

Ministério da Saúde



COORDENAÇÃO DE ENSINO

Programa de Residência em Física Médica/Ênfase em Imagem

CAROLINA FARIAS DE CASTRO TOZO

Avaliação da metodologia de estimação da atividade em rejeitos sólidos radioativos perfurocortantes gerados em um Serviço de Medicina Nuclear

Rio de Janeiro

2019

Carolina Farias de Castro Tozo

Avaliação da metodologia de estimação da atividade em rejeitos sólidos radioativos perfurocortantes gerados em um Serviço de Medicina Nuclear

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto Nacional de
Câncer José Alencar Gomes da Silva
como requisito parcial para a
conclusão da Residência em Física
Médica/Ênfase em Imagem

Orientador: Jorge Wagner Esteves da Silva, D.Sc.

Rio de Janeiro

2019

CAROLINA FARIAS DE CASTRO TOZO

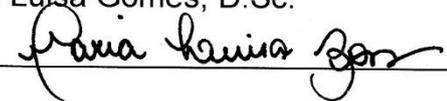
Avaliação da metodologia de estimação da atividade em rejeitos sólidos radioativos
perfurocortantes gerados em um Serviço de Medicina Nuclear

Avaliado e Aprovado por:

Jorge Wagner Esteves da Silva, D.Sc.

Ass. 

Maria Luisa Gomes, D.Sc.

Ass. 

Leonardo Vieira Travassos, M.Sc.

Ass. 

Data: 14 / 03 / 2019

Rio de Janeiro

2019

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a minha filha Catarina, que é quem me inspira a lutar e não desistir dos meus sonhos, para que ela veja em mim um exemplo para busca de seus próprios sonhos.

AGRADECIMENTOS

Finalizada uma etapa particularmente importante da minha vida, não poderia deixar de expressar o mais profundo agradecimento a todos aqueles que me apoiaram nesta longa caminhada e contribuíram para a realização deste trabalho nesses dois anos.

Agradeço ao meu orientador, Jorge Wagner Esteves da Silva, pela oportunidade de poder desenvolver esse trabalho com ele, por toda a disponibilidade e orientação prestada, pelo apoio, compreensão e amizade que sempre manifestou.

Ao meu esposo Sergio o meu maior agradecimento, pois sem o seu incentivo e apoio nada disso seria possível.

Agradeço a minha Mãe, minha madrinha Ângela e Primas, Kátia, Nádia e Beatriz, por todo acolhimento, apoio, amizade e por todo o carinho e cuidados com a minha filha, dando a mim a segurança e tranquilidade necessárias para desenvolver esse trabalho da melhor forma possível.

Agradeço a todos os novos amigos, colegas de curso, pelos momentos de descontração e parceria.

Agradeço a todos os professores, em especial a Luciene Santoro, que comigo compartilharam dos seus saberes.

“Que nada nos defina, que nada nos sujeite. Que a liberdade seja a nossa própria substância, já que viver é ser livre.” (Simone de Beauvoir)

RESUMO

A utilização das radiações ionizantes deve trazer um benefício líquido para a sociedade. A medicina nuclear é uma especialidade médica que emprega radiofármacos para o diagnóstico e tratamento de diversas doenças, o que invariavelmente ocasiona a produção de rejeitos radioativos.

Rejeitos radioativos são materiais contendo radionuclídeos sem utilização presente ou futura, e a sua liberação no meio ambiente pode causar a exposição da população.

A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), através da norma CNEN-NN-8.01 regulamenta os procedimentos para a gerência dos rejeitos radioativos, determinando como os mesmos devem ser descritos e classificados, os procedimentos para a sua coleta e segregação, embalagem, identificação, armazenamento, e os limites para a sua transferência para os serviços de coleta urbana.

Como determinado pela CNEN, todos os embalados contendo rejeitos radioativos devem ter a atividade estimada e registrada em sinalização afixada em seu exterior e no inventário de rejeitos radioativos. A determinação ou a estimativa da atividade é importante para o cálculo do tempo de armazenagem até a liberação dos rejeitos nos serviços de coleta de lixo hospitalar e urbano.

Portanto, são necessários procedimentos práticos para mensurar ou estimar a atividade. A metodologia aplicada pelo Serviço de Medicina Nuclear do Instituto Nacional de Câncer José Alencar Gomes da Silva (SMN/INCA) para estimar a atividade nos coletores de perfurocortantes (rejeitos radioativos) utiliza algumas aproximações físicas, considerando os embalados como fontes pontuais, homogêneas e isotrópicas sem autoabsorção ou espalhamento das radiações.

Essas aproximações não são geralmente compatíveis com a realidade, onde os embalados têm volumes consideráveis, com materiais que produzem atenuação e espalhamento das radiações.

O objetivo desse trabalho é avaliar a metodologia aplicada pelo SMN/INCA para estimar a atividade nos coletores de perfurocortantes e comparar tais estimativas com a atividade real dos rejeitos radioativos, determinando um possível fator de correção para as mesmas.

