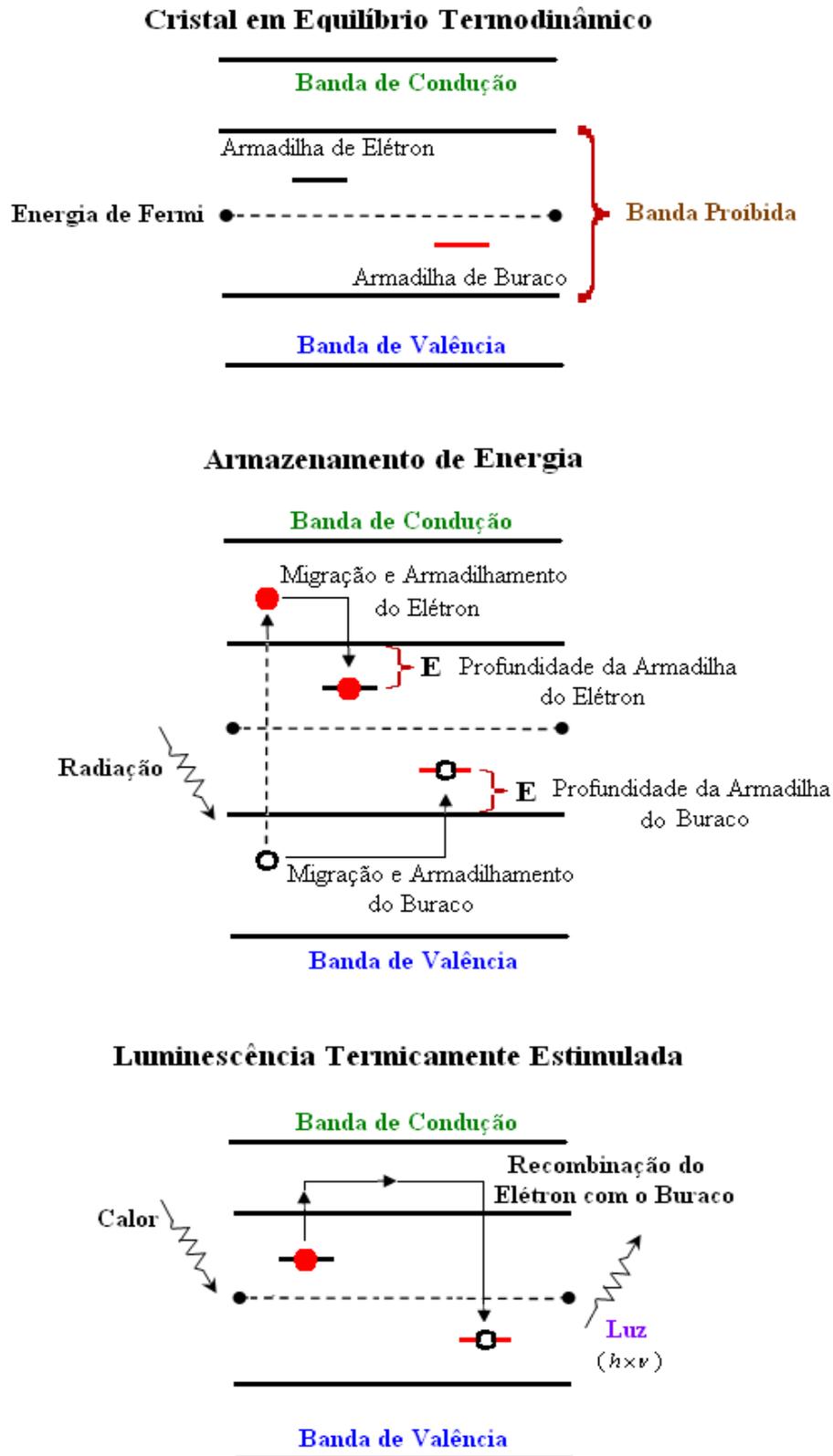
Estas interações só ocorrem quando os portadores de carga adquirir energia suficiente para romperem suas ligações com a banda de valência ou para libertarem-se das suas referidas armadilhas localizadas na banda proibida quando aprisionados. O intervalo de energia existente entre a banda de condução e as armadilhas de elétrons, localizadas na banda proibida é da ordem de aproximadamente 10 eV, sendo o número de elétrons armadilhados uma função da intensidade da radiação incidente.

Por ser um dos métodos mais empregados atualmente na medida de radiações ionizantes, o fenômeno da TL pode ser qualitativamente explicada através do modelo de bandas de energia conforme a Figura 3 para os níveis eletrônicos dos elétrons nos sólidos (CASTRO, 2004).

Neste diagrama ilustrado na Figura 3, o primeiro estágio, conhecido como estado de equilíbrio termodinâmico a 0 kelvin, apresenta níveis vazios (armadilha de elétrons) próximo à banda de condução e centros de recombinações (armadilhas de buracos) próximo à banda de valência. O segundo estágio é caracterizado por armazenamento de energia, onde o material passa a ser excitado com o surgimento de um evento ionizante, neste momento, é gerada uma perturbação no cristal que anteriormente encontrava-se em equilíbrio termodinâmico, esta perturbação, causará deslocamentos de elétrons da banda de valência para a banda de condução pela absorção de energia da radiação incidente, deixando na banda de valência buracos ou lacunas (CASTRO, 2004; MONTEIRO, 2005). Na banda de condução os elétrons se movimentam de forma aleatória até serem capturados pelas armadilhas de buracos ou até mesmo, serem recapturados diretamente pelas armadilhas de elétrons, liberando um fóton de energia, enquanto que os buracos, simultaneamente aos elétrons, movimentam-se na banda de valência até serem capturadas pelas armadilhas de buraco com energia superiores a da banda de valência (MONTEIRO, 2005; MATSUSHIMA, 2010; LEAL, 2011).

Ambos os processos de captura, acontecem em estados de energia não permitidos ou metaestáveis, localizados na banda proibida. Estas armadilhas localizam-se a uma determinada profundidade no estado metaestável, para que se possa evitar por um longo período de tempo, o escape do elétron ou do buraco, até que um aquecimento proposital possa liberar um dos dois ou ambos.

Figura 3. Diagrama esquemático de excitação e estimulação térmica em um cristal TL.



Fonte: MONTEIRO (2005), adaptado.

No terceiro estágio, caracterizado pela luminescência termicamente estimulada, apresenta-se o resultado do efeito deste aquecimento no cristal. Quando da absorção desta energia pelos elétrons armadilhados, estes, buscam retornarem novamente para a banda de condução passando-se a movimentar-se pelo cristal até que novamente haja a recombinação com os buracos armadilhados, emitindo desta forma um fóton TL, ou podendo ser novamente capturado por outra armadilha de elétrons. Se as armadilhas de buracos forem mais rasas, estas escapam antes dos elétrons e vão para a banda de valência. Nesta banda, elas podem movimentar-se pelo cristal até se recombinarem novamente com os elétrons armadilhados, emitindo também desta forma um fóton TL (KNOLL, 2000; CASTRO, 2004; OLIVEIRA, 2008; LEAL, 2011).

A ocupação dos níveis de energia é calculada pela Equação 1, denominada de função Densidade de estado conforme SOUZA (2008).

$$N(E) = Z(E) \times f(E) \quad (1)$$

$N(E)$  representa a densidade de estados de energia ocupados,  $Z(E)$  a densidade de estados de energias disponíveis e  $f(E)$  a função distribuição de Fermi-Dirac, dada pela Equação 2 (CAMPOS, 2009).

$$f(E) = \frac{1}{e^{[(E-E_f) / k \times T] + 1}} \quad (2)$$

Nesta equação,  $E_f$  é a energia do nível de Fermi,  $T$  é a temperatura absoluta [K] e  $k$  é a constante de Boltzmann [ $1,381 \times 10^{-23}$  J/K no S.I].

Para se avaliar os picos de emissão em diferentes temperaturas, leva-se em consideração a energia de ativação ( $E$ ) que os elétrons necessitam para retornar à banda de condução, admitindo-se que a probabilidade de um elétron escapar desta armadilha obedece à lei de Arrhenius, que é dada pela Equação 3 (BOS, 2001; JUNIOR, 2008; CAMPOS, 2009; MATSUSHIMA, 2010).

$$p(T) = s(T) \times e^{-(E / k \times T)} \quad (3)$$

Onde  $p(T)$  é a probabilidade por unidade de tempo de um elétron ser liberado da armadilha,  $s(T)$  é a frequência de vibração da rede no local aonde o elétron se encontra aprisionado em sua armadilha, cujo valor varia de  $10^{12} - 10^{14}$  ( $s^{-1}$ ), com o aumento da temperatura ambiente, maior será a probabilidade de este elétron adquirir energia suficiente para retornar a banda de condução,  $k$  é a constante de Boltzmann ( $k = 8,617 \times 10^{-5}$  eV/K) e  $T$  a temperatura absoluta ( $K$ ).

Conforme Monteiro (2005), a Equação 4, expressa o tempo de meia-vida ( $\tau$ ) da probabilidade desse elétron escapar de sua armadilha.

$$\tau = 0,693 \times P^{-1} \quad (4)$$

A solução da equação de Schroedinger para elétrons que estão submetidos periodicamente à variação de potenciais elétricos está associada a determinadas faixas de energia. A esta faixa de energia, aonde os elétrons não podem estar, foi caracterizada como banda ou zona proibida (BP), para os demais valores de energia constituem-se as bandas ou zonas permitidas (TIPLER; LLEWELLYN, 2001).

### **2.3. Utilização de Dosímetros Termoluminescentes na Dosimetria Ambiental**

Os TLDs estão sendo cada vez mais utilizados em todas as áreas da dosimetria das radiações ionizantes, tais como: verificação dos sistemas de tratamento e planejamento para irradiações terapêuticas [D'ANGELO et al., (1999)], ambiental [DAVIS, (2003)], medição com feixes de elétrons [BILSKI et al., (2010)], dosimetria "in vivo" [VEIGAS, (2003); LEAL, (2011)], pessoal [MOLYVDA-ATHANASOPOULOU et al., (2011); SZEWCZAK et al., (2013)], com nêutrons [NEDAIE et al., (2014)] e com prótons [ZULLO et al., (2010); RAH et al., (2012)].

No Brasil, os TLDs mais utilizados em trabalhos desenvolvidos na dosimetria ambiental, são: (a) o  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  (sulfato de cálcio dopado com disprósio), (b)  $\text{LiF}$  (fluoreto de lítio) e (c) o  $\text{CaF}_2$  (fluoreto de cálcio), por possuírem características apropriadas para este tipo de monitoração (OLIVEIRA, 2005; CALCINA, 2006).

Na Tabela 4, estão listados os principais materiais termoluminescentes utilizados na dosimetria ambiental com suas respectivas características. Para o monitoramento dos municípios de São José de Espinharas, São Mamede, São José do Sabugi e dos municípios que foram usados como controles, ou seja, Patos e Santa Luzia, foi escolhido o LiF: Mg, Ti (TLD-100), devido ao fato destas áreas apresentarem níveis diferenciados de radiação ambiental em decorrência da existência de uma jazida de urânio já mapeada pela NUCLEBRAS, como também, as vantagens associadas ao TLD-100 em relação aos demais dosímetros termoluminescentes. Tais vantagens são: (a) seu espectro de emissão, bastante amplo; (b) seu desvanecimento, considerado desprezível; (c) não apresenta sensibilidade à luz ambiente, (d) forma física variada e (e) por medir baixas doses, com limites mínimos de detecção na ordem de 500  $\mu\text{Gy}$ , dentre outras, o que confere ao TLD-100 propriedades positivas para seu uso nesta monitoração

**Tabela 4.** Características dos dosímetros termoluminescentes.

PROPRIEDADES	MATERIAIS TERMOLUMINESCENTES				
	LiF TLD - 100	CaF <sub>2</sub> :Dy TLD - 200	CaF <sub>2</sub> :Mn TLD - 400	Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> :Mn TLD - 800	CaSO <sub>4</sub> :Dy TLD - 900
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	2,64 ~ 1,2 (Pó)	3,18	3,18	~2,4 (Pastilhas) ~ 1,2 (Pó)	2,61
N° Atômico Efetivo	8,2	16,3	16,3	7,4	1,55
Espectro de Emissão TL (Å)	3.500 - 6.000	4.835 - 5.765	4.400 - 6.000	5.300 - 6.300	4.800 - 5.700
Temperatura do Pico Principal TL	195°C	180°C	260°C	200°C	220°C
Eficiência Relativa ao <sup>60</sup> Co	1,0	30	10	0,15	30
Resposta da Energia para 30 KeV do <sup>60</sup> Co	1,25	~ 12,5	~ 13	0,9	~ 12,5
Intervalo de Uso	mR - 3x10 <sup>5</sup> R	10 $\mu$ R – 10 <sup>6</sup> R	mR - 3x10 <sup>5</sup> R	50 mR - 3x10 <sup>6</sup> R	$\mu$ R – ~ 10 <sup>5</sup> R
Desvanecimento	Desprezível (5% ao ano)	10% em 24 horas 16% em 16 dias	10% em 16 horas 15% em 2semanas	5% em 3meses	2% em 1mês 8% em 6meses
Sensibilidade a Luz Ambiente	Não	Sim	Sim	Não	Sim
Formas Físicas	Pó, Teflon, Encapsulado em Vidro	Pó, Cristais, Bulbos de Vidro	Pó, Encapsulado em Vidro	Pó, Teflon, Pastilhas	Pó, Teflon

Fonte: ANTÔNIO FILHO (1982), CAMPOS (1998), BATISTA (2011).

As características atribuídas ao TLD-100 devem-se ao fato deste ser oriundo da fusão homogênea do fluoreto de lítio, fluoreto de magnésio, fluoreto de lítio e fluoreto de lítio e titânio, com aproximadamente 180 ppm de  $Mg^{+2}$  e 10 ppm de  $Ti^{+4}$  como impurezas ativadoras (MELLO, 2010), apresentando dimensões de 3,2 x 3,2 x 0,9 mm<sup>3</sup>, o que permite sua utilização regularmente no mapeamento radiométrico de áreas anômalas a nível mundial, como também na investigação dos possíveis efeitos que possam trazer prejuízo ao ser humano decorrentes da interação da radiação ionizante com a matéria (MAURICIO et al., 1990; DELGADO et al., 1990; NUNES, 2008; MATSUSHIMA, 2010; LEAL, 2011).

## **2.4. Parâmetros Dosimétricos para o TLD**

As características intrínsecas que os TLD devem apresentar para ser empregado na dosimetria termoluminescente irá depender diretamente da sua aplicação. O desempenho de um TLD é medido utilizando-se algumas propriedades de sua resposta TL, tais quais: homogeneidade, reprodutibilidade, resposta em função da dose, linearidade, dependência energética e angular, sensibilidade à luz, curva de emissão, desvanecimento, entre outras.

### **2.4.1. Homogeneidade**

A homogeneidade de um dispositivo termoluminescente utilizado na dosimetria ambiental está associada à necessidade do mesmo apresentar sempre uma mesma resposta TL. Sendo desejável, que dentro de um mesmo lote de fabricação a sensibilidade dos mesmos não sejam diferentes para que não seja necessário se obter diferentes fatores de calibração.

### **2.4.2. Reprodutibilidade**

A reprodutibilidade de um TLD está diretamente associada a sua estabilidade, não devendo este, apresentar modificações físico-químicas durante os repetidos processos de tratamento térmico (“annealing”), irradiações e aos procedimentos térmicos de leitura do sinal TL. Um bom dosímetro deve ser reprodutível para as mesmas condições de análise. Isto

significa dizer que, durante o armazenamento prolongado do material, depois de repetidas irradiações e leituras, a sua curva de emissão permaneça inalterada em relação ao seu rendimento. Contudo, alguns fatores podem influenciar na reprodutibilidade do TLD, tais quais: a dose, o sistema de armazenamento e as condições de leitura dos dosímetros (MONTEIRO, 2005; MATSUCHIMA, 2010).

### 2.4.3. Resposta em Função da Dose

Neste caso, é importante que o material apresente uma resposta linear em função da dose num grande intervalo de tempo. Contudo, certos materiais termoluminescente podem apresentar respostas não lineares em relação à dose absorvida. As consequências destas não linearidades apresentam-se com o aumento (supralinearidade) ou com a redução (sublinearidade) da resposta TL. Sendo desta forma o grau de linearidade da resposta TL de um material TLD calculada pela Equação 5 (DATZ et al., 2011; HOROWITZ et al., 2011).

$$f(D) = \frac{F(D)}{D} \times \frac{D_1}{F(D_1)} \quad (5)$$

Onde:  $f(D)$  é o grau de linearidade da resposta, neste caso, adimensional;  $F(D)$  é a resposta obtida para a dose  $D$ ;  $F(D_1)$  é a resposta para a dose  $D_1$  e  $D_1$  é a menor dose obtida como resposta dentro do intervalo de linearidade.

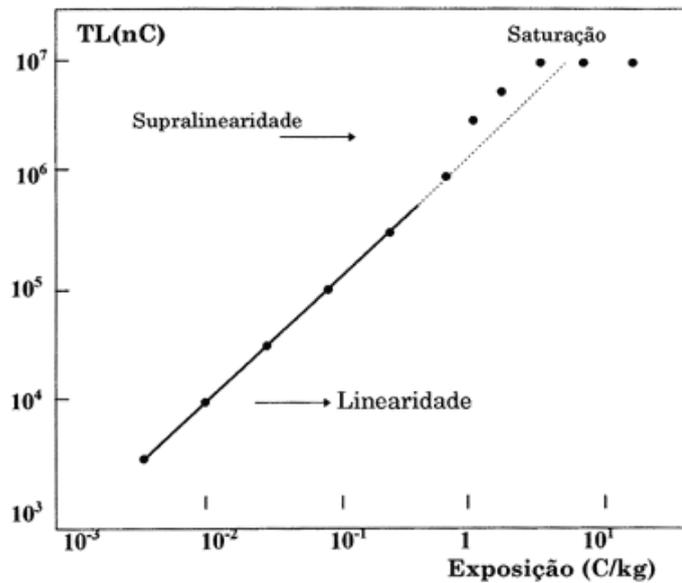
A Figura 4 representa uma curva esquemática da resposta TL em função da dose absorvida. Das regiões apresentadas nesta Figura 4, destaca-se principalmente a região linear, por ser esta a de maior interesse para o estudo da dosimetria em geral, por existir nesta região uma grande proporcionalidade da resposta TL em função da dose, mesmo que a dose seja muito pequena (nível ambiental natural) (BARSANELLI, 2006; MONTEIRO, 2005).

Em seguida, observa-se a região supralinear como também a região de saturação respectivamente. Na região de saturação as armadilhas encontram-se totalmente preenchidas de tal forma que a interação da radiação com o material TL não será mais detectada.

Pode-se observar também nesta figura, que o intervalo de linearidade ocorre quando  $10^{-3} < f(D) \leq 10^0$ , o intervalo de supralinearidade ocorre para  $10^0 < f(D) \leq 10^1$  e a região de saturação ocorre quando o grau de linearidade for superior a  $f(D) \geq 10^1$ . É importante

salientar, que em alguns casos, segundo Mckeever (1985), a região supralinear precede a região linear.

**Figura 4.** Curva de resposta termoluminescente (TL) em função da dose absorvida.



nC: nano Coulomb; C/kg: Coulomb por quilograma.

Fonte: CAMPOS (1998), MATSUSHIMA (2010).

Contudo, a maioria dos materiais termoluminescentes apresentam uma não linearidade para doses acima de um determinado valor. A supralinearidade ou sublinearidade, não impossibilita o uso dos TLDs, mas requer correções e calibrações cuidadosas para que os erros nas medidas sejam minimizados.

Para os TLDs mais utilizados na dosimetria ambiental, a Tabela 5, apresenta a resposta TL linear em função da dose recebida por esses dosímetros.

**Tabela 5.** Intervalo de dose das regiões lineares de alguns TLDs

MATERIAL TERMOLUMINESCENTE	INTERVALO LINEAR (Gy)
TLD-100 (LiF: Mg,Ti)	5,00E-05 até 1
TLD-100H (LiF: Mg, Cu, P)	1,00E-06 até 10
TLD-800 (Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> : Mn)	1,00E-04 até 3
TLD-200 (CaF <sub>2</sub> : Dy)	1,00E-05 até 10
TLD-900 (CaSO <sub>4</sub> : Dy)	1,00E-06 até 30

Fonte: IAEA (2007).

Observa-se nesta Tabela 5 que o TLD-900 (CaSO<sub>4</sub>:Dy) apresenta o maior intervalo de dose linear em relação aos demais dosímetros termoluminescentes. Entretanto, o TLD-100 (LiF: Mg,Ti), utilizado nesse trabalho, admite medir doses no intervalo de 500 µGy a 100 Gy.

Conforme Barsanelli (2006), Nunes (2008) e Leal (2011), a região linear do TLD-100 apresenta uma resposta TL que varia aproximadamente de 5x10<sup>-5</sup> até 1 Gy. Quando a dose varia de mais de 1 até 500 Gy, a resposta TL classifica-se como supralinear, enquanto que a saturação do sinal ocorre a uma dose de aproximadamente 1 kGy.

#### 2.4.4. Linearidade

A função linearidade é determinada pelo rendimento termoluminescente ( $Y_{TL}$ ), que é um número adimensional, definido como o quociente da energia emitida na forma de luz ( $E_{TL}$ ) pelo produto da massa do detector ( $m$ ) pela dose absorvida ( $D$ ), conforme a Equação 6 (MONTEIRO, 2005).

$$Y_{TL} = \frac{E_{TL}}{m \times D} \quad (6)$$

Na faixa onde  $Y_{TL}$  é constante, a resposta TL será linear, podendo ser escrita pela Equação 7:

$$Q_{TL} = a_r \times Y_{TL} \times D \quad (7)$$

Onde:  $Q_{TL}$  é o sinal termoluminescente produzido pelo fósforo,  $a_r$  é o fator de proporcionalidade,  $Y_{TL}$  é o rendimento TL e  $D$  a dose absorvida (MONTEIRO, 2005).

#### 2.4.5. Dependência Energética

É uma característica intrínseca de cada material TL, é desejável que o TLD não apresente variação na sua resposta TL para diferentes energias. A dependência energética pode ser definida como a medida da energia absorvida pelo TLD, para posterior comparação

com a energia absorvida por um material de referência (normalmente o ar), quando submetido a condições idênticas de exposição aos fótons, podendo ser calculada pela Equação 8. (MONTEIRO, 2005; BARSANELLI, 2006; CUNHA, 2006; NASCIMENTO, 2011).

$$S_E(E) = \frac{(\frac{\mu_{en}}{\rho})_{Mat}}{(\frac{\mu_{en}}{\rho})_{Ref}} \quad (8)$$

Onde:  $(\frac{\mu_{en}}{\rho})_{Mat}$  é o coeficiente de absorção de energia do material TL,  $(\frac{\mu_{en}}{\rho})_{Ref}$  é o coeficiente de absorção de energia do material de referência adotado para o sistema.

Na prática, a dependência energética pode ser obtida pela resposta relativa ( $RER_E$ ) em função da resposta do material irradiado na energia de referência, expressa pela Equação 9 (CAMPOS, 1998; CUNHA, 2006).

$$RER_E = \frac{S_E(E)}{S_E(Ref)} \quad (9)$$

Onde:  $S_E(E)$  é a resposta do material irradiado e  $S_E(Ref)$  é a resposta do material de referência.

A absorção de energia feita pelo material TL depende propriamente da forma que a energia foi depositada (produção de pares, espalhamento Compton ou efeito fotoelétrico). O processo dominante irá depender da energia do fóton, como também, do número atômico efetivo do material ( $Z_{eff}$ ) (Equação 10). Interações fotoelétricas variam aproximadamente com  $Z_{eff}^3$ , sendo mais característicos para fótons de baixa energia, o efeito Compton é proporcional a  $Z_{eff}/M$  (sendo M a massa molar do material) tornando-se dominante apenas quando a energia crescer. A produção de pares varia com  $Z_{eff}^2$ , sendo importante apenas para energias maiores que 1,022 MeV. A faixa de energia de predominância de cada um destes efeitos é governada pelo  $Z_{eff}$  do material (FURETTA, 2003).

$$Z_{eff} = \sqrt[x]{a_1 Z_1^x + a_2 Z_2^x + a_3 Z_3^x + \dots + a_n Z_n^x} \quad (10)$$

$$a_i = \frac{n_i(Z_i)}{\sum_i n_i(Z_i)} \quad e \quad Z_i^x = n_i^x$$

Onde:  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  e  $a_n$  são as frações de elétrons pertencentes aos números atômicos  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$  e  $Z_n$  de cada elemento respectivamente,  $n_i$  é o número de elétrons do elemento e  $x$  é uma constante de valor 2,94.

#### 2.4.6. Dependência Angular

A dependência angular do TLD está associada ao ângulo formado pela radiação quando de sua incidência no cristal. Esta dependência torna-se insatisfatória, quando o ângulo formado pela radiação incidente, afetar a absorção de energia do cristal, interferindo dessa forma na resposta TL do material. Nas aplicações práticas, o TLD é sempre colocado em algum suporte. Não se deve esquecer que a dependência angular da resposta TL de um TLD, assim como a dependência energética, também depende do tipo e geometria dos materiais destes suportes (NASCIMENTO, 2011).

#### 2.4.7. Sensibilidade

A sensibilidade do TLD-100 depende da composição do material e do histórico do tratamento térmico, sendo definida formalmente como sendo a razão da intensidade do sinal TL por unidade de dose absorvida. O sinal armazenado pelo material nas condições ambientais dependerá dos seguintes parâmetros: do lote de dosímetros TL, da dose administrada, do tempo de tratamento térmico, da temperatura utilizada na leitura e do espectro de resposta da fotomultiplicadora usada durante a leitura. (JUNIOR, 2008; LEAL, 2011).

A sensibilidade das pastilhas diminui com o tempo e com o uso, havendo uma perda de aproximadamente 1,5% por 10 Gy de dose absorvida (BARSANELLI, 2006). A Equação

11 define a sensibilidade relativa, comparando o sinal TL do material com a resposta TL do LiF:Mg,Ti (Fluoreto de Lítio dopado com Magnésio e Titânio) que possui sensibilidade igual a um (1) (MATSUSHIMA, 2010).

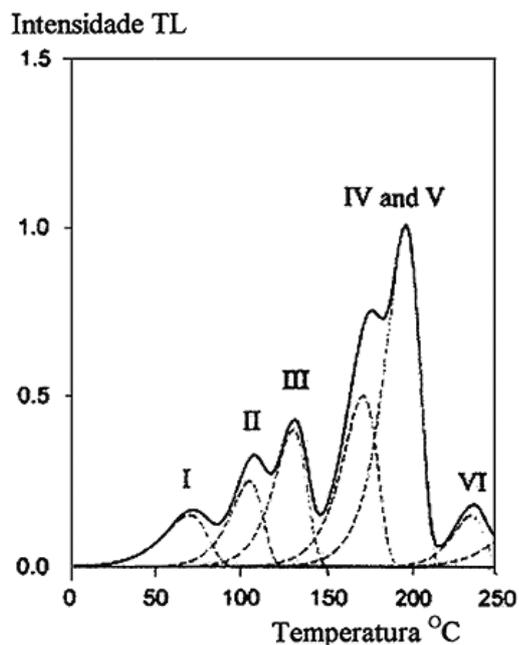
$$S(D) = \frac{R_{TL}}{D} \left( \frac{\mu C}{Gy} \right) \quad (11)$$

Onde:  $S(D)$  é a sensibilidade relativa do material TL;  $R_{TL}$  é a resposta TL do material e  $D$  é a dose de radiação a que o material TL é submetido.

#### 2.4.8. Curva de Emissão

A curva de emissão TL, representa a intensidade de luz emitida pelo TLD em função da temperatura ou da taxa de aquecimento ao qual este material é submetido. A Figura 5 apresenta a curva de um LiF (TLD-100) com seus seis diferentes picos de emissão, observados a uma variação de temperatura que pode chegar até 250°C. (BARSANELLI, 2006; OLIVEIRA, 2008; BATEL, 2009).

**Figura 5.** Curva de luminescência característica do TLD-100.



TLD: Dosímetro Termoluminescente; TL: Termoluminescente.

Fonte: KRON (1994).

Os picos IV e V da curva característica do TLD-100 são os mais utilizados na avaliação da dose ambiental por serem os que mais acumulam energia dentro do cristal e seus desvanecimentos se dão a altas temperaturas, preservando desta forma a energia acumulada no decorrer do tempo (Tabela 6). O pico de número V é o mais importante de todos para o TLD-100, sendo este denominado, pico dosimétrico do material.

**Tabela 6.** Características dos picos da curva TL do LiF: Mg, Ti (TLD-100).

<b>PICO</b>	<b>TEMPERATURA DE EMISSÃO</b>	<b>VIDA MÉDIA (20°C)</b>
<b>I</b>	65	10 min
<b>II</b>	120	1 dia
<b>III</b>	160	3 meses
<b>IV</b>	195	8,5 anos
<b>V</b>	210	80 anos
<b>VI</b>	275	100 anos

**Fonte:** BATEL (2009).

#### **2.4.9. Desvanecimento do Sinal Luminescente**

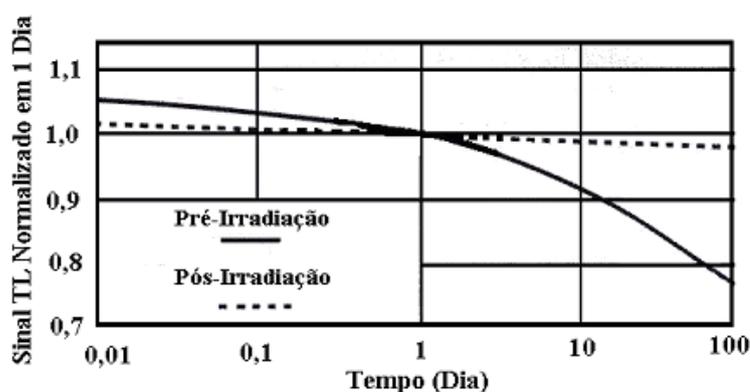
O desvanecimento do sinal TL, conhecido pela denominação do inglês, fading, que corresponde à liberação de portadores de carga devido a uma excitação térmica indesejada, representa uma característica intrínseca a todo TLD (LEAL, 2011). O parâmetro responsável por este desvanecimento na maioria dos casos é o aumento da temperatura. As armadilhas mais rasas desvanecem mais rapidamente do que as mais profundas, por possuírem uma grande probabilidade dos elétrons se transferirem para o estado fundamental por qualquer transição vibracional (CALCINA, 2006). Outros fatores que podem influenciar no desvanecimento do sinal TL é o caso da composição química, tipos de dopantes do material, estrutura do cristal, tratamento térmico, condições climáticas e de luz durante a estocagem. Salientando que, um dosímetro TL irradiado nunca reterá 100% das suas cargas armadilhadas em função dos fatores ao qual foi submetido.

Conforme Nascimento (2011), a curva característica do desvanecimento diminui de forma exponencial nas primeiras 24 horas (podendo ocorrer também às vezes em 48 horas), para depois tornar-se linear. Na necessidade de se efetuar uma correção no desvanecimento, os TLDs são armazenados por um período médio de 24 horas antes da leitura, pois, quanto

maior for esse tempo entre a irradiação e a leitura, mais rápido aparecerá o desvanecimento. Outro procedimento utilizado é o pré-aquecimento para eliminar os picos de baixa temperatura, por ser este um efeito termodinâmico as armadilhas de baixas temperaturas são as mais afetadas.

A Figura 6 apresenta o desvanecimento do TLD - 100 (LiF: Mg, Ti) antes e depois da irradiação. Nessa Figura, observa-se que o desvanecimento após a irradiação pode ser considerado desprezível.

**Figura 6.** Desvanecimento do LiF: Mg, Ti antes e depois de irradiado.



Fonte: MELLO (2010), LEAL (2011).

Para os tipos de TLDs existentes no mercado, a Tabela 7, apresenta as diferenças entre suas estabilidades no decorrer do tempo. O LiF: Mg, Cu, P e o  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ , apresentam um desvanecimento inferior a 5% ao ano, o  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Mn}$  e o BeO, apresentam desvanecimento de até 7% em 2 meses e os demais chegam a perder até 25% em 4 semanas (IAEA, 2007).

**Tabela 7.** Desvanecimento de alguns materiais dosimétricos.

TIPO DE TLD	DESVANECIMENTO
LiF: Mg,Ti	Desprezível
LiF: Mg, Cu, P	< 5% por ano
$\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Mn}$	5% em 2 meses
$\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$	3% por ano
$\text{CaSO}_4:\text{Dy}$	7 - 30% em 6 meses
$\text{CaF}_2:\text{Dy}$	25% em 4 semanas
BeO	7% em 2 semanas

Fonte: IAEA (2007).

## 2.5. Grandezas Radiológicas

As grandezas utilizadas para quantificar a radiação ionizante basearam-se na quantidade total de energia depositada, geralmente em uma massa definida de material. A Comissão Internacional sobre Unidades e Medidas de Radiação (ICRU), classifica as grandezas físicas como sendo indiretamente mensuráveis (XAVIER et al., 2006).

### 2.5.1. Dose Absorvida ( $D$ )

Conforme Cember; Johnson (2009), esta grandeza estabelece uma relação entre a energia absorvida e a massa do volume de material atingido. Sendo assim, para melhor especificar as variações espaciais como também as variações na quantidade de energia absorvida em diferentes pontos do volume deste material, este parâmetro, passa a ser definido em função apenas de um único ponto de interesse. Conforme a ICRP (1991), a dose absorvida é definida como sendo o quociente entre a energia média depositada,  $\overline{dE}$ , pela radiação incidente em um volume elementar de matéria de massa  $dm$ , num volume finito,  $V$ , calculada pela Equação 12.

$$D = \frac{\overline{dE}}{dm} \quad (12)$$

A unidade de dose absorvida no sistema internacional (S.I) de unidades é o joule por quilograma ( $J.kg^{-1}$ ), que representa o Gray (Gy).

### 2.5.2. Dose Equivalente ( $H_T$ )

Como os efeitos da radiação podem variar em função do tipo, para uma mesma dose absorvida, a grandeza Dose Equivalente ( $H_T$ ), utilizada para propósitos de Proteção Radiológica, equivale à dose absorvida num órgão ou tecido do corpo humano, quando introduzido o fator de qualidade de radiação  $w_R$ , em substituição à RBE (eficácia biológica relativa), pela eficácia biológica das partículas carregadas que geram tal dose. Esta grandeza

(Equação 13), expressa o produto da dose absorvida média por um órgão T, devida à radiação R ( $D_{T,R}$ ), pelo fator de qualidade  $w_R$  (BATEL, 2009; FERREIRA, 2010).

$$H_T = D_{T,R} \times w_R \quad (13)$$

Conforme a ICRP em sua publicação de número 60 de 1991, quando o campo de radiação for composto por diferentes tipos de radiação com valores diferentes para o fator de qualidade ( $w_R$ ), a grandeza dose equivalente ( $H_T$ ) será o produto deste fator de qualidade pela dose absorvida média em um órgão T devida à radiação R ( $D_{T,R}$ ), Equação 14 (FILHO et al., 2004; CASTRO, 2005).

$$H_T = \sum_R D_{T,R} \times w_R \quad (14)$$

A unidade de dose equivalente é Sivert (Sv). Esta unidade foi adotada para lembrar que se trata de uma dose “modificada”.

### 2.5.3. Dose Efetiva ( $H_E$ )

É a soma da dose equivalente absorvida por todos os órgãos ou tecido T do corpo humano, multiplicado pelos seus respectivos fatores de conversão tecidual. De acordo com a ICRP de 1991 a dose efetiva é caracterizada pela Equação 15.

$$H_E = \sum_T w_T \times H_T \Leftrightarrow H_E = \sum_T w_T \sum_R w_R \times D_{T,R} \quad (15)$$

“ $H_E$ ” representa a dose efetiva em Sivert (Sv),  $w_T$  é o fator de qualidade,  $H_T$  é a grandeza dose equivalente e  $D_{T,R}$  é a dose média absorvida por um órgão T devida à radiação R.

## 2.6. Monitoração de Áreas com Elevados Níveis de Radioatividade Ambiental

Dos vários levantamentos radiométricos ambientais que vêm se desenvolvendo em todo mundo, destacaram-se: (a) Ramsar no Irã, onde estes níveis de radiação estão associados ao  $^{226}\text{Ra}$  e seus produtos de decaimento, que afloraram para a superfície por fontes de águas termais (GHIASSI-NEJAD et al., 2002); (b) Yang Jiang na China, sendo este, devido à presença de finas partículas monazíticas que se desprendem das rochas graníticas, contribuindo desta forma, para a formação do solo (WEI et al., 1990); (c) Kerala na Índia, estando este, relacionado à presença de areia monazítica, que é basicamente constituída por fosfatos de tório e óxidos de terras raras com traços de urânio (EISENBUD; GESELL, 1997) e (d) Fukushima no Japão, devido ao acidente nuclear ocorrido em 2011 (WHO, 2012); entre outras.

No Brasil, dentre as áreas que apresentam altos níveis de radioatividade natural, podemos destacar a praia de Guarapari, porção sul da região metropolitana de Vitória - ES, constituída basicamente por areias monazíticas com elevados níveis de radiação, chegando aproximadamente a  $175 \text{ mSv.a}^{-1}$  (AQUINO, 2010). No planalto de Poços de Caldas em Minas Gerais, foi encontrado elevados níveis de radiação natural, com uma taxa de dose média de  $250 \text{ mSv.a}^{-1}$  (LIMA, 1996). Foi encontrado também, elevadas concentrações de urânio, variando de 30 a  $530 \text{ mg.kg}^{-1}$  e de tório, variando de 1 a  $30 \text{ mg.kg}^{-1}$  em rochas fosfáticas localizadas na faixa costeira do Nordeste do Brasil, estendendo-se desde a costa pernambucana até o extremo norte da Paraíba, com uma extensão de 150 km e largura média de 4 km (AMARAL et al., 2005).

Foi encontrado por Santos Júnior (2005), em estudos desenvolvidos na região agreste do estado de Pernambuco, elevadas concentrações de urânio que ficou em torno de  $9.100 \text{ mg.kg}^{-1}$  com 0,42% (em volume) de  $\text{U}_3\text{O}_8$ , totalizando 3.250 vezes superior ao teor médio do urânio na crosta continental, que é  $2,8 \text{ mg.kg}^{-1}$  em amostras de rochas cálcio-silicáticas anfíbolíticas.