Foram realizados experimentos de forma a avaliar os procedimentos rotineiramente empregados no SMN/INCA, assumindo que podem existir diferenças significativas com relação a atividade presente nos embalados e aquelas estimadas por tais procedimentos, baseados nas medições obtidas com o uso de monitores de radiação calibrados na grandeza dosimétrica equivalente de dose ambiente - $H^*(10)$.

Os resultados obtidos mostram que a metodologia empregada para estimar tal atividade dos embalados, contendo rejeitos radioativos perfurocortantes, subestima a atividade real contida nos embalados em até 20%. Essas diferenças são devidas as variações de leituras obtidas com o monitor de radiação Geiger-Müller. Entretanto, tais variações se encontram na faixa de tolerância para tal classe de monitores calibrados em $H^*(10)$.

Embora existam diferenças entre a atividade real e a estimada, a correção é possível através de um fator de ajuste fixo ($k = 1,2$), que pode ser utilizado de forma a garantir que a metodologia produza resultados compatíveis com os requisitos normativos de proteção radiológica definidos pela CNEN.

Palavras-chave: determinação, atividade nuclear, resíduos de serviços de saúde

ABSTRACT

The use of ionizing radiation must provide net benefits to society. Nuclear medicine is a medical specialty that uses radiopharmaceuticals to diagnosis and treatment for several illnesses, inevitably producing radioactive waste.

Radioactive waste is any material containing radionuclides with no present or future use, and your release in the environment can cause radioactivity exposure to the population.

The Brazilian National Nuclear Energy Commission (CNEN), through norm CNEN NN-8.01, regulates the procedures for the management of such radioactive waste, determining how to describe and classify, the methods for their collection, segregation, packaging, identification, storage, and the limits to transfer it to urban waste collection services.

As ruled by CNEN, all packages containing radioactive waste must have the estimated activity recorded in external labels and on the inventory of radioactive waste. The activity determination or estimation is essential to the calculation of the storage time until the release of such waste in medical or urban waste collecting services.

Therefore, practical procedures are necessary to carry out that measurement or estimation. The methodology applied by the Nuclear Medicine Department of the Brazilian National Cancer Institute José de Alencar Gomes da Silva (SMN/INCA) to estimate the activity in the sharp containers (radioactive waste) uses some physical approximations to perform the activity estimation, considering the packages as punctual, homogeneous and isotropic sources with no radiation autoabsorption or scattering.

Those approximations have no link to the reality where the packages have considerable volumes with materials that produce radiation attenuation and scattering.

This work aims to evaluate the methodology applied by the SMN/INCA to estimate the activity in the sharp containers (radioactive waste) and compare the provided estimates with the actual activity on that waste, providing a correction factor for those estimations.

Experiments were carried out to evaluate the procedures employed in the routine of the Service. Assuming that there may be significant differences about the actual activities present in the packages and those estimated by such methodology,

based on measurements obtained with the use of radiation monitors calibrated in the dosimetric quantity equivalent of ambient dose - $H^*(10)$.

The results show that the methodology can underestimate the activity contained in the packages by up to 20%. Those differences are due to the variation on the Geiger-Müller monitor readings. However, the differences are in the tolerance range for those instruments when calibrated on $H^*(10)$.

Although there are differences between the actual activity and that estimated, the correction is possible with one fixed adjustment factor ($k = 1,2$), allowing the methodology gives results compatible with the regulatory requirements of radiological protection determined by CNEN.

Keywords: determination, nuclear activity, medical waste

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Protocolo de irradiação e cálculo do equivalente de dose ambiente $H^*(10)$ para radiações fortemente penetrantes, por meio de um campo expandido e alinhado na esfera ICRU.....	29
Figura 2. a) Exemplo de coletor de perfurocortante utilizado nos ensaios. b) Posicionamento adotado para as fontes dentro do coletor.....	36
Figura 3. (a) e (b) Posicionamento do coletor e monitor de radiação.	37
Figura 4. Manta de chumbo posicionada abaixo do coletor de perfurocortantes para os ensaios sem meio absorvedor-espalhador.	38
Figura 5. (a) e (b) Flaconetes posicionados no interior do coletor de forma a simular um meio absorvedor-espalhador. Trezentos e cinquenta preenchidos com água em todo o seu volume e trezentos e cinquenta preenchidos com ar.....	38
Figura 6. Comparação entre Atividade Real (R), Estimada (E) e Estimada Corrigida (E_{corr}) para o ensaio 1 (sem meio absorvedor-espalhador).	44
Figura 7. Comparação entre Atividade Real (R), Estimada (E) e Estimada Corrigida (E_{corr}) para o ensaio 2 (sem meio absorvedor-espalhador).	45
Figura 8. Comparação entre Atividade Real (R) e as Atividades Estimadas (E) nos pontos de monitoração, para o ensaio 1 (com meio absorvedor-espalhador). Onde (a), (b) e (c) são as 1 ^a , 2 ^a e 3 ^a medição no tempo para o ensaio, respectivamente.	46
Figura 9. Comparação entre Atividade Real (R) e as Atividades Estimadas (E) nos pontos de monitoração, para o ensaio 2 (com meio absorvedor-espalhador). Onde (a), (b) e (c) são as 1 ^a , 2 ^a e 3 ^a medição no tempo para o ensaio, respectivamente.	47
Figura 10. Comparação entre Atividade Real (R) e as Atividades Estimadas (E) nos pontos de monitoração, para o ensaio 1 (sem meio absorvedor-espalhador). Onde (a), (b) e (c) são as 1 ^a , 2 ^a e 3 ^a medição no tempo para o ensaio, respectivamente.	48
Figura 11. Comparação entre Atividade Real (R) e as Atividades Estimadas (E) considerando o comportamento conjunto dos pontos de monitoração, para o ensaio 1 (com meio absorvedor-espalhador).....	49
Figura 12. Comparação entre Atividade Real (R) e as Atividades Estimadas (E) considerando o comportamento conjunto dos pontos de monitoração, para o ensaio 2 (com meio absorvedor-espalhador).....	49