Atualmente, em estudos desenvolvidos no Estado da Paraíba por Souza et al., (2012), no Sítio Bravo no município de Pocinhos, foi encontrada uma anomalia, contendo concentrações significativas de  $^{238}\text{U}$  em amostras de rochas analisadas nesta região, onde o valor médio de  $\text{U}_3\text{O}_8$  nas rochas foi estimado em  $1.800 \text{ mg.kg}^{-1}$ , ficando este 643 vezes acima do teor médio do urânio na crosta continental. Já no município de São José de Espinharas em

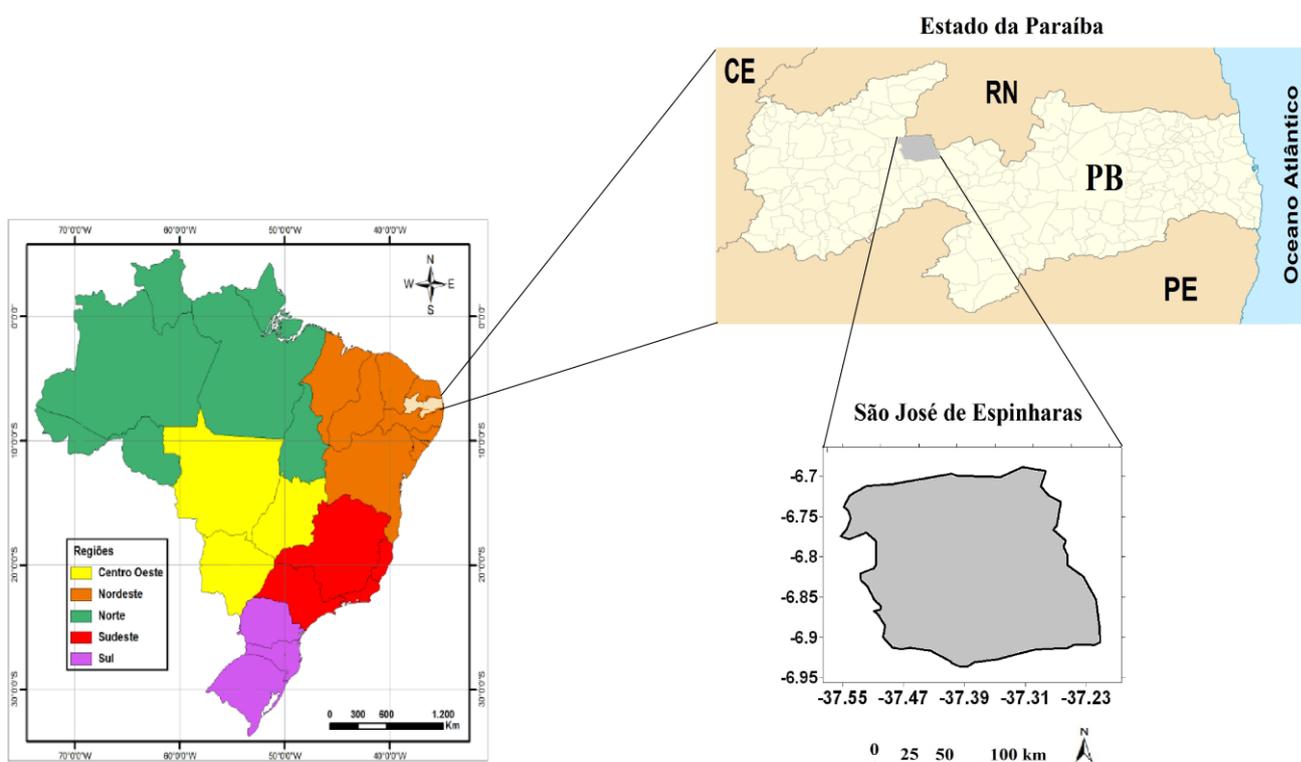
trabalho desenvolvido por Paiva (2008), ficou constatado que as concentrações de  $^{238}\text{U}$  variaram de 0 à  $559 \text{ mg.kg}^{-1}$ , de  $^{232}\text{Th}$  variando de 7 à  $2.070 \text{ mg.kg}^{-1}$  e a do  $^{40}\text{K}$  variando de 0 à  $7 \text{ mg.kg}^{-1}$ . A concentração de urânio encontrada no município de São José de Espinharas, mostrou-se superior a da mina de urânio de Mary Kathleen localizada na Austrália com variação de 27 a  $110 \text{ mg.kg}^{-1}$  (PAIVA, 2008) como também, a do distrito Uranífero de Mkuju localizada no sul da Tanzânia com concentração média de  $464 \text{ mg.kg}^{-1}$  (MOHAMMED; MAZUNGA, 2013).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Área de Estudo

A área de estudo (Figura 7), está localizada no município de São José de Espinharas, região Oeste do Estado da Paraíba, Meso-Região do Sertão Paraibano e Micro-Região de Patos.

**Figura 7.** Mapa do Brasil com suas regiões e localização da área de estudo.



**Fonte:** Próprio autor.

Este município foi escolhido por apresentar uma jazidas de urânio com 12 toneladas de  $U_3O_8$ , possuindo um teor médio de  $1.200 \text{ mg.kg}^{-1}$  de urânio, com reserva cubada bastante inferior em relação ao distrito Uranífero de Lagoa Real (Bahia), já em fase de produção, e o de Itataia (Ceará). Esta jazida foi mapeada pelas Empresas Nucleares Brasileiras de Mineração S/A (NUCLAN-NUCLEBRÁS) entre os anos de 1977 a 1982 (DNPM, 2009).

O município possui uma área de 732,80 km<sup>2</sup> e insere-se nas folhas Pombal (SB.24-Z-A-VI) e Serra Negra do Norte (SB.24-Z-B-IV), com sede vinculada as coordenadas geográficas S 06°50'50" e WGr 37°19'33" e altitude de 210 m. De acordo com Ross (1990), o relevo dessa região é caracterizado pelas extensas depressões sertanejas que se estende por todos os municípios circundantes a Patos, inclusive o de São José de Espinharas. A topografia do município de São José de Espinharas é caracterizada por um relevo ondulado a suavemente ondulado, apresentando de baixa a média declividade. As áreas situadas na porção sudeste e extremo sul apresentam um relevo ondulado à fortemente ondulado como nas serras de Carnaúba e do Olho d'água onde ocorrem cotas de 580 metros, e, na porção sudoeste as serras do Feijão, Macuna, Currais, Resende, Bonita, Trancos, Quintos, Madeira e do Jardim. Já nas serras do Feijão, Bonita e dos Trancos as cotas chegam aproximadamente a 600 metros (PRODEEM, 2005). A constituição do solo deste município é do tipo Luvissole Crômico Órtico Típico conforme a nova classificação da EMBRAPA (CAMPOS; QUEIROZ, 2006).

Paiva (2008) descreveu a vegetação deste município como sendo do tipo Caatinga-Sertão, similar às regiões semiáridas do ecossistema nordestino, com uma cobertura heterogênea formada por vegetais xerófitas, em geral decíduas, espinhosas, enroscadas com arbustos, representando-se basicamente por: bromeliáceas (*Bromeliaceae* Juss) e cactáceas (*Opuntia cochenillifera*), principalmente nas áreas rochosas, tais quais: macambira (*Bromélia laciniosa*), mandacaru (*Cereus jamacaru*), coroa de frade (*Melocactus bahiensis*), facheiro (*Pilosocereus pachycladus*), jurema preta (*Mimosa tenuiflora* (Benth.)), catingueira (*Caesalpinia pyramidalis* Tul.) e angico (*Anadenathera macrocarpa* (Benth.)).

O município encontra-se inserido nos domínios da bacia hidrográfica do Rio Piranhas, sub-bacia do Rio Espinharas. Seus principais tributários são: o Rio Espinhara e os riachos: do Trapiá, dos Bois, Cauassú, da Caiçara, Sombrio, das Emas, Timbaúba, da Aguilhada, Pitombeira, do Tapuio, Cachoeira, Fundo, das Melancias, dos Louros, do Caluste, da Roça, do Cabrito, do Negro, Santa Rita, dos Ovos e Jatobá. Os principais corpos de acumulação são os açudes: Novo, Sombrio, Flores e Maria Paes, além das lagoas Grandes e Jerimum. Todos os cursos d'água têm regime de escoamento intermitente e o padrão de drenagem é o dendrítico (PRODEEM, 2005).

Tanto o Nordeste brasileiro, como o estado da Paraíba, possuem climas predominantemente seco (semiárido e subúmido seco), em que mais de 80% do território apresenta-se com áreas susceptíveis à desertificação, como o Sertão e a região da Borborema (PAN-Brasil, 2004). Por estar situado no polígono das secas, o município de São José de

Espinharas, possui clima quente e úmido com chuvas de verão e outono. A pluviometria média anual é de 884,7 mm ocorrido no período 1962-1985, distribuída de forma irregular, onde 79% deste total se concentram em quatro meses, com temperatura média anual variando em torno de 28°C. Sua população varia de 3.855 à 6.010 habitantes, precisamente 4.760 habitantes, com apenas 1.617 habitantes na zona urbana.

A economia do município tem como principal suporte as atividades do setor Primário cuja participação no município varia entre 75,1 a 100%. Na agricultura se destacam as plantações de algodão, feijão, milho e arroz. Na pecuária as criações de bovinos e com menor participação, ovinos e na avicultura a criação de galináceos com produção de ovos (PRODEEM, 2005).

Paralelo ao estudo realizado no município de São José de Espinharas, também foram investigados os municípios de São Mamede (SM) e São José do Sabugi (SJS), além dos municípios controle de Patos (PT) e Santa Luzia (SL), por fazerem parte da mesorregião do sertão paraibano.

### **3.2. Sistemas de Medidas**

O sistema de medidas utilizado para determinação indireta da taxa de dose de radiação gama ao ar livre nos ambientes internos, pertence ao Laboratório de Dosimetria Termoluminescentes do Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste (CRCN-NE) subsidiária da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Sendo este, conforme a Figura 8, constituído basicamente de um forno da marca Heizung, modelo PTW-TLD-OFEN com capacidade para 150 (cento e cinquenta) detectores; um irradiador beta de  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  da marca Harshaw/Bircon com capacidade para 50 (cinquenta) detectores e uma leitora da marca Harshaw TLD, modelo QS 5500, alimentada por um fluxo constante de nitrogênio ultra puro e interligada a um computador, onde a interface foi realizada por intermédio do soft WinREMS (Windows based Radiation Evaluation and Management System) desenvolvido pela Electron Corporation.

**Figura 8.** Sistema de medidas utilizado para leitura dos TLDs.



TLDs: Dosímetros Termoluminescentes

(a) Irradiador, (b) Leitora e (c) Forno.

**Fonte:** Próprio autor.

### 3.3. Seleção e Calibração dos Dosímetros

A seleção dos TLDs iniciou-se com o tratamento térmico ou anilamento, cujo objetivo foi liberar toda a energia acumulada dentro do cristal, tendo em vista que, os mesmo são dispositivos reutilizáveis. Este procedimento foi realizado em um forno da marca Heizung, modelo PTW-TLD-OFEN. Logo iniciado o tratamento térmico, os TLDs foram submetidos a um aquecimento já pré-definido pelo fabricante a uma temperatura de 400°C durante uma hora (tratamento térmico de alta temperatura) com a finalidade de liberar as energias acumuladas nas armadilhas localizadas a grande profundidade no detector. Logo após, o programa reajusta automaticamente a temperatura para 100°C durante duas horas (tratamento térmico de baixa temperatura) com o propósito de eliminar as influências das armadilhas à baixa profundidade (MAURÍCIO et al., 1990; DELGADO et al., 1990; MIAH, 2004).

Após o tratamento térmico, todos os TLDs foram introduzido no Irradiador da marca Harshaw/Bircon e irradiados por uma fonte beta de  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  para em seguida serem levados à leitora de TLD da Harshaw modelo QS 5500 para geração dos coeficientes de correção de cada TLD (*ECC* - Element Correction Coefficients), conforme a Equação 16, com a finalidade de se selecionar aqueles dosímetros que melhor respondam a dose teórica.

$$ECC = \frac{\bar{Q}}{Q_n} \quad (16)$$

Onde  $\bar{Q}$  representa a média das cargas e  $Q_n$  o valor irradiado do TLD, ambos medidos em nC.

Os dosímetros que foram selecionados anteriormente, foram irradiados por uma fonte de  $^{137}\text{Cs}$  a uma dose de 5 mSv em kerma ar, para geração do fator de calibração da leitora de TLDs (*RCF* - Reader Calibration Factor) sendo este, calculado pela Equação 17. Onde  $D$  é o valor da dose teórica utilizada na irradiação dos dosímetros.

$$RCF = \frac{\bar{Q}}{D} \quad (17)$$

A dose absorvida no ar foi calculada pela Equação 18, utilizando-se dos fatores encontrados nas Equações 16 e 17.

$$D = \frac{Q \times Ecc}{RCF} \quad (18)$$

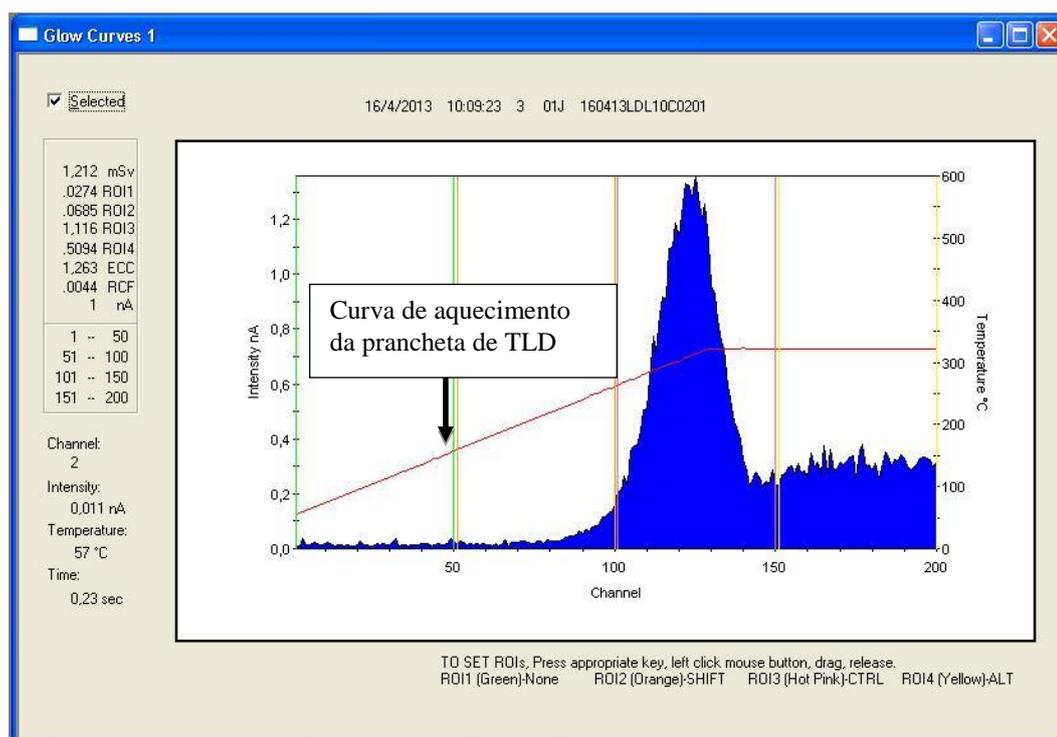
Posteriormente, os dosímetros foram numerados e acondicionados em triplicatas em pequenos sacos de polietileno e guardados em uma caixa de isopor totalmente revestida para impedir qualquer tipo de exposição dos mesmos.

### 3.4. Leitura dos Dosímetros Termoluminescentes

Para a aquisição das informações acumuladas nos TLDs quando de sua exposição nas residências dos municípios monitoradas, foram estes, anilados e posteriormente aquecidos

pela leitora de TLD da Harshaw partindo de uma temperatura de 50°C até chegar à temperatura de 320°C, variando a uma taxa de 10°C por segundo para que as informações contidas nos TLDs pudessem ser liberadas de forma contínua. A região de interesse (ROI) da curva de emissão utilizada ficou entre [1,150], conforme a Figura 9.

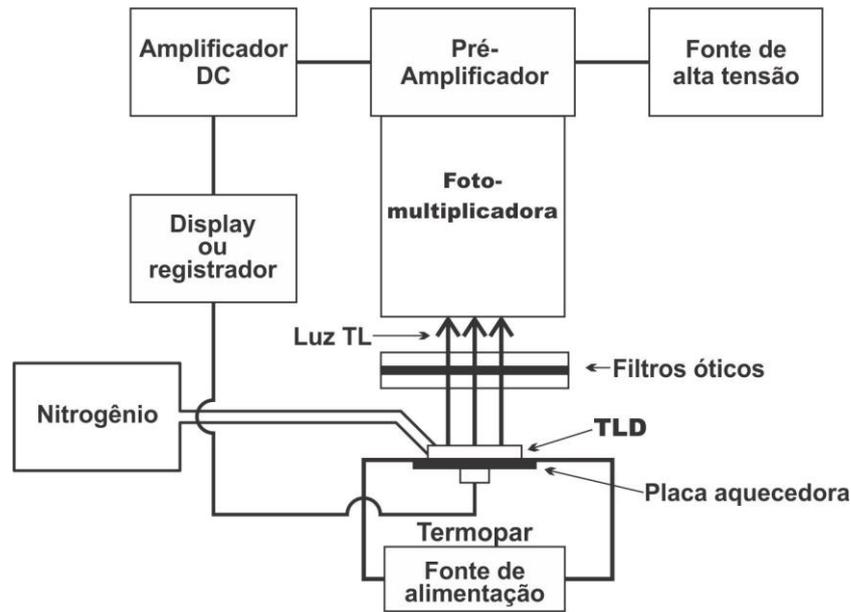
**Figura 9.** Curva de emissão do LiF: Mg, Ti (TLD-100).



**Fonte:** Próprio autor.

O esquema de funcionamento da leitora de TLD utilizada nesta pesquisa, encontra-se representada na Figura 10. A luz emitida pelo fósforo da composição do TLD passa através de um sistema óptico, que normalmente consiste de uma lente coletora e um filtro infravermelho. Esta luz é captada no fotocátodo da fotomultiplicadora, que ampliará o sinal recebido. O uso de filtros permite a discriminação da influência de sinais espúrios e da emissão de luz infravermelha por parte destes elementos submetidos a temperaturas elevadas (HOROWITZ, 1984). O sistema de leitura foi programado para realizar os testes de verificação do sinal de ruído da fotomultiplicadora e da luz de referência a cada dez leituras, sendo este procedimento realizado sobre fluxo contínuo do gás Nitrogênio Gasoso (N<sub>2</sub>) a uma pressão constante de 50 psi.

**Figura 10.** Esquema de Funcionamento da Leitora de TLD.



Fonte: TAUHATA (2003), adaptada.

### 3.5. Distribuição dos TLDs na Área de Estudo

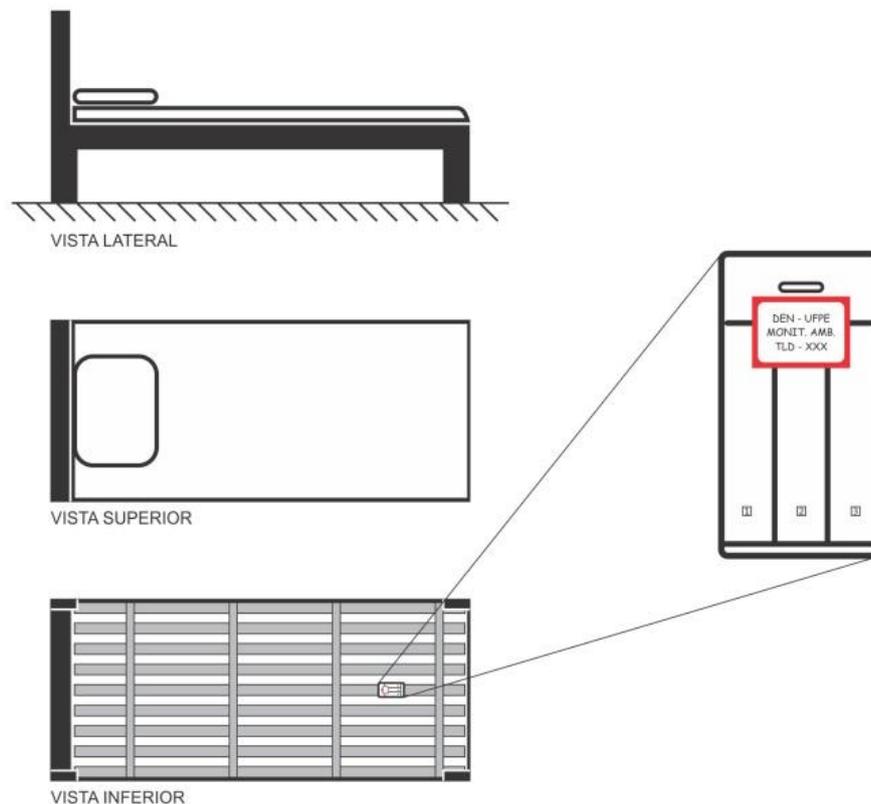
O arranjo experimental foi posicionado prioritariamente no ambiente de maior permanência dos habitantes dentro das residências investigadas, neste caso, os quartos, de forma a obter informações sobre os níveis de radioatividade natural, principalmente à noite, onde os indivíduos permanecem em média 8 horas, apresentando neste caso um maior isolamento térmico, e conseqüentemente, uma maior influência do radônio na avaliação da dosimetria gama ambiental.

Foram utilizados 534 TLDs, distribuídos em triplicatas, perfazendo um total de 178 pontos investigados, selecionados prioritariamente de forma sistemática em função da posição geográfica das residências para com a jazida de urânio de Espinharas - PB, assim como pela aceitação dos proprietários em participar do estudo. Além disso, as medidas foram realizadas em diferentes períodos dos anos de abril de 2012 a janeiro de 2015, de forma a verificar possível influência das estações inverno e verão, algo não observado na prática pela longa estiagem do período investigado.

Pode ser observado na Figura 11 o esquema ilustrativo do posicionamento dos TLDs nas residências. Os dosímetros foram afixados nas grades das camas, com uma das faces

voltada para o piso, o que garantiu integridade do material no recolhimento, tendo em vista sua dificuldade para localização e interferências de terceiros. Os TLDs permaneceram nesses ambientes por um período médio de 90 dias, sendo recolhidos após esse tempo, encaminhados e analisados no Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste (CRCN-NE) para ajustes e obtenção das doses equivalentes efetivas ambientais.

**Figura 11.** Instalação do conjunto de TLDs na grade da cama.



**Fonte:** Próprio autor

### 3.6. Cálculo da Taxa de Dose Dentro das Residências (indoor)

As taxas de doses médias “indoor” medidas nos quartos das residências dos municípios em estudo foram obtidas a partir das leituras dos TLD, que posteriormente foram convertidas em taxas de dose equivalente efetiva, utilizando-se da Equação 19, com parâmetros adaptados para a região de estudo em função das orientações da UNSCEAR (2008).

$$\dot{H}_E = \dot{D}_{in} \times T \times C_C \times OF_{in} \times 10^{-3} \quad (19)$$

$\dot{H}_E$  representa a taxa de dose equivalente efetiva ambiental ( $\text{mSv}\cdot\text{a}^{-1}$ );  $\dot{D}_{in}$  a taxa de dose absorvida indoor ( $\mu\text{Sv}\cdot\text{d}^{-1}$ );  $T$  o tempo de exposição dos dosímetros, estimado para os ambientes internos, como sendo um valor médio de 8 horas de permanência por dia nesses ambientes, o que representa um fator ocupacional de aproximadamente 0,33;  $C_C$  é o coeficiente de conversão ambiental, neste caso, 0,7 Sv/Gy;  $OF_{in}$  o fator de ocupação que é de 0,8, conforme aplicado mundialmente pela UNSCEAR (2008).

### 3.7. Tratamento Estatístico dos Resultados

Quanto ao tratamento estatístico dos resultados, os dados foram trabalhados de forma descritiva e inferencial, com aplicação de modelos de correlação e testes não paramétricos, como o teste de Kolmogorov-Smirnov com correção de Lilliefors, para avaliação do tipo de distribuição associada ao conjunto de dados e verificar possíveis influências da jazida de urânio no cálculo da taxa de dose gama equivalente efetiva dentro das residências.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Teste de Certificação e Validação da Dosimetria Termoluminescente

Para testar a resposta dos dosímetros termoluminescentes (TLDs) e validar os resultados experimentais, foram realizadas 31 (trinta e uma) medidas experimentais de campo e os resultados confrontados com os dados obtidos nestes mesmos pontos, utilizando um sistema de espectrometria gama portátil do tipo discriminador, modelo Gamma Surveyour com sonda combinada de NaI(Tl) e BGO (germanato de bismuto). Que, através de um algoritmo, este sistema é capaz de integrar resultados nas grandezas dose absorvida e equivalente efetiva em função dos parâmetros fornecidos pelo documento técnico TECDOC 1363 da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 2003).

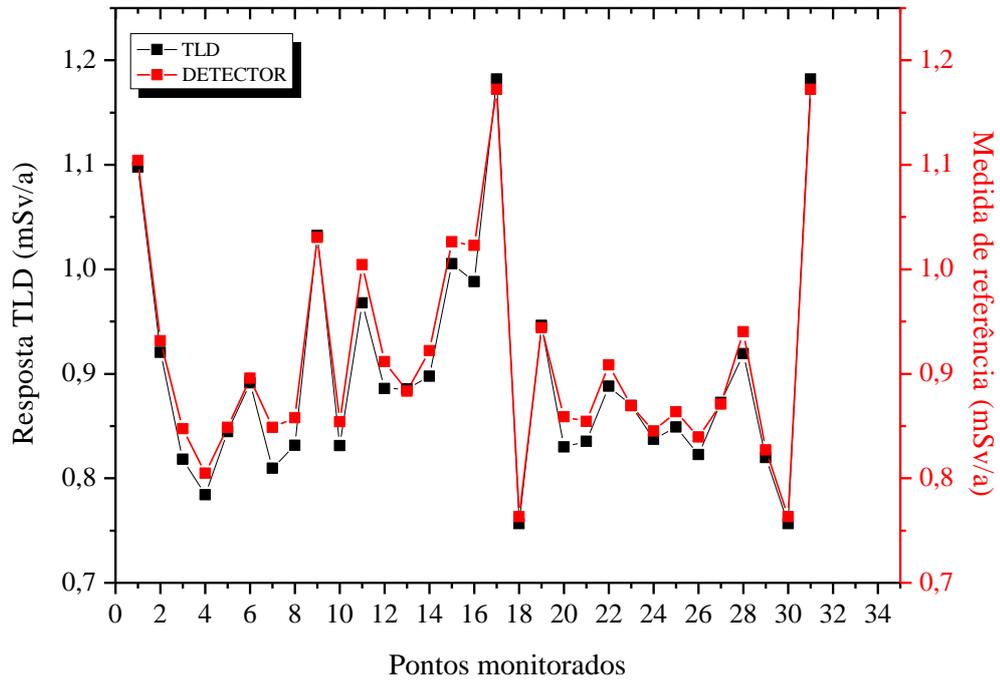
Esse sistema foi calibrado no Laboratório de Metrologia de Radiações Ionizantes (LMRI) do Departamento de Energia Nuclear (DEN) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), utilizando para certificação das medidas do referido detector, fonte de  $^{137}\text{Cs}$  com taxa de dose média no ar de  $34,3 \text{ mGy}\cdot\text{h}^{-1}$  (data de referência 09/12/2013), e doses variando em função da distância fonte-detector.

O arranjo experimental que permitiu obter a validação da resposta do detector, e secundariamente fornecer condições da validação dos resultados obtidos com os TLDs, foi do tipo eixo longitudinal com detector posicionado perpendicularmente ao feixe de radiação, tomando como base de referência o centro geométrico do volume sensível do equipamento.

Na Figura 12 podem ser observadas as taxas de doses equivalentes efetivas obtidas para os testes realizados com o detector (medidas de referência) e com os dosímetros TLDs, onde se observa desvios não significativos e, portanto, coerência e confiança nos dados obtidos com os TLDs, o que garante as respostas experimentais do presente estudo.

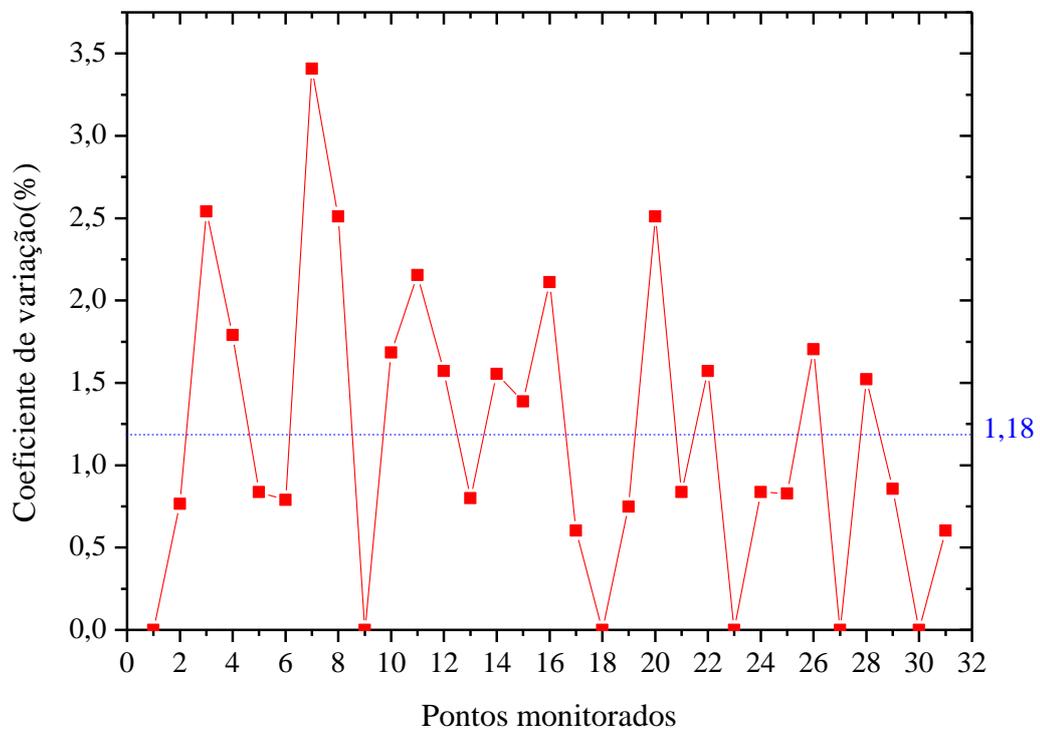
Para confirmar a validação dos testes e a resposta dos TLDs, foi aplicado o teste dos coeficientes de variação (Figura 13), onde a maior dispersão não ultrapassa 3,5%, com uma média estabelecida em 1,2% caracterizando resultados com alto grau de exatidão.

**Figura 12.** Comparação das taxas de doses do Detector e TLDs.



Fonte: Próprio autor

**Figura 13.** Coeficiente de variação por ponto monitorado.



Fonte: Próprio autor

## 4.2. Cálculo das Taxas de Doses Obtidas nas Residências

Os resultados da dosimetria realizada dentro das residências (“indoor”) nos municípios de São José de Espinharas, São Mamede, São José do Sabugi, Patos e Santa Luzia, localizados na região agreste do estado da Paraíba, estão apresentados na Tabela 8, com identificação de cada ponto monitorado, taxas de dose equivalente efetiva e seus respectivos desvios padrão.

**Tabela 8.** Identificação dos pontos monitorados.

PONTOS	COORDENADAS		TAXA DOSE EFETIVA	DESVIO PADRÃO
	S	WGr	mSv.a <sup>-1</sup>	mSv.a <sup>-1</sup>
001	06°55'31,8"	37°06'09,9"	2,07	0,10
002	06°50'46,2"	37°19'32,4"	1,22	0,05
003	06°50'43,1"	37°19'30,8"	1,25	0,02
004	06°50'38,7"	37°19'31,7"	0,96	0,09
005	06°50'45,7"	37°19'32,3"	0,79	0,02
006	06°50'51,2"	37°19'29,9"	0,80	0,02
007	06°50'49,1"	37°19'36,8"	0,86	0,07
008	06°50'49,8"	37°19'36,6"	0,92	0,07
009	06°50'51,8"	37°19'36,5"	0,93	0,03
010	06°50'50,8"	37°19'37,3"	0,94	0,04
011	06°50'51,6"	37°19'35,8"	0,89	0,12
012	06°50'51,0"	37°19'35,9"	0,94	0,14
013	06°50'48,3"	37°19'36,8"	0,79	0,02
014	06°50'47,7"	37°19'37,9"	0,81	0,02
015	06°50'47,5"	37°19'36,4"	0,82	0,07
016	06°50'46,9"	37°19'36,3"	0,77	0,05
017	06°50'44,8"	37°19'36,0"	0,84	0,03
018	06°50'44,4"	37°19'35,9"	0,78	0,03
019	06°50'36,0"	37°19'25,2"	0,86	0,08
020	06°50'36,6"	37°19'26,0"	0,87	0,07
021	06°50'36,9"	37°19'26,0"	0,77	0,06
022	06°50'37,3"	37°19'26,1"	0,71	0,01
023	06°50'37,5"	37°19'26,1"	0,74	0,03
024	06°50'36,6"	37°19'25,2"	0,88	0,05
025	06°50'41,8"	37°19'32,6"	0,78	0,01
026	06°50'47,0"	37°19'31,9"	0,81	0,05
027	06°50'44,7"	37°19'33,1"	1,26	0,08
028	06°50'47,5"	37°19'32,5"	0,88	0,04
029	06°50'49,3"	37°19'32,3"	0,76	0,04
030	06°50'49,3"	37°19'32,3"	0,85	0,04

continuação na próxima página

continuação da Tabela 8

031	06°50'57,5"	37°19'36,0"	0,75	0,03
032	06°50'55,7"	37°19'34,6"	0,74	0,06
033	06°50'55,9"	37°19'33,7"	0,73	0,01
034	06°50'56,8"	37°19'35,0"	0,79	0,03
035	06°50'54,3"	37°19'35,6"	0,77	0,02
036	06°50'49,1"	37°19'31,9"	0,78	0,01
037	06°50'49,9"	37°19'31,5"	0,74	0,20
038	06°50'51,7"	37°19'29,8"	0,80	0,02
039	06°50'50,9"	37°19'29,9"	0,78	0,03
040	06°50'51,5"	37°19'30,1"	0,88	0,01
041	06°50'50,3"	37°19'29,8"	0,75	0,04
042	06°50'50,5"	37°19'31,1"	0,79	0,05
043	06°50'50,3"	37°19'28,6"	0,92	0,03
044	06°50'51,6"	37°19'27,9"	0,95	0,13
045	06°50'50,4"	37°19'26,9"	0,83	0,07
046	06°50'48,9"	37°19'35,0"	0,80	0,06
047	06°50'49,0"	37°19'35,0"	0,73	0,02
048	06°50'48,9"	37°19'35,2"	0,91	0,05
049	06°50'49,1"	37°19'35,1"	0,81	0,03
050	06°50'49,2"	37°19'35,0"	0,86	0,06
051	06°50'49,3"	37°19'35,2"	0,75	0,01
052	06°50'49,3"	37°19'35,0"	0,87	0,02
053	06°50'48,8"	37°19'35,3"	0,82	0,03
054	06°50'49,4"	37°19'35,0"	0,84	0,01
055	06°50'48,7"	37°19'35,1"	0,84	0,01
056	06°50'49,4"	37°19'35,4"	0,91	0,05
057	06°50'46,7"	37°19'38,4"	0,95	0,07
058	06°50'45,7"	37°19'38,3"	0,86	0,02
059	06°50'44,9"	37°19'38,1"	0,89	0,14
060	06°50'44,3"	37°19'38,2"	0,77	0,00
061	06°50'43,4"	37°19'37,1"	0,75	0,02
062	06°50'41,4"	37°19'35,4"	0,89	0,12
063	06°50'37,9"	37°19'29,2"	0,85	0,06
064	06°50'37,8"	37°19'28,6"	0,90	0,07
065	06°50'36,1"	37°19'30,7"	1,07	0,11
066	06°50'37,0"	37°19'23,8"	0,72	0,06
067	06°50'36,8"	37°19'22,2"	0,71	0,04
068	06°50'42,6"	37°19'25,6"	0,90	0,06
069	06°50'42,1"	37°19'23,9"	0,94	0,03
070	06°50'41,9"	37°19'23,2"	0,99	0,07
071	06°50'41,4"	37°19'24,2"	1,10	0,04
072	06°50'44,7"	37°19'33,1"	1,05	0,05
073	06°50'34,8"	37°19'28,5"	0,82	0,03
074	06°50'53,6"	37°19'30,6"	0,76	0,06

continuação na próxima página

continuação da Tabela 8

075	06°50'52,9"	37°19'31,1"	0,82	0,06
076	06°50'51,3"	37°19'31,2"	0,88	0,05
077	06°50'51,2"	37°19'31,1"	1,28	0,06
078	06°50'51,4"	37°19'31,4"	1,25	0,11
079	06°52'52,6"	36°55'49,8"	0,99	0,03
080	06°50'48,7"	37°19'35,1"	0,94	0,00
081	06°50'48,8"	37°19'35,2"	0,97	0,11
082	06°50'44,1"	37°19'23,3"	0,93	0,08
083	06°50'43,4"	37°19'23,0"	1,00	0,01
084	06°50'45,5"	37°19'23,7"	0,89	0,02
085	06°50'45,7"	37°19'23,8"	0,91	0,03
086	06°50'45,4"	37°19'23,6"	0,87	0,07
087	06°50'37,2"	37°19'29,9"	0,90	0,01
088	06°50'53,3"	37°19'38,2"	0,81	0,04
089	06°50'34,8"	37°19'28,5"	0,95	0,06
090	06°51'12,1"	37°19'43,3"	0,80	0,04
091	06°50'48,9"	37°19'35,1"	0,97	0,04
092	06°52'04,1"	37°18'49,3"	0,83	0,02
093	06°52'08,0"	37°18'44,1"	1,10	0,11
094	06°52'10,8"	37°18'40,5"	0,89	0,01
095	06°52'11,5"	37°18'39,7"	0,83	0,03
096	06°52'13,4"	37°18'41,0"	0,76	0,01
097	06°52'06,2"	37°18'46,7"	1,04	0,07
098	06°52'09,4"	37°18'46,6"	1,01	0,05
099	06°51'48,1"	37°20'25,0"	0,87	0,02
100	06°50'00,0"	37°20'49,1"	0,84	0,09
101	06°51'53,1"	37°20'48,7"	0,85	0,03
102	06°51'48,2"	37°20'49,8"	0,82	0,04
103	06°51'24,8"	37°21'00,6"	0,83	0,05
104	06°51'24,9"	37°21'00,4"	0,90	0,06
105	06°50'57,1"	37°19'23,0"	0,92	0,07
106	06°50'57,2"	37°19'23,6"	0,90	0,08
107	06°50'57,7"	37°19'23,1"	0,82	0,01
108	06°50'57,9"	37°19'24,1"	0,89	0,08
109	06°51'55,5"	37°19'22,4"	0,92	0,08
110	06°50'49,3"	37°19'24,6"	0,93	0,02
111	06°50'49,0"	37°19'25,0"	0,96	0,06
112	06°50'49,2"	37°19'25,5"	0,90	0,03
113	06°50'46,7"	37°19'25,3"	0,87	0,05
114	06°50'46,1"	37°19'25,5"	0,83	0,04
115	06°50'42,9"	37°19'23,8"	1,17	0,22
116	06°50'43,1"	37°19'23,9"	1,06	0,03
117	06°50'43,6"	37°19'23,8"	0,90	0,02
118	06°48'21,0"	36°52'26,2"	1,17	0,10

continuação na próxima página

continuação da Tabela 8

119	06°50'45,1"	37°19'25,4"	0,95	0,02
120	06°55'34,9"	37°05'44,5"	1,34	0,14
121	06°55'34,9"	37°05'44,7"	1,15	0,08
122	06°55'35,3"	37°05'45,2"	1,27	0,06
123	06°55'32,6"	37°05'43,3"	1,41	0,28
124	06°55'41,4"	37°06'08,7"	1,16	0,04
125	06°55'17,3"	37°05'57,7"	0,90	0,03
126	06°55'18,7"	37°05'54,4"	0,83	0,03
127	06°55'19,7"	37°05'54,1"	0,87	0,03
128	06°55'21,5"	37°05'52,6"	0,77	0,03
129	06°55'22,9"	37°05'51,1"	1,10	0,03
130	06°55'23,0"	37°05'51,1"	0,90	0,03
131	06°55'26,4"	37°05'51,6"	0,80	0,03
132	06°55'24,2"	37°05'50,0"	0,83	0,03
133	06°55'24,5"	37°05'49,7"	0,90	0,03
134	06°55'23,2"	37°05'34,4"	0,80	0,03
135	06°55'37,0"	37°05'29,4"	0,90	0,03
136	06°55'35,1"	37°05'39,5"	0,83	0,03
137	06°55'19,6"	37°05'52,7"	0,90	0,03
138	06°55'20,6"	37°05'53,2"	0,87	0,03
139	06°55'25,6"	37°05'44,1"	0,90	0,03
140	06°55'50,6"	37°05'49,5"	0,90	0,04
141	06°55'56,1"	37°05'48,6"	0,83	0,03
142	06°55'55,6"	37°05'48,6"	0,90	0,03
143	06°55'39,8"	37°05'45,8"	0,87	0,03
144	06°55'35,3"	37°05'49,5"	0,83	0,03
145	06°55'36,2"	37°05'27,7"	0,83	0,03
146	06°55'35,5"	37°05'28,3"	0,87	0,03
147	06°55'37,1"	37°05'37,7"	0,83	0,03
148	06°49'33,8"	36°47'08,9"	1,53	0,15
149	06°46'34,1"	36°47'55,7"	1,60	0,15
150	06°46'27,9"	36°47'45,6"	1,23	0,03
151	06°46'31,0"	36°47'56,1"	1,67	0,09
152	06°47'25,4"	36°47'31,2"	0,99	0,03
153	06°46'30,4"	36°47'55,6"	1,20	0,03
154	06°46'31,6"	36°47'55,1"	1,12	0,02
155	06°46'30,2"	36°47'56,6"	1,20	0,03
156	06°46'29,3"	36°47'56,2"	1,33	0,02
157	06°46'28,7"	36°47'56,3"	1,03	0,03
158	06°46'27,6"	36°47'55,8"	0,93	0,03
159	06°46'24,4"	36°47'56,2"	0,90	0,03
160	06°46'24,3"	36°47'57,6"	0,97	0,03
161	06°46'22,9"	36°47'57,4"	1,13	0,02
162	06°46'21,9"	36°47'56,8"	1,00	0,03

continuação na próxima página

continuação da Tabela 8

163	06°46'22,1"	36°47'56,6"	1,03	0,03
164	06°46'21,0"	36°47'55,7"	1,03	0,03
165	06°46'20,7"	36°47'54,1"	0,97	0,03
166	06°46'20,2"	36°47'54,8"	1,13	0,03
167	06°46'22,2"	36°47'50,9"	0,93	0,03
168	06°46'21,7"	36°47'49,5"	1,00	0,03
169	06°49'27,0"	36°48'00,0"	1,07	0,03
170	06°46'31,7"	36°47'56,4"	1,20	0,03
171	06°46'25,6"	36°47'59,1"	1,00	0,04
172	06°46'26,3"	36°47'56,7"	1,33	0,02
173	06°46'25,9"	36°47'58,5"	0,97	0,03
174	07°02'44,4"	37°16'26,8"	0,93	0,01
175	07°02'44,8"	37°16'26,7"	0,90	0,04
176	07°02'04,8"	37°16'39,8"	0,77	0,05
177	06°52'13,8"	36°55'01,6"	1,10	0,05
178	06°52'17,9"	36°55'31,6"	1,27	0,04

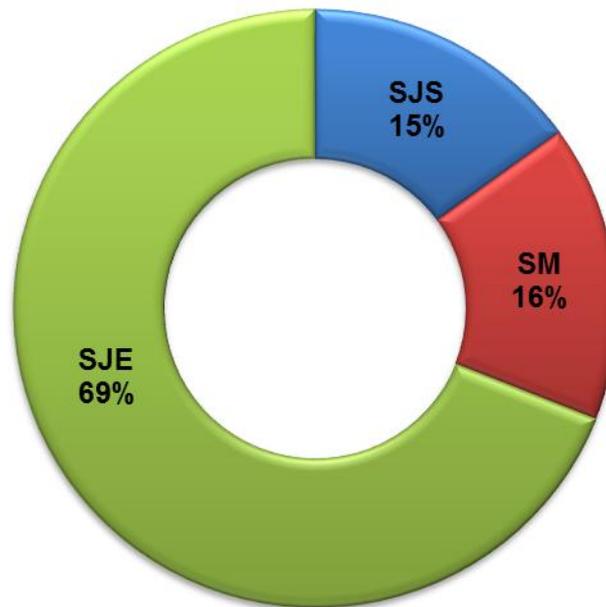
Pontos de 01 a 119 correspondem ao município de São José de Espinharas; 120 a 147 ao município de São Mamede; 148 a 173 ao município de São José do Sabugi; 174 a 176 ao município de Patos e 177 a 178 ao município de Santa Luzia.

Os resultados obtidos para os 178 pontos monitorados são descritos detalhadamente a seguir, inclusive, fazendo referência aos municípios isoladamente, incluindo demonstrativo dos resultados obtidos por município, conforme apresentado pela Figura 14.

Os valores absolutos plotados na referida figura, relatam os dados coletados e investigados por município, conferindo uma maior participação para São José de Espinharas (SJE), aproximadamente 69%, tendo em vista ter sido o principal foco desse estudo, em virtude do mesmo conter uma jazida de urânio referenciada nesta pesquisa e em outros trabalhos como os de Silva (2014a) e Silva (2014b).

Os outros dois municípios, a saber, São Mamede (SM) e São José do Sabugi (SJS), apesar de não apresentarem jazida de urânio, compõem as adjacências de SJE, portanto, foram investigados em menor proporção, com participações em termos de amostragem de aproximadamente 16% e 15%, respectivamente. Além disso, houve dificuldades do aceite da população para o referido estudo e, conseqüentemente, também limitações no número de dosímetros termoluminescentes disponíveis.

**Figura 14.** Contribuição de amostragem por município estudado.



**Fonte:** Próprio Autor.

Pode ser observado na Tabela 9 a estatística descritiva para os municípios de São José de Espinharas (SJE); São Mamede (SM); São José do Sabugi (SJS); Patos (PT) e Santa Luzia (SL), incluindo como principais parâmetros de avaliação a população amostral, os valores mínimo e máximo, a amplitude total, as médias e as medidas de dispersão.

O município de São José de Espinharas já classificado como uma área anômala pela NUCLAN-NUCLEBRÁS Mineração S/A (SANTOS JÚNIOR et al., 2006), apresentou taxas de doses equivalentes efetivas nos ambientes internos (“indoor”), variando de 0,71 a 2,07 mSv.a<sup>-1</sup>, com uma média de 0,90 ± 0,16 mSv.a<sup>-1</sup> e um coeficiente de variação de aproximadamente 18%.

Assumindo o valor de referência estabelecido pela UNSCEAR (2008), para taxa de dose anual para os ambientes fechados (“indoor”), o valor de 0,41 mSv.a<sup>-1</sup>, e comparando este, com as doses obtidas nesta monitoração radiométrica juntamente com a realidade climática e geográfica da região em estudo, observa-se que 100% dos resultados obtidos no referido trabalho apresentaram-se com doses acima do valor de referência.

**Tabela 9.** Estatística descritiva dos municípios em estudo.

ESTATÍSTICA	MEDIDAS POR CIDADE (mSv.a <sup>-1</sup> )				
	SJE	SM	SJS	PT	SL
N	119	28	26	3	2
Mínimo	0,71	0,77	0,90	0,77	1,10
Máximo	2,07	1,41	1,67	0,93	1,27
Amplitude	1,36	0,64	0,77	0,16	0,17
Média aritmética	0,90	0,94	1,13	0,87	1,18
Desvio padrão	0,16	0,17	0,21	0,08	1,12
Coefficiente variação (%)	18,16	18,25	18,41	9,81	10,14
Mediana	0,87	0,88	1,05	----	----
Moda	0,81	0,83	1,00	----	----
Primeiro quartil	0,80	0,83	0,99	----	----
Terceiro quartil	0,94	0,90	1,20	----	----
Desvio interquartilico	0,14	0,07	0,21	----	----
Média geométrica	0,88	0,93	1,12	----	----
Assimetria	3,70	1,65	1,32	----	----
Curtose	22,69	1,72	1,08	----	----

SJE = São José de Espinharas; SM = São Mamede; SJS = São José do Sabugi; PT = Patos e S.L = Santa Luzia.

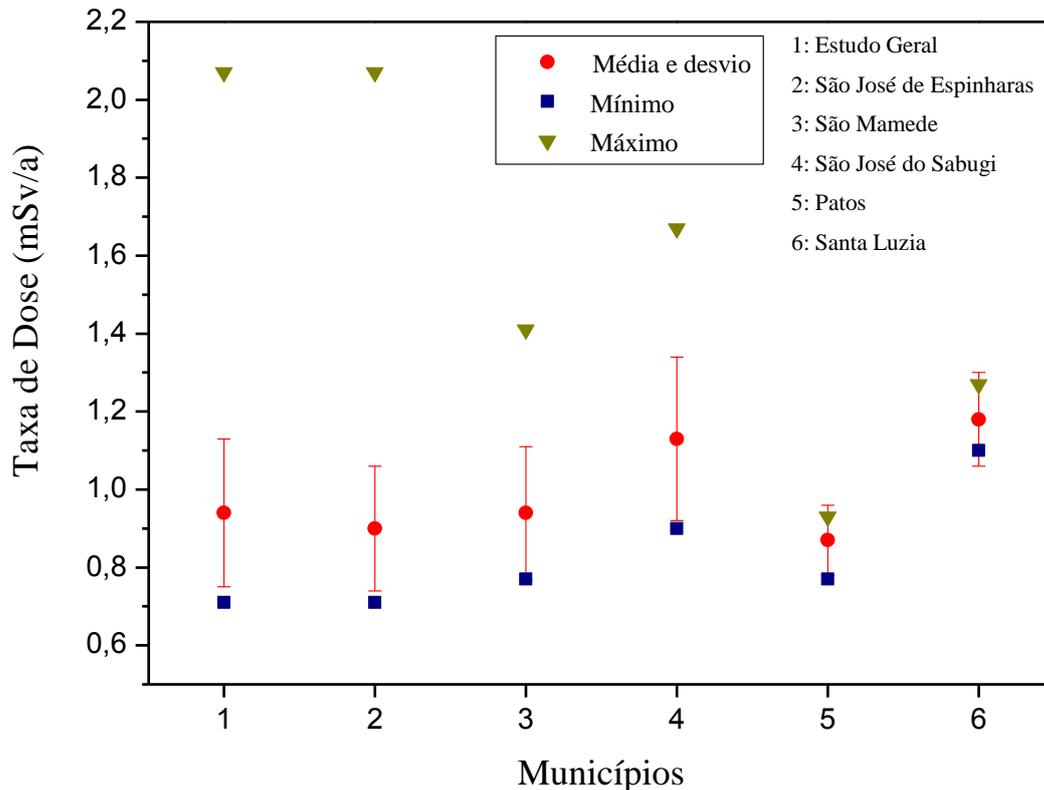
O ponto 001 da Tabela 8, refere-se a uma residência localizada na área urbana que apresenta um pequeno afloramento rochoso em seu quintal, próximo ao quarto que foi monitorado, sendo esta localizada no município de São José de Espinharas que apresentou uma variação de taxa de dose equivalente efetiva em torno de: 0,71 a 2,07 mSv.a<sup>-1</sup>, com a média de  $0,90 \pm 0,16$  mSv.a<sup>-1</sup> e coeficientes de variação de aproximadamente 18%.

Os demais municípios tiveram variações nas taxas de doses de 0,77 a 1,41 mSv.a<sup>-1</sup>, com a média de  $0,94 \pm 0,17$  mSv.a<sup>-1</sup> para o município de São Mamede (SM); 0,90 a 1,67 mSv.a<sup>-1</sup>, com a média de  $1,13 \pm 0,21$  mSv.a<sup>-1</sup> para o município de São José do Sabugi (SJS), ambos com coeficientes de variação de aproximadamente 18%. 0,77 a 0,93 mSv.a<sup>-1</sup> para o município de Patos (PT) e de 1,10 a 1,27 mSv.a<sup>-1</sup> para o município de Santa Luzia (SL), sendo os dois últimos municípios utilizados como controle para a região estudada. Neste caso, assume-se como média de referência o valor de  $1,00 \pm 0,19$  mSv.a<sup>-1</sup>, para n igual a 5 com 95% de confiança.

Pode ser observada na Figura 15 a comparação de todos os resultados obtidos no presente estudo, que compreende as taxas de doses efetivas obtidas para todos os municípios, incluindo medidas controle, e os resultados de cada município isoladamente. Pelo perfil dos valores atribuídos no referido gráfico, observa-se que o estudo geral é influenciado, principalmente, pelos dados obtidos em São José de Espinharas, quando comparados os parâmetros descritivos baseados nos valores mínimos e máximos, média e dispersões, o que

de certa forma, pode-se negligenciar o tratamento estatístico para o estudo geral e assumir o tratamento dos dados de maneira independente, conferindo ao referido município, maior influência para as doses obtidas nesta região.

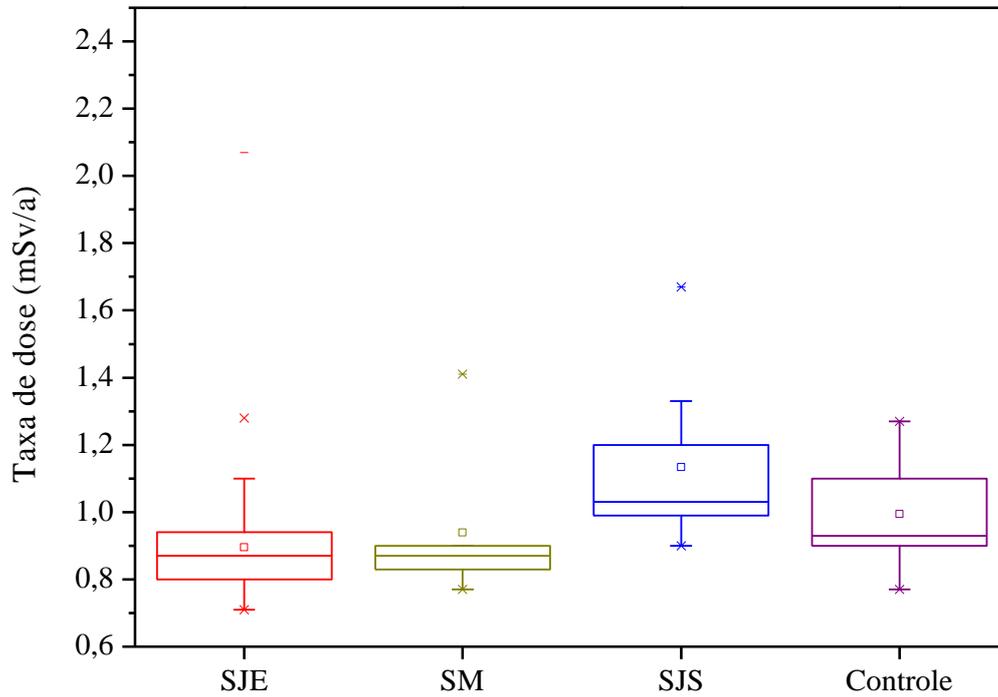
**Figura 15.** Taxas de doses médias por município.



Fonte: Próprio Autor

Para certificar a influência da relação do teste das médias e a amplitude relacionada aos referidos municípios, apresenta-se na Figura 16 os diagramas boxplot para os município de SJE, SM, SJS e os dados obtidos para medidas controle, neste caso, agrupando os resultados obtidos para PT e SL. O presente gráfico denota diferenças significativas para o teste das médias (média aritmética e mediana), com maior relação para SJE, porém, com grande “outliers”, que confere baixa significância para um diagnóstico de normalidade pelo teste das médias, sendo necessário atribuir um teste de inferência aos referidos dados.

**Figura 16.** Diagrama de boxplot para os municípios estudados.



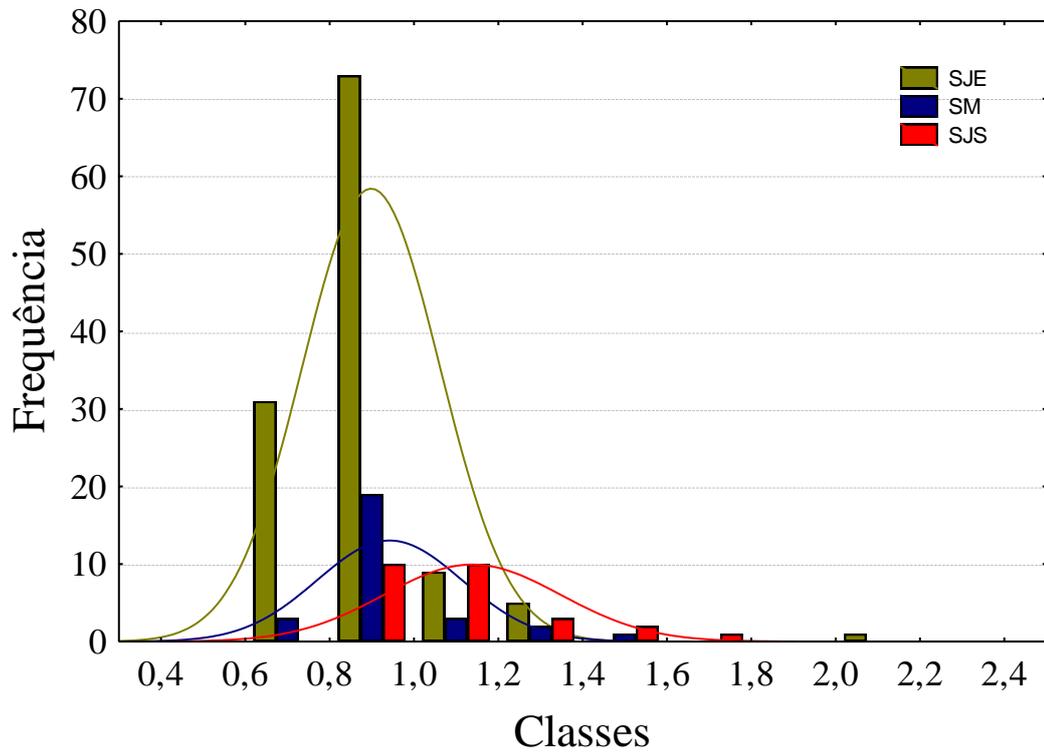
SJE: São José de Espinharas; SM: São Mamede; SJS: São José do Sabugi.

**Fonte:** Próprio Autor

Adotando-se o novo perfil para análise estatística, foi elaborada a Figura 17, que permitiu detalhar a distribuição de frequências por intervalo de classe nos municípios de SJE, SM e SJS, desconsiderando-se os municípios PT e SL por se tratarem de áreas controle. As taxas de doses com maiores frequências foram distribuídas entre 0,8 a 1,0 mSv.a<sup>-1</sup> (ver também valores modais da Tabela 9).

Quanto à distribuição de frequência obtida para o gráfico em questão, e adotando-se a referência do modelo de Gauss (curvas apresentadas em linhas contínuas), além das distribuições empíricas e teóricas da Figura 18 que representa o papel de probabilidade, se observam comportamentos diferenciados para os municípios, principalmente para o SJS.

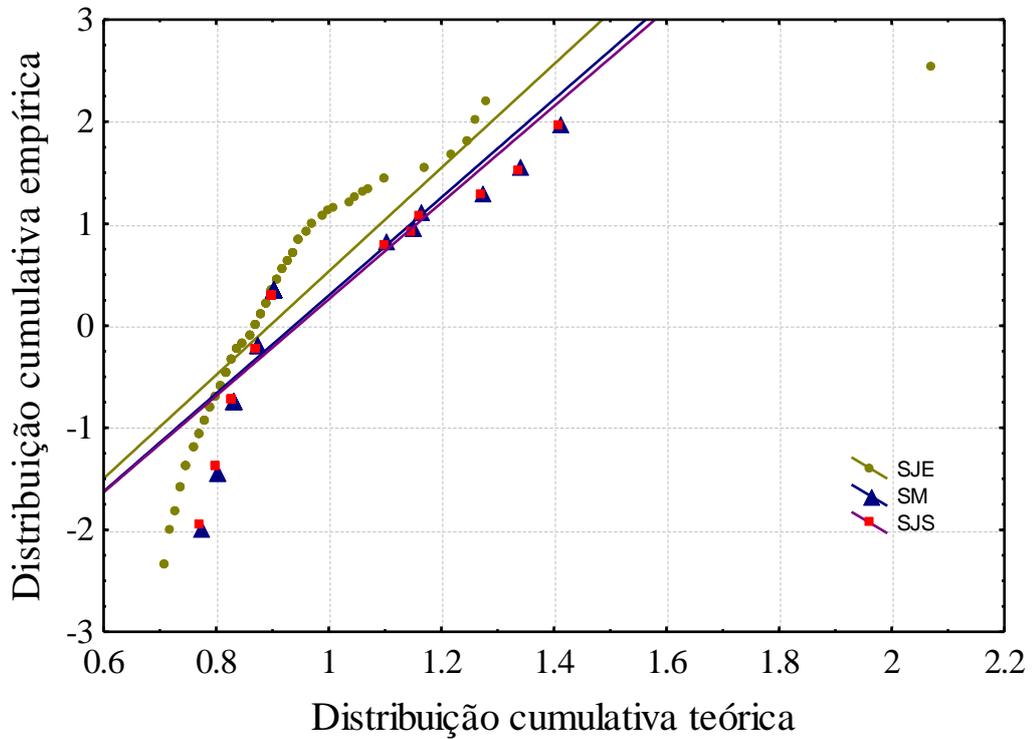
**Figura 17.** Histograma para os municípios SJE, SM e SJS.



SJE: São José de Espinharas; SM: São Mamede; SJS: São José do Sabugi.

Fonte: Próprio autor.

**Figura 18.** Papel de probabilidade para os municípios SJE, SM e SJS.



SJE: São José de Espinharas; SM: São Mamede; SJS: São José do Sabugi.

Fonte: Próprio autor.

Para certificar os resultados obtidos nos modelos de distribuição de frequências apresentados nas Figuras 17 e 18, foram realizados testes não paramétricos, neste caso, Kolmogorov-Smirnov com correção de Lilliefors, cujo objetivo foi avaliar a hipótese nula,  $H_0$ , assumindo para tal hipótese uma distribuição normal, sendo atribuída  $H_1$  para hipótese contrária, a qual confere uma distribuição não normal.

Para os resultados obtidos em São José de Espinharas e considerando  $D_n$  como sendo a representação da função empírica e  $D_\alpha$  (tabelado) ou teórico, obteve-se um  $D_n = 0,1832$  que é superior ao  $D_\alpha$  de 0,1247, rejeitando-se a hipótese de normalidade dos dados com  $(1-\alpha)$  100% de confiança, com  $\alpha = 0,05$  e  $n = 119$ , conforme apresentado na Tabela 10.

**Tabela 10.** Parâmetros teóricos e empíricos para o teste de Kolmogorov-Smirnov para os municípios estudados.

MUNICÍPIO	KOLMOGOROV-SMIRNOV			
	$D_\alpha$	$D_n$	p-valor	$H_0$
São José de Espinharas	0,1247	0,1832	<0,01	Rejeitar
São Mamede	0,2259	0,3756	<0,01	Rejeitar
São José do Sabugi	0,2097	0,1911	<0,20	Aceitar

$D_\alpha$ : valores críticos (tabelados);  $D_n$ : valores empíricos (calculados);  $H_0$ : hipótese nula (distribuição normal); S.J.E.: São José de Espinharas; S.M.: São Mamede; S.J.S.: São José do Sabugi.

Nesta tabela, também é possível observar os parâmetros do teste não paramétrico para a distribuição das taxas de doses efetivas nos municípios de São Mamede e São José do Sabugi. Nestes casos, foram obtidas tendências de rejeição e aceite da hipótese  $H_0$  para os referidos municípios com  $n = 28$  e  $n = 26$ , respectivamente, para  $\alpha$  de 0,05. Entretanto, conforme mencionado anteriormente, devido à limitação de coleta de dados nesses municípios, atribuída principalmente ao alto grau de rejeição da população em participar do estudo, não se pode aceitar ou rejeitar com precisão a hipótese nula, sem a análise de um maior grupo amostral.

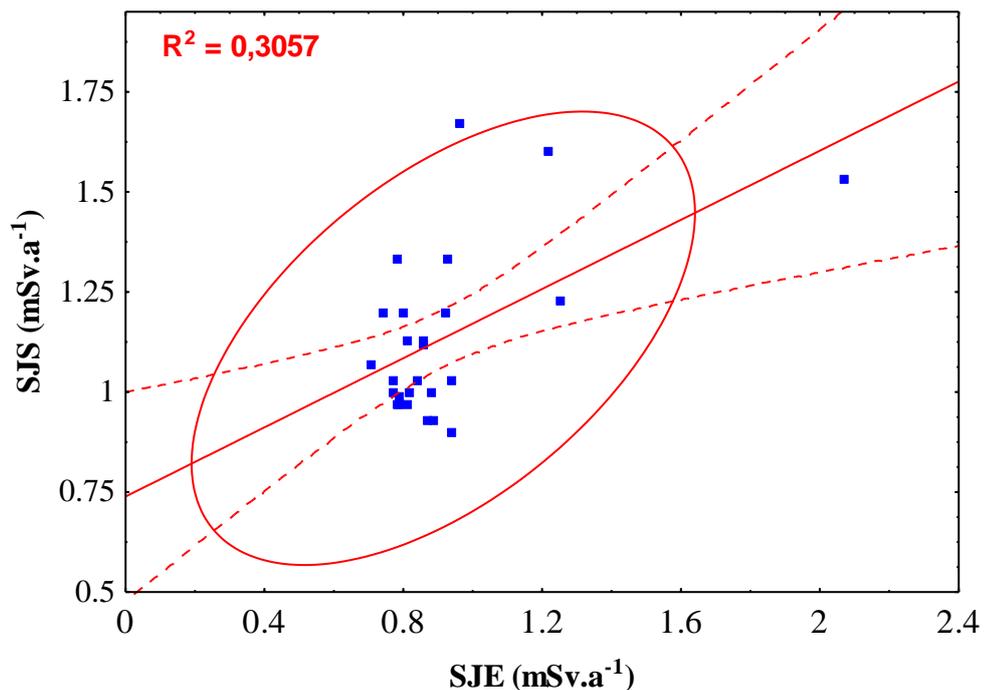
Convém observar que os testes paramétricos e não paramétricos não avaliam a condição de anormalidade radiométrica dos municípios estudados, apenas o comportamento da distribuição das doses nas diferentes áreas e a dispersão desses valores em função da medida de tendência central, ou seja, a heterogeneidade ou homogeneidade da distribuição amostral.

As Figuras 19, 20 e 21 representam os gráficos das correlações utilizadas para os municípios de SJE/SJS; SJE/SM e SJS/SM, respectivamente, incluindo os valores dos coeficientes de determinação, os chamados  $r^2$ .

Analisando os coeficientes de correlação linear ( $r$ ), obtidos para os gráficos das Figuras 19 e 20, cujos valores foram de 0,5529 e 0,6027, respectivamente, observa-se que não existe correlação para os referidos municípios, representando que os resultados obtidos para esses municípios são independentes, ou seja, não existe influência direta da jazida de urânio nesses dois municípios e que esses pontos anômalos correspondem a outro tipo de formação geológica, com níveis elevados de radiação, não previstos para esses casos, ou seja, condições atípicas.

Para os dados correlacionados na Figura 21, entre os municípios SJS e SM, foi obtido um  $r$  de 0,6270, implicando em uma correlação fraca, desta forma, isto não significa aceitar uma dependência entre as doses obtidas para esses municípios, o que confere taxas de doses obtidas de populações diferentes (conjunto de amostras).

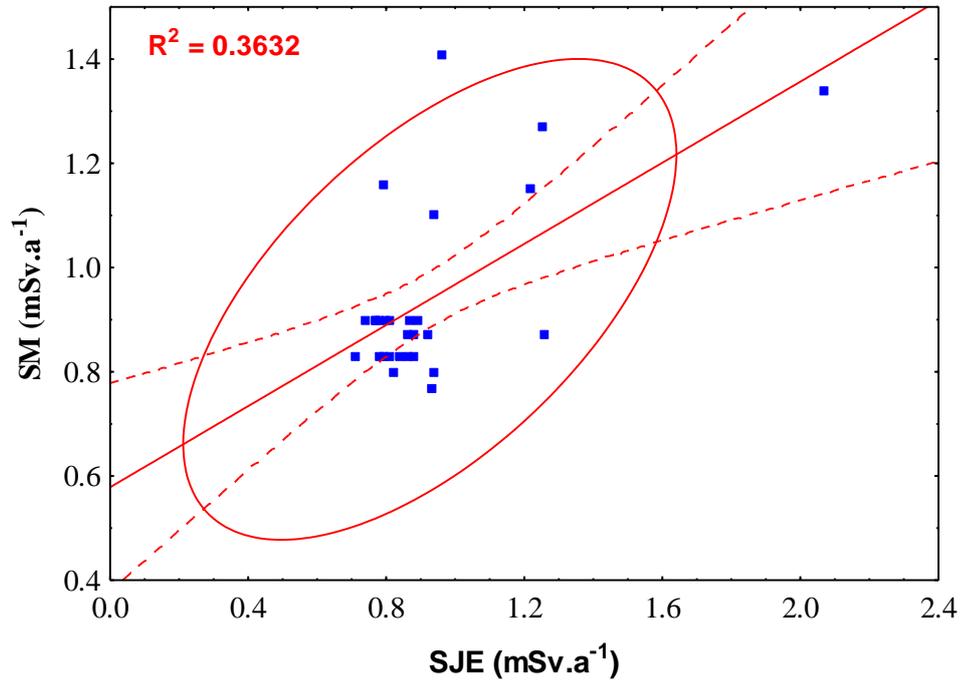
**Figura 19.** Correlação linear entre SJE e SJS.



SJE: São José de Espinharas; SJS: São José do Sabugi.

**Fonte:** Próprio Autor.

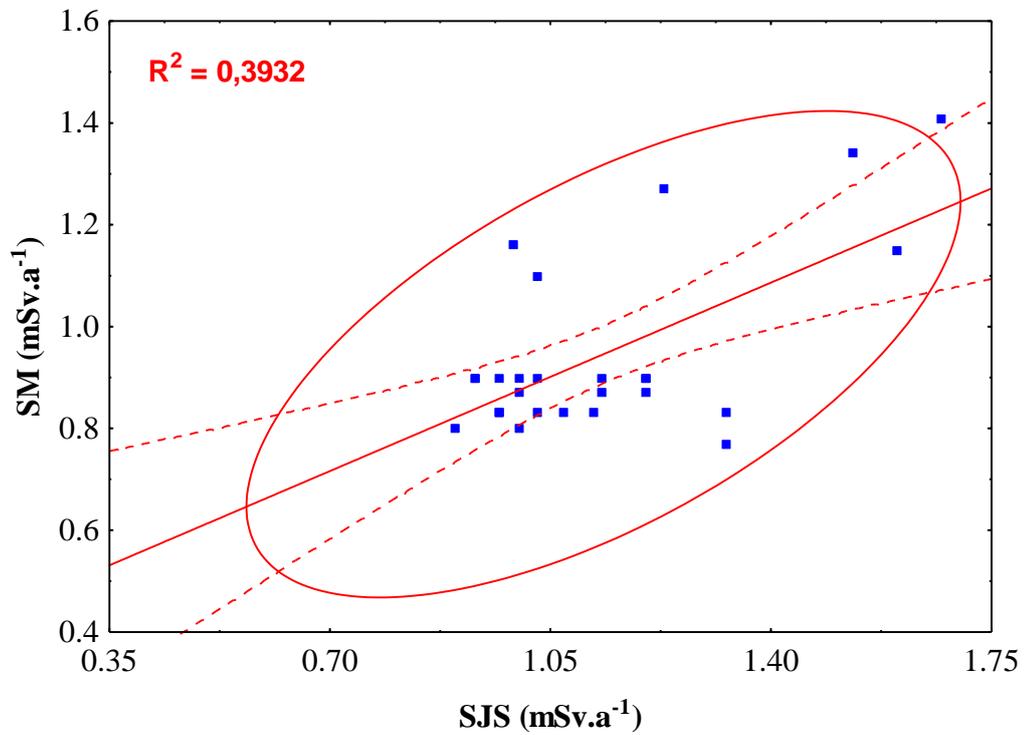
**Figura 20.** Correlação linear entre SJE e SM.



SJE: São José de Espinharas; SM: São Mamede.

Fonte: próprio autor.

**Figura 21.** Correlação linear entre SJS e SM.



SJS: São José do Sabugi; SM: São Mamede.

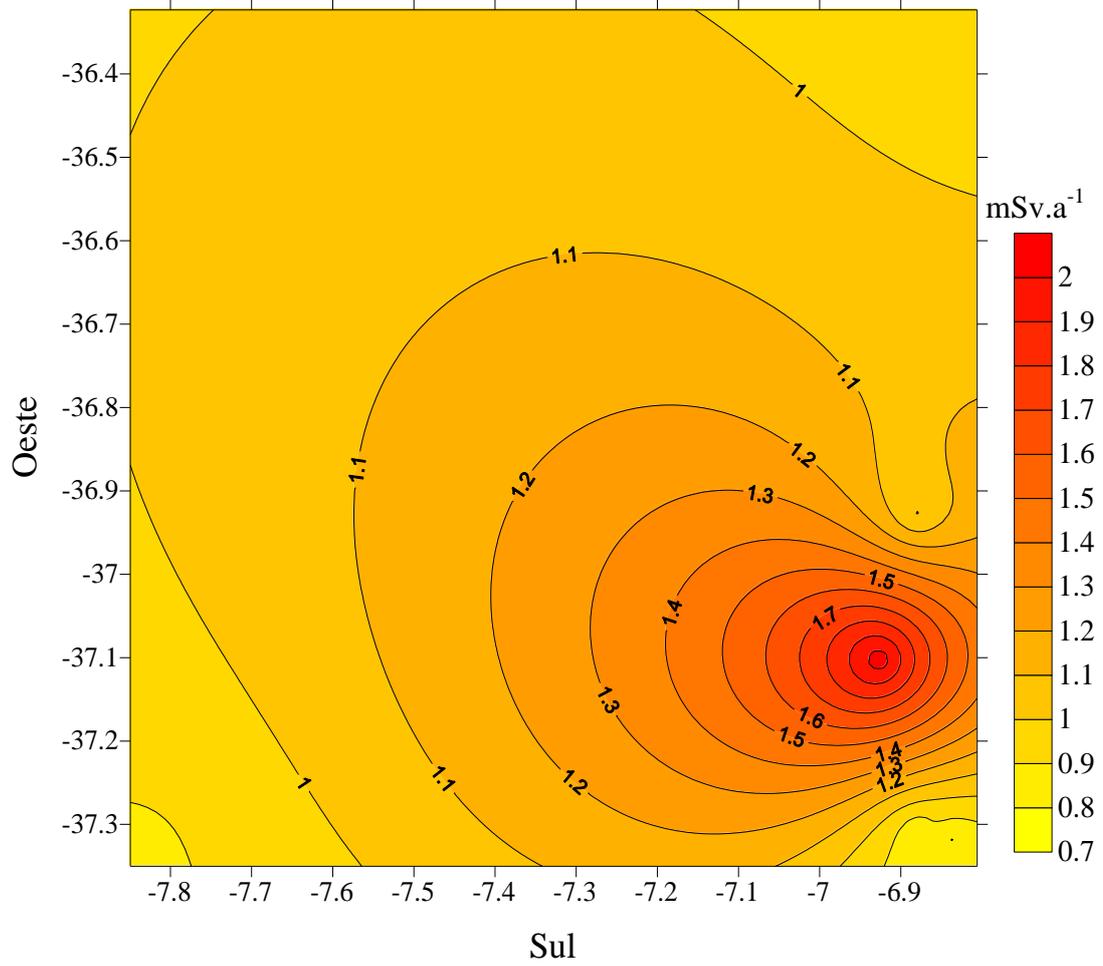
Fonte: próprio autor.

As Figuras 22, 23 e 24 retratam as curvas de isodoses obtidas a partir do programa estatístico Surfer, versão 7.0, para os municípios de SJE, SJS e SM, respectivamente. Essas curvas constituem uma poderosa ferramenta na área de radioecologia e representam um conjunto de pontos de algum plano de um determinado meio, neste caso específico as taxas de doses equivalentes efetivas medidas ao ar livre em ambientes internos (“indoor”), dos municípios supracitados, permitindo desta forma traçar o perfil radiométrico destes ambientes. As escalas das doses nessas curvas foram classificadas pela intensidade da cor utilizada, expressando maiores concentrações para tons mais escuros. Alguns valores foram plotados nos gráficos para orientar os limites das diferentes faixas de doses encontradas.

As maiores doses foram obtidas no município de SJE, principalmente a sudeste do mapa, com valor máximo de  $2,07 \text{ mSv.a}^{-1}$  em um ponto isolado no centro da cidade, como também, em poucas residências da área rural, onde ocorrem as principais anomalias de urânio (depósitos naturais ou jazida de urânio). Deve-se levar em consideração que a maior taxa de dose encontrada no referido município foi de  $2,87 \text{ mSv.a}^{-1}$ , medido diretamente em um dos afloramentos da jazida de urânio do município, portanto, não considerado na estatística dos resultados “indoor”, nem utilizado no gráfico da distribuição de isodoses, uma vez que não representa diretamente um valor atribuído aos ambientes internos, conforme mencionado anteriormente.

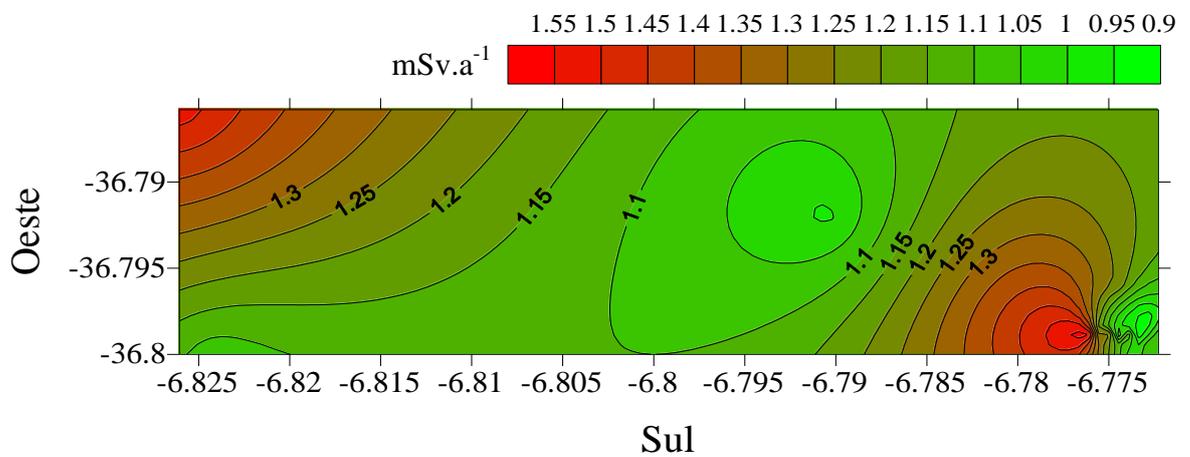
Para SJS (Figura 23), as maiores taxas de doses foram obtidas a sudeste como também a noroeste desta área, com valor máximo de  $1,67 \text{ mSv.a}^{-1}$ , enquanto que SM, conforme mostrado na Figura 24, os valores mais representativos foram detectados a nordeste, com taxa de dose máxima de  $1,41 \text{ mSv.a}^{-1}$ , divergindo esta última dos outros municípios. Apesar de uma coerência entre a maioria dos valores encontrados nas posições dos mapas das áreas de SJE e SJS, isto não caracteriza nenhuma correlação entre as ocorrências de urânio nesses municípios, fato já comprovado estatisticamente pelos testes das Figuras 19, 20 e 21.

**Figura 22.** Curvas de isodoses para São José de Espinharas.



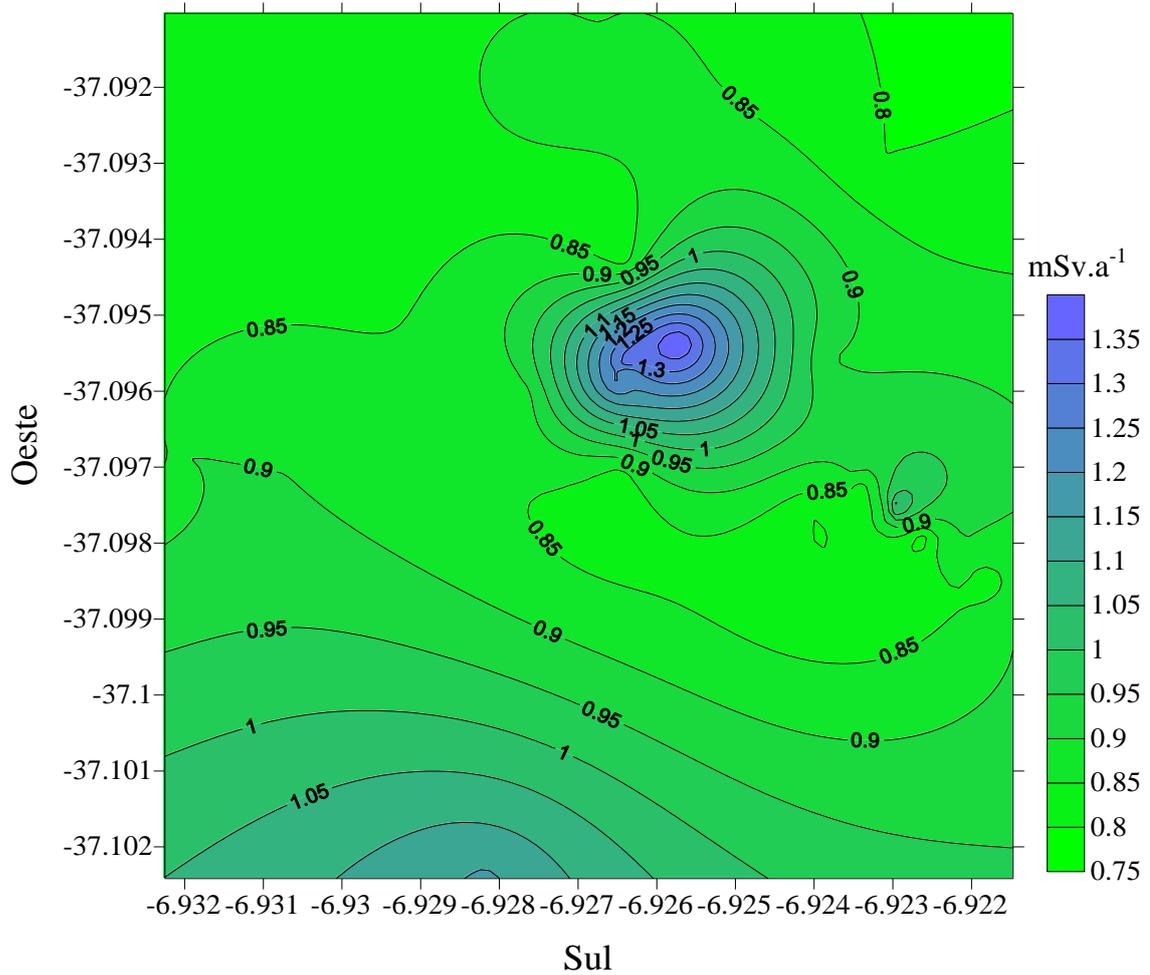
Fonte: Próprio Autor.

**Figura 23.** Curvas de isodoses para São José do Sabugi.



Fonte: Próprio Autor.

**Figura 24.** Curvas de isodoses para São Mamede.



**Fonte:** Próprio Autor.

Os dados obtidos para os municípios trabalhados nesse estudo podem ser preliminarmente classificadas como dentro da normalidade para áreas classificadas como Material Radioativo de Ocorrência Natural (NORM), quando comparado com o valor de referência para ambientes internos estabelecido pela UNSCEAR que é de  $0,41 \text{ mSv.a}^{-1}$ . E também quando comparados a outros trabalhos de dosimetria radioecológica realizados mundialmente, incluindo alguns trabalhos nacionais, onde o nordeste do Brasil praticamente não foi explorado em termos radioecológicos. A maioria dessas outras pesquisas foram realizadas em áreas que apresentam altos níveis de radioatividade natural ou supostamente tratados como tal.

Na Tabela 11 podem ser observados os resultados obtidos no presente estudo, como também, alguns resultados obtidos em diferentes estudos realizados mundialmente, todos em

áreas com níveis diferenciais de radionuclídeos naturais, adotando critérios de avaliação diferenciados em função do clima e do desenvolvimento local, parâmetros que ponderam principalmente os fatores de ocupação utilizados na dosimetria externa dentro das residências, calculada de forma indireta, tendo como meio de avaliação o ar.

**Tabela 11.** Taxas de doses efetivas ambientais determinadas com monitoração por TLDs para ambientes internos em alguns trabalhos a nível mundial.

LOCALIZAÇÃO	DOSE EFETIVA (mSv.a <sup>-1</sup> )	REFERÊNCIA
Espinharas (PB)	0,90 (0,71 - 2,07)	Presente estudo
São Mamede (PB)	0,94 (0,77 - 1,41)	Presente estudo
São José do Sabugi (PB)	1,13 (0,90 - 1,67)	Presente estudo
Sertão Brasileiro (RN)	0,23 (0,07 - 0,67)	Malanca et al., (1996)
Gudalore (Índia)	0,30 (0,16 - 0,46)	Silvakumar et al., (2002)
Needakara e Chavara (Kerala)	1,80 (0,00 - 2,70)	Chougaonkar et al., (2004)
Noruega	0,21 (0,07 - 1,26)	Sundal; Stand (2004)
Dhakar (Bangladesh)	1,08 (0,69 - 1,50)	Miah (2004)
Costa Leste de Tamilnadu (Índia)	0,32 (0,27 - 0,33)	Selvasekarapandian et al., (2005)
Cidade de Coimbatore (Índia)	0,32 (0,23 - 0,39)	Malathi et al., (2005)
Cidade de Riyadh (Arábia Saudita)	0,31 (0,21 - 0,49)	Al-Saleh (2007)
Sudeste da Itália	0,12 (0,10 - 0,17)	Rosabianca Trevisi et al., (2010)
Jaduguda (Índia)	0,69 (0,43 - 0,91)	Mandakini Maharana et al., (2011)
Cidade de Chennai (Índia)	0,36 (0,19 - 0,62)	Babai et al., (2013)
Região de Campana (Sul da Itália)	1,30 (0,38 - 3,45)	Quarto et al., (2013)
Gogi (Sul da Índia)	0,59 (0,33 - 1,38)	Karunakara et al., (2014)

Fonte: Próprio autor

Para compor os resultados comparativos apresentados na Tabela 11, foram padronizadas as mesmas condições vivenciadas no presente estudo, como é o caso do fator de ocupação adotado para esses ambientes como também o tempo de exposição.

Baseando-se nos valores de referência estabelecidos mundialmente pela UNSCEAR (2008) e comparando-os com as taxas de doses equivalentes efetivas apresentadas na Tabela 11 para diferentes regiões do planeta, incluindo o presente estudo, evidencia-se similaridade nos resultados médios obtidos para Espinharas (PB) e São Mamede (PB), área de estudo, assim como para Jaduguda (Índia).

Outros monitoramentos obtiveram valores de doses superiores aos de São José de Espinharas e São Mamede, como é o caso de Needakada e Chavara (Índia), de Dhakar (Bangladesh) e da Região de Campana (sul da Itália), porém, com resultados médios próximos dos encontrados no presente estudo para São José do Sabugi no estado da Paraíba.

Os demais trabalhos apresentaram taxa de dose média inferior ao do referido estudo como é o caso do Sertão Brasileiro (RN), Gudalore (Índia), Noruega, Costa Leste de Tamilnadu (Índia), Cidade de Coimbatore (Índia), Cidade de Riyadh (Arábia Saudita), Sudeste da Itália, Cidade de Chennai e Gogi (Sul da Índia).

Convém observar que, dos trabalhos pesquisados e citados na Tabela 11, mais de 77% dos resultados apresentados são inferiores as doses do presente estudo, isto devido principalmente à influência da formação geológica de cada área estudada e algumas condições locais.

Num contexto geral, quando comparadas as médias dos diferentes estudos mundiais relatados na Tabela 11, que foi de aproximadamente  $0,60 \pm 0,41 \text{mSv.a}^{-1}$ , com a do presente estudo de  $0,99 \pm 0,10 \text{mSv.a}^{-1}$ , observa-se uma significativa correlação e conseqüentemente uma coerência nos resultados, o que garante que os estudos radiométrico são priorizados em áreas que apresentam historicamente, níveis diferenciados de radionuclídeos naturais na formação geológica, o que de certa forma, dificulta a definição de um valor de referência para estimar riscos determinísticos para populações que residem nesse tipo de ambiente.

Um método comparativo bastante utilizado pelos trabalhos realizados mundialmente (MALANCA et al., 1996; BABAI et al., 2013; SELVASEKARAPANDIAN et al., 2005; ALMEGREN et al., 2008), referenciam como dose média anual para ambientais fechados o valor de referência da UNSCEAR, que é de 0,41 mSv, correspondente à aproximadamente 17% da dose total de radiação natural. Comparando a estimativa mundial com o valor médio atribuído ao referido estudo, observa-se que este supera em quase 2,5 vezes a estimativa de referência mundial para essas condições, em alguns casos, atingindo um valor que ultrapassa 5 vezes a referência mundial. No contexto geral, o presente estudo apresenta 100% dos resultados superiores à estimativa global adotada pelo Comitê das Nações Unidas para os Efeitos das Radiações Atômicas.

Convém observar que, valores de doses medidos no ar não devem ser levados em consideração para estimativa do risco determinístico associado às exposições diretas, tendo em vista que estes são medidos no ar, em condições que não garantem associação direta com dosimetria física da população, além disso, o valor de referência estabelecido pela UNSCEAR (2000) representa apenas uma média global, não estabelecendo limites para intervenções. Entretanto, resultados desta magnitude promovem condições que podem garantir a estimativa de possíveis riscos estocásticos para quem vive em áreas sob influência de Materiais Radioativos de Ocorrências Naturais (sigla do inglês: NORM), permitindo, além disso,

contribuir para a determinação de medidas de referência, as quais podem ser utilizadas para melhor estimativa da taxa de dose mundial e a modelagem para predizer possíveis doses de prevenção.

## 5. CONCLUSÕES

1. Ficou evidenciado nesta pesquisa que a dosimetria termoluminescente usando TLD-100 permitiu estimar a taxa de dose equivalente efetiva “indoor”.
2. A heterogeneidade dos resultados não evidencia influência direta da jazida de urânio de Espinharas com os municípios adjacentes, principalmente, São José do Sabugi.
3. As médias das taxas de doses obtidas para o referido estudo asseguram níveis de radiação natural superiores à média global estimada para crosta terrestre.
4. Com a avaliação da dosimetria da região, ainda não é possível medir o risco determinístico decorrente da exposição radioecológica.
5. O estudo ainda permitiu definir, estocasticamente, um valor radiométrico de referência para dosimetria do município de Espinharas,  $0,87 \text{ mSv.a}^{-1}$ , conferindo um fator de 2 vezes a estimativa da UNSCEAR para doses externas em ambientes fechados.
6. A dosimetria ambiental para todos os municípios estudados permitiu concluir que, independente da ocorrência uranífera de Espinharas, os valores das médias obtidas para as taxas de doses nos ambientes fechados foram similares, cujo valor referenciado foi de  $0,99 \text{ mSv.a}^{-1}$ .
7. As doses médias devidas a exposição gama “indoor” atendem aos requisitos mínimos de proteção radiológica, muito embora esse limite seja utilizado apenas para fontes antrópicas.

## REFERÊNCIAS

ABU-HAJJA, O. **Determination of Natural Radionuclides Concentrations in Surface Soil in Tafila/Jordan.** Modern Applied Science, v.6, n. 3, p. 87-90, 2012.

ABOJASSIM, A. A. **Uranium Concentrations measurement for Ground Water and Soil Samples in Al-Najaf/Iraq.** Journal of Applied Chemistry, v. 6, n. 5, p. 61-65, 2014.

Al-SALEH, F. S. **Measurements of indoor gamma radiation and radon concentrations in dwellings of Riyadh city, Saudi Arabia.** Applied Radiation and Isotopes, Vol. 65, p 843–848J. 2007.

ALMGREN, S.; ISAKSSON, M.; BARREGARD, L. **Gamma radiation doses to people living in Western Sweden.** Journal of Environmental Radioactivity, Vol. 99, p 394-403, 2008.

AMARAL, R. S. ; MAZZILI, B.; VASCONCELOS, W.; BORGES, E.; SILVERA, S. **Intake of uranium and radium-226 due to food crops consumption in the phosphate region of Pernambuco Brazil.** Journal of Environmental Radioactivity. United Kingdom, v. 82, p. 383-393, 2005.

ANDRELLO, A. C. **Aplicabilidade do  $^{137}\text{Cs}$  para Medir Erosão do Solo: Modelos Teóricos e Empíricos.** 2004. 171p. Tese (Doutorado em Física). Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2004.

ANJOS, R. M.; VEIGA, R.; SOARES, T.; SANTOS, A. M. A.; AGUIAR, J. G.; FRASCÁ, M. H. B. O.; BRAGE, J. A. P.; UZÊDA, D.; MANGIA, L.; FACURE, A.; MOSQUERA, B.; CARVALHO, C.; GOMES, P. R. S. **Natural radionuclide distribution in Brazilian commercial granites.** Radiation Measurements. v. 39, p. 245-253, 2005.

ANTONIO FILHO, J. **Influência da Temperatura e Umidade Relativas em Dosímetros utilizados em Monitoração Pessoal.** 1982. 135p. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares), Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 1982.

AQUINO, R. R. **Avaliação da Radioatividade Natural em Areias das Praias da Grande Vitória, Espírito Santo.** 2010. 79p. Dissertação (Mestrado em Ciências), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

ARAÚJO, E. E. N. **Avaliação da Atividade do Rádio Equivalente na Matéria-Prima das Olarias do Sertão Paraibano.** 2014. 82p. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares), Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014.

BABAI, K. S.; POONGOTHAI, S.; PUNNIYAKOTTI, J. **Determination of Environmental Radioactivity ( $^{238}\text{u}$ ,  $^{232}\text{th}$  and  $^{40}\text{k}$ ) and Indoor Natural Background Radiation Level in Chennai City (Tamilnadu State), Índia.** Radiation Protection Dosimetry, vol. 153, n° 4, pp. 457–466, 2013.

BATISTA, B. J. B. **Avaliação de Dosímetros Termoluminescentes para uso em Radioterapia com Fótons de Alta Energia.** 2011. 106p. Dissertação (Mestrado em Ciências). Instituto de Física – Departamento de Física Nuclear. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

BARSANELLI, C. **Métodos para Implementação da Dosimetria IN VIVO (Dose de Entrada) com Dosímetros Termoluminescentes na Radioterapia Externa com Feixe de Fótons.** 2006. 77 p. Dissertação (Mestrado em Ciências). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

BATEL, V. I. P. **Optimização da Metodologia de Avaliação de Doses de Corpo Inteiro em Dosimetria Individual de Radiação Externa.** 2009. 142p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Física). Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, 2009.

BILSKI, P.; OBRYK, B.; STUGLIK, Z. **Behaviour of LiF:Mg,Cu,P and LiF:Mg,Ti thermoluminescent detectors for electron doses up to 1 MGy.** Radiation Measurements, v. 45, p.576–578, 2010.

BONOTTO, D. M. **Comportamento Hidro-geoquímico do  $^{222}\text{Rn}$  e Isótopos de Urânio  $^{238}\text{U}$  e  $^{234}\text{U}$  sob Condições controladas de Laboratório e em Sistemas Naturais.** 1996. 221p. Tese (Doutorado em Livre Docência). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista (UNESP), São Paulo, 1996.

BOS, A. J. J. **High Sensitivity Thermoluminescence Dosimetry.** Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. v. 184, p. 3-28, 2001.

CALCINA, C. S. G. **Características Dosimétricas para Campos Pequenos, Visando a Implementação de um Sistema Postal de Controle de Qualidade na Radiocirurgia.** 2006. 126p. Tese (Doutorado em Ciências). Faculdade de Filosofia Ciências e Letras de Ribeirão Preto/ USP. Ribeirão, 2006.

CAMPOS, M. C. C.; QUEIROZ, S. B. **Reclassificação dos Perfis Descritos no Levantamento Exploratório – Levantamento de Solos do Estado da Paraíba.** Revista de Biologia e Ciência da Terra, primeiro semestre, v.16, n. 1, 2006.

CAMPOS, S. S. **Avaliação de Materiais para Aplicação em Dosimetria Retrospectiva.** 2009. 138p. Dissertação (Mestrado em Física), Departamento de Física, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2009.

CAMPOS, L. L. **Thermoluminescence of Materials and its Application on Radiation Dosimetry**. Cerâmica, v. 44, n. 290, São Paulo, 1998.

Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69131998000600007>>. Acesso em 26 de Junho de 2012.

CASTRO, M. R. F. C. M. **Estudo e Aplicação de Filmes Termoluminescentes de P (VDF-TrFE) CaSO<sub>4</sub>:Mn em Radiografia Digital**. 2004. 89p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Nuclear). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

CASTRO, R. C. **Cálculo de Dose Equivalente em Órgãos de Pacientes Devido a Fotonêutrons Gerados em Aceleradores Lineares Clínicos**. 2005. 85p. Tese (Doutorado em Ciências de Engenharia Nuclear). Universidade Federal do Rio de Janeiro – RJ, 2005.

CAVALCANTE, F. **Avaliação das Doses Efetivas e Efetivas Coletivas da Radiação Natural na Região de Ribeirão Preto (SP)**. 2012. 85p. Dissertação (Mestrado em Ciências: Física Aplicada à Medicina e Biologia), Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2012.

CEMBER, H.; JOHNSON, T. E. **Health Physics**. 4 ed., McGraw-Hill, p.888, 2009.

CHOUGAONKAR, M. P.; EAPPEN, K. P.; RAMACHANDRAN, T. V.; SHETTY, P. G.; MAYYA, Y. S.; SADASIVAN, S.; VENKAT RAJ, V. **Profiles of doses to the population living in the high background radiation areas in Kerala, Índia**. Journal of Environmental Radioactivity, v. 71, p. 275–297, 2004.

CUNHA, C. J. **Construção de Monitores de Pulso para Dosimetria de Extremidades em Medicina Nuclear**. 2006. 72p. Dissertação (Mestrado em Física). Núcleo de Pós-Graduação em Física, Universidade Federal de Sergipe, Sergipe, 2006.

DATZ, H.; HOROWITZ, Y. S.; EPSTEIN, L.; OSTER, L.; LIVINGSTONE, J.; HOROWITZ, A.; KOL, M.; MARGALLOT, M. **Energy dependence of the supralinearity (f(D)max) of peaks 7 and 8 in the high temperature thermoluminescence of LiF:Mg, Ti(TLD-100): Interpretation using the Unified Interaction Model**. Radiation Measurements, v. 46, p. 1436-1439, 2011.

DAVIS, S. D. **High Sensitivity Lithium Fluoride As a Detector for Environmental Dosimetry**. 2003. 98p. Dissertação (Mestrado em Ciências). McGill University (Unidade de Física Médica), Montreal, 2003.

DELGADO, A.; GOMEZ ROS, J. M. **Modifications induced in the TLD-100 trap distribution during exposures at different ambient temperatures**. Radiation Protection Dosimetry. v. 34, p. 233-235, 1990.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM). **Mineração no Semiárido Brasileiro**. Brasília, p. 201, 2009.

D'ANGELO, L.; FURETTA, C.; GIANCOLA, S.; IANNOLI, D.; SCACCO, A. **Verification of Treatment Planning Systems for Therapeutic Irradiations using Thermoluminescence Dosimeters.** Radiation Protection Dosimetry, v. 85, n. 1-4, p. 401-404, 1999.

EISENBUD, M.; GESELL, T. **Environmental Radioactivity: from natural, industrial, and military sources.** New York: Academic Press, p. 656, 1997.

FERREIRA, C. C. **Desenvolvimento de Metodologia para Cálculo de Dose Efetiva em Tomografia Computadorizada.** 2010. 100p. Tese (Doutorado em Física). Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2010.

FERNANDES, H. M.; RIO, M. A. P.; FRANKLIN, M. R. **Impactos Radiológicos da Indústria do Fosfato.** Série Estudos e Documentos. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, n. 56, p. 46, 2004.

FILHO, P. F. L. H.; XAVIER, A. M.; PONTEDEIRO, E. M.; FERREIRA, R. S. **Segurança nuclear e proteção do meio ambiente.** e-papers. p. 301. Rio de Janeiro, 2004.

FREITAS, A. R.; SOUZA, I. F. **Radiologia Odontológica.** 2. ed. São Paulo, Artes Médicas, p. 610. 1988.

FURETTA, C. **Handbook of Thermoluminescence.** New Jersey: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2003.

GHIASSI-NEJAD, M.; MORTAZAVI, S. M. J. Cameron, J. R.; **Niroomand-rad, A., Karam, P.A. Very High Background Radiation Areas of Ramsar, Iran: Preliminary Biological Studies.** Health Physics, v. 82, n. 1, p. 87-93, Jan. 2002.

HAZRATI, S.; SADEGHI, H.; AMANI, M.; ALIZADEH, B.; FAKHIMI, H.; RAHIMZADEH, S. **Assessment of Gamma Dose Rate in Indoor Environments in Selected Districts of Ardabil Province, Northwestern Iran.** International Journal of Occupational Hygiene, v. 2, p 42-45, 2010.

HOROWITZ Y.S. **Thermoluminescence and Termoluminescent dosimetry,** v. 1, CRC Press, INC. Boca Raton, Florida, USA. 1984.

HOROWITZ, Y.; FUKS, E.; DATZ, H.; OSTER, L.; LIVINGSTONE, J.; ROSENFELD, A. **Mysteries of LiF TLD response following high ionization density irradiation: Glow Curve shapes, dose response, the unified interaction model and modified track structure theory.** Radiation Measurements, v. 46, p. 1342-1348, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Demográfico. 2010.** disponível em: <http://www.ibge.gov.br>, acesso em: 30 mai. 2013.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). **Guidelines for Radioelement Mapping Using Gamma Ray Spectrometry Data.** IAEA Publication, Technical Report: TECDOC 1363, ISSN 1011-4289, Viena, p. 179, 2003.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). **Dosimetry in Diagnostic Radiology: An International Code of Practice.** International Atomic Energy Technical Report Series (IAEA-TRS), n. 457, Vienna, 2007.

INTERNATIONAL COMMISSION RADIATION PROTECTION (ICRP). **Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.** ICRP Publication 60, Pergamon Press, Oxford. Annals of ICRP 21. 1991.

INTERNATIONAL COMMISSION RADIATION PROTECTION (ICRP). **Protection Against  $^{222}\text{Rn}$  at Home and at Work.** ICRP Publication 65, Annals of the ICRP 23, 1993.

JUNIOR, V. C. **Caracterização do Campo de Nêutrons na Instalação para Estudo em BNCT no Reator IEA-R1.** 2008. 101p. Dissertação (Mestrado em Ciências de Tecnologia Nuclear - Reatores). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

KANNAN, V.; RAJAN, M. P.; IYENGAR, M. A. R.; RAMESH, R. **Distribution of natural and antropogenia radionuclides in soil and beach sand simples of Kalpakkam (India) using hyper pure germanium (HPGe) gamma ray spectrometry.** Applied Radiation and Isotopes. v. 57, p. 109-119, 2002.

KARUNAKARA, N.; YASHODHARA, I.; SUDEEP KUMARA, K.; TRIPATHI, R.M.; MENON, S.N.; KADAM, S.; CHOUGAONKAR, M. P. **Assessment of ambient gamma dose rate around a prospective uranium mining area of South India – A comparative study of dose by direct methods and soil radioactivity measurements.** Results in Physics, vol. 4, p. 20–27, 2014.

KNOLL, G. F. **Radiation Detection and Measurement.** 3<sup>rd</sup> ed, 802 p. John Wiley & Sons, 2000.

KRON, T. **Thermoluminescence dosimetry and its applications in medicine-Part 1: Physics, materials and equipment.** Australasian physical & Engineering sciences in medicine. vol. 17, n<sup>o</sup>4, pp.175-199, 1994.

KUMAR, R.; MAHUR, A. K.; RAO, N. S.; SENGUPTA, D.; PRASAD, R. **Radon exhalation rate from sand samples from the newly discovered high background radiation area at Erasma beach placer deposit of Orissa, India.** Radiation Measurements, v. 43, p. S 508-S 511, 2008.

LEAL, M. A. **Procedimentos para Dosimetria in vivo com TLD-100 e Diodos Semicondutores em Tratamento de Câncer na Região Pélvica com Feixes Externos de Fótons.** 2011. 172p. Tese (Doutorado no Programa de Engenharia Nuclear, COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, 2011.

LIMA, R. A. **Avaliação da Dose na População da Região Urano-Fosfática do Nordeste que Utiliza os Recursos Hídricos da Região.** 1996. 187p. Tese (Doutorado em Ciências), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

MALANCA, A.; LAURA, G. **Natural Radiation Exposure in A Municipality of the Brazilian Sertão.** Environment International. vol. 22, n° 2, pp. 213-217, 1996.

MALATHI, J.; ANDAL VANMATHI, A. K.; PARAMESVARAN, A.; VIJAYSHANKAR, R.; SELVASEKARAPANDIAN, S. **Study of indoor gamma radiation in Coimbatore City, Tamilnadu, India.** International Congress Series, 1276, p. 344–345, 2005.

MAURÍCIO, C. L. P.; BECKER, P. H. B.; KASPRYKOWSKI, C. F. **TLD Data Acquisition and Analysis System for Neutron Individual Monitoring.** Radiat. Prot. Dosim. 34(1/4), 161-163, 1990.

McKEEVER, S. W. S., **Thermoluminescence of solids.** Cambridge Univ. Press, Cambridge, p. 376. 1985.

MÁDUA, F. M. **Determinação de Fatores de Conversão de Dose para Radiação GAMA Externa em Residências.** 2000. 64p. Dissertação (Mestrado em Ciências). IPEM, São Paulo, 2000.

MANDAKINI MAHARANA; SWARNKAR, M.; CHOUGAONKAR, M. P.; MAYYA, Y. S.; SENGUPTA, D. **Ambient Gamma Radiation Levels (Indoor and Outdoor) in the Villages Around Jaduguda (India) Using Card-Based CaSO<sub>4</sub>:DY TL Dosimeters.** Radiation Protection Dosimetry, vol. 143, n° 1, pp. 88–96, 2011.

MATSUSHIMA, L. C. **Avaliação da Resposta de Detectores Termoluminescentes na Dosimetria de Feixes Clínicos Utilizando Diferentes Objetos Simuladores.** 2010. 90p. Dissertação (Mestrado em Ciências). IPEM, São Paulo, 2010.

MELO, L. R. **Avaliação da Incidência e Mortalidade por Câncer na População Residente em região com anomalia geológica na ocorrência de urânio: Estudo de caso: Monte Alegre, PA.** 2009. 59p. Dissertação (Mestrado em Ciências), Programa Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Rio de Janeiro, 2009.

MELLO, M. S. **Incertezas dos Parâmetros Avaliados por um Sistema Postal em Controle de Qualidade para Feixes de Fótons em Radioterapia.** 2010. 114 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Nuclear), Programa de Engenharia Nuclear, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2010.

MELLO, F. R.; BRITO, S. M. O.; CHAVES, J. M. **Caracterização de Argilas Utilizadas em Olarias em Feira de Santana-BA, através de Análise Espectral.** Revista de Biologia e Ciências da Terra. v. 12, p. 128-137, 2012.

MIAH, M. I., **Environmental gamma radiation measurements in Bangladeshi houses.** Radiat. Meas., Vol. 38, p 277-280, 2004.

MOHAMMED, N. K.; MAZUNGA, M. S. **Natural Radioactivity in Soil and Water from Likuyu Village in the Neigh borhood of Mkuju Uranium Deposit.** International Journal of Analytical Chemistry, Tanzania, maio, 2013. Disponível em: <<http://www.hindawi.com/journals/ijac/2013/501856/>>. Acesso em 25 abr. 2014.

MONTEIRO, I. H. T. S. **Determinação das Taxas de Dose Ambientais e Ocupacionais de Radiação Gama, em Consequência da Presença de RDS-111 e do Deposito de Rejeitos Radioativos do IEN/CNEN.** 2005. 141p. Tese (Doutorado em Engenharia), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

MOLYVDA-ATHANASOPOULOU, E.; KARLATINA, M.; GOTZAMANI-PSARRAKOU, A.; KOULOURIS, CH.; SIOUNTAS, A. **Radiation exposure to patients and radiologists during interventional procedures.** Radiation Protection Dosimetry, v. 147, p. 255-258, set. 2011.

NASCIMENTO, N. C. E. S. **Dosimetria de Extremidades para Campos Mistos Beta - Fótons.** 2011. 63p. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares), Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

NEDAIE, H. A.; DARESTANI, H.; BANAEI, N.; SHAGHOLI, N.; MOHAMMADI, K.; SHAHVAR, A.; BAYAT, E. **Neutron dose measurements of Varian and Elekta linacs by TLD-600 and TLD-700 dosimeters and comparison with MCNP calculations.** J Med Phys. v. 39(1), p. 10-7, 2014.

NUNES, M. G. **Avaliação do Desempenho dos Detectores Termoluminescentes de CaSO<sub>4</sub>:Dy e LiF:Mg,Ti na Dosimetria de Feixes Clínicos de Elétrons.** 2008. 93p. Dissertação (Mestrado em Ciências). IPEM, São Paulo, 2008.

OLIVEIRA, M. L. **Desenvolvimento de um Sistema de Referência e de uma Metodologia para Calibração de Aplicadores Oftálmicos Utilizados em Braquiterapia.** 2005. 110p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear -Aplicações), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

OLIVEIRA, F. L. **Avaliação da Dose em Radioterapia Crânio - Espinhal para Meduloblastoma.** 2008. 76p. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares), Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

PAIVA, C. T. **Estudo da mobilidade e Dispersão de  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{222}\text{Rn}$  e Metais Pesados no Sistema Solo – Rocha do Depósito de U – ETR de São José de Espinharas (PB).** 2008. 223p. Tese (Doutorado em Geociências). Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

PAN-BRASIL – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Disponível em: <[http://www.mma.gov.br/estruturas/sedr\\_desertif/\\_arquivos/pan\\_brasil\\_portugues.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/sedr_desertif/_arquivos/pan_brasil_portugues.pdf)> Acesso em 07 de Junho de 2014.

PIRES, A. C. B. **Identificação geofísica de áreas de alteração hidrotermal, Crixás - Guarinos, Goiás.** *Revista Brasileira de Geociências.* v. 25, n.1, p. 61-68, 1995.

PRODEEM - **Projeto Cadastro de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea.** Diagnóstico do Município de São José de Espinharas. 2005. Disponível em <<http://www.cprm.gov.br>>. Acesso em: 14 Mai. 2011.

QUARTO, M.; PUGLIESE, M.; ROCA, V. **Gamma dose rate measurements in dwellings of Campania region, South Italy.** *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 115, p. 114-117, 2013.

RAH, JE.; OH DO H.; SHIN, D.; KIM, DH.; JI, Y. H.; KIM, J. W.; PARK, S. Y. **Dosimetric evaluation of a glass dosimeter for proton beam measurements.** *Applied Radiation and Isotopes*, v. 70, p. 1616–1623, ago. 2012.

ROSABIANCA TREVISI; ANNAPAOLACARICATO; MARCO D’ALESSANDRO; MANUEL FERNÁNDEZ; FEDERICA LEONARDI; ARMANDO LUCHES; SABRINA TORNNARINI; MIRIAN VESCHETTI. **A Pilot study on Natural radioactivity in schools of south-east Italy.** *Environment International*, v. 36, p. 276-280, 2010.

ROSS, J. L. S. **Geomorfologia: Ambiente e Planejamento.** Contexto. 88p. São Paulo, 1990.

SANTOS JÚNIOR J. A. **Migração de urânio e rádio-226 no solo em torno da ocorrência urinífera do município de Pedra - PE.** 2005. 89p. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares), Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005.

SANTOS JÚNIOR, J. A.; CARDOSO, J. J. R. F.; SILVA, C. M.; SILVEIRA, S. V.; AMARAL, R. S. **Determination of radionuclides in the environment using gamma-spectrometry.** Journal of Radio analytical and Nuclear Chemistry, v. 269, p. 451-455, 2006.

SANTOS JÚNIOR, J. A. **Avaliação Radiométrica do U-238, Ra-226, Th-232 E K-40 em uma Área Anômala do Agreste de Pernambuco.** 2009. 142p. Tese (Doutorado em Tecnologias Energéticas e Nucleares), Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

SANTOS, R. N.; MARQUES, L. S.  **$^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$  and  $^{228}\text{Ra}/^{232}\text{Th}$  activity ratios of Cameroon volcanic line: investigation of secular radioactive disequilibrium in the  $^{238}\text{U}$  and  $^{232}\text{Th}$  decay series.** In: South American Symposium on Isotope Geology. Salvador: CBPM; IRD. v. 4, p. 675-678. 2003.

SELVASEKARAPANDIAN, S.; LAKSHMI, K. S.; BRAHMANANDHAN, G. M. MEENAKSHISUNDARAM, V. **Indoor gamma dose measurement along the East coast of Tamilnadu, India using TLD.** International Congress Series, 1276, p. 327– 328, 2005.

SILVA, A. A. **Dosimetria radioecológica na ocorrência uranífera de São José de Espinharas-PB.** 2014. 66p. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares), Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014a.

SILVA, F. F. **Dosimetria ambiental de uma área uranífera do município de São José de Espinharas - PB.** 2014. 74p. Tese (Doutorado em Tecnologias Energéticas e Nucleares), Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014b.

SILVEIRA, R. R. **Utilização de Redes Neurais Artificiais para Identificação de Energias em Campos Fotônicos com materiais Termoluminescentes.** 2006. 64p. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares), Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.

SILVAKUMAR, R.; SELVASEKERAPANDIAN, S.; MUGUNTHAMANIKANDAN, N. **Indoor gamma dose measurements in Gudalore (India).** Applied Radiation and Isotopes, v. 56, p. 883-889, 2002.

SOUZA, L. B. F. **Estudo da Sensibilidade da Resposta Termoluminescente do Quartzo de Solonópoles (CE) por Tratamentos Térmicos e Altas Doses de Radiação.** 2008. 111p. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares), Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

SUNDAL, A. V.; STRAND, T. **Indoor gamma radiation and radon concentrations in a Norwegian carbonatite area.** Journal of Environmental Radioactivity, v. 77 p. 175–189, 2004.

SOUZA, E. M.; FARIAS, E. E.; SILVA FILHO, C. A.; VILLAR, H. P.; FRANÇA, E. J.; HAZIN, C. A. **Ocorrência de Urânio em Pocinhos, Paraíba – A Anomalia de Sítio Bravo. Petrografia e Radiometria.** Estudos Geológicos, v. 22, p. 93-103, 2012.

SUJO, L. C.; CABRERA, M. E. M.; VILLALBA, L.; VILLALOBOS, M. R.; MOYE, E. T.; LEÓN, M. G.; GARCIA-TENORIO, R.; GARCÍA, F. M.; PERAZA, E. F. H.; AROCHE, D. S. **Uranium-238 e thorium-232 series concentrations in soil, radon-222 indoor and drinking water concentrations and dose assessment in the city of Aldama, Chihuahua, Mexico.** Journal of Environmental Radioactivity. v. 77, p. 205-219. 2004.

SZEWCZAK, K.; JEDNORÓD, S.; KRAJEWSKI, P. **Individual dose monitoring of the nuclear medicine departments staff controlled by Central Laboratory for Radiological Protection.** NuclMed Ver Cent East Eur, v. 16(2), p. 62-66, 2013.

TAUHATA, L.; SALATI I. P. A.; PRINZIO, R. DI.; PRINZIO, M. A. R. R. DI. **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos.** Instituto de Radioproteção e Dosimetria - IRD.Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN. Rio de Janeiro, 5ª Revisão,p. 242, Ago. 2003.

TIPLER, P. A.; LLEWELLYN, R. A. **Física Moderna.** LTC, Editora, 2001.

TYKUA, R.; BERG, D. **Man-Made and Natural Radioactivity in Environmental Pollution and Radiochronology.** Klywer Academic Publishers, p. 419, 2004.

UNSCEAR (United Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiations). **Exposures from Natural Radiation Sources.** United Nations, New York, 2000.

UNSCEAR (United Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiations). **Reportto the General Assembly,** vol. 1, Annex. B; 2008.

VASCONCELOS, W. E. **Aplicação de Técnicas de Inteligência Artificial na Avaliação da Dose de Populações de Regiões de Alto Background Natural.** 2009. 93 p. Tese (Doutorado em Tecnologias Energéticas e Nucleares), Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

VEIGAS, C. C. B. **Dosimetria in vivo com o Uso de Detectores Semicondutores e Termoluminescentes Aplicada ao Tratamento de Câncer de Cabeça e Pescoço.** Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Nuclear). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.

XAVIER, A. M.; GAIDANO, E.; MORO, J. T.; HEILBRON, P. F. **Princípios Básicos de Segurança e Proteção Radiológica.** 3ª Ed. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Comissão Nacional de Energia Nuclear, Abril 2006. Disponível em <<http://www6.ufrgs.br/spr/SegurancaProtRad.pdf>>. Acesso em: 16 Out. 2012.

WEI, L.; ZHA, Y.; TAO, Z.; HE, W.; CHEN, D.; YUAN, Y. **Epidemiological Investigation of Radiological Effects in High Background Radiation Areas of Yangjiang, China.** J. Radiat.,v.31, p. 119-136. 1990.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Preliminary Dose Estimation from the Nuclear Accident after the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami.** WHO Library Cataloguing – in – Publication Data, p. 124, 2012.

ZULLO, J. R.; KUDCHADKER, R. J.; ZHU, X. R.; SAHOO, N.; GILLIN, M. T. **LiF TLD-100 as a dosimeter in high energy proton beam therapy-can it yield accurate results.** Medical Dosimetry, v. 35, n. 1, p. 63-66, 2010.