Figura 13. Comparação entre Atividade Real (R) e as Atividades Estimadas (E) considerando o comportamento conjunto dos pontos de monitoração, para o ensaio 1 (sem meio absorvedor-espalhador).....	50
Figura 14. Valores da atividade real/atividade estimada (k) para todos os ensaios em cada uma das 3 medidas realizadas.	52
Figura 15. Valores calculados para os erros das constantes k.....	52
Figura 16. Controle de reprodutibilidade do monitor de radiação empregado para a estimativa da atividade nos embalados.....	53
Figura 17. Teste de comparação múltiplas (Tukey-Kramer) com intervalo de confiança de 95%..	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. <i>Valores da atividade real para cada fonte radioativa utilizada em cada ensaio, ao longo do tempo.</i>	35
Tabela 2. Média dos valores estimados, atividade real, k e desvio padrão para cada ensaio.....	51
Tabela 3. Resultados da estimativa para cada uma das três medidas no tempo, em cada ponto para o ensaio 1, sem o meio absorvedor-espalhador.....	59
Tabela 4. Resultados da estimativa para cada uma das três medidas no tempo, em cada ponto para o ensaio 2, sem o meio absorvedor-espalhador.....	59
Tabela 5. Resultados da estimativa para cada uma das três medições no tempo, em cada ponto para o ensaio 1, com meio absorvedor-espalhador.....	60
Tabela 6. Resultados da estimativa para cada uma das três medições no tempo, em cada ponto para o ensaio 2, com meio absorvedor-espalhador.....	61
Tabela 7. Resultados da estimativa para cada uma das três medições no tempo, em cada ponto para o ensaio 3, com meio absorvedor-espalhador.....	61
Tabela 8. Resultados da estimativa para cada uma das três medidas no tempo, em cada ponto para o ensaio 4, com meio absorvedor-espalhador.....	62
Tabela 9. Resultados da estimativa para cada uma das três medições no tempo, em cada ponto para o ensaio 5, com meio absorvedor-espalhador.....	62
Tabela 10. Resultados da estimativa para cada uma das três medições no tempo, em cada ponto para o ensaio 1, sem meio absorvedor-espalhador.....	63
Tabela 11. Resultados da estimativa para cada uma das três medições no tempo, em cada ponto para o ensaio 2, sem meio absorvedor-espalhador.....	63
Tabela 12. Resultados da estimativa para a média dos pontos monitorados, para as três medições ao longo tempo para o ensaio 1, com meio absorvedor-espalhador..	64
Tabela 13. Resultados da estimativa para a média dos pontos monitorados, para as três medições ao longo tempo para o ensaio 2, com meio absorvedor-espalhador..	64
Tabela 14. Resultados da estimativa para a média dos pontos monitorados, para as três medições ao longo tempo para o ensaio 3, com meio absorvedor-espalhador..	65
Tabela 15. Resultados da estimativa para a média dos pontos monitorados, para as três medições ao longo tempo para o ensaio 4, com meio absorvedor-espalhador..	65

Tabela 16. Resultados da estimativa para a média dos pontos monitorados, para as três medições ao longo tempo para o ensaio 5, com meio absorvedor-espalhador..65

Tabela 17. Resultados da estimativa para a média dos pontos monitorados, para as três medições ao longo tempo para o ensaio 1, sem meio absorvedor-espalhador..66

Tabela 18. Resultados da estimativa para a média dos pontos monitorados, para as três medições ao longo tempo para o ensaio 2, sem meio absorvedor-espalhador..66

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
2. OBJETIVO	20
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
3.1. ATIVIDADE DE UMA FONTE RADIOATIVA (A).....	22
3.2. DETERMINAÇÃO DA ATIVIDADE EM EMBALADOS CONTENDO REJEITOS RADIOATIVOS EM MEDICINA NUCLEAR.....	23
3.2.1. <i>Taxa de Exposição (X) e Kerma no ar (K_{ar}).....</i>	25
3.2.2. <i>Relação entre taxa de exposição (X) e atividade da fonte (A).....</i>	26
3.2.3. <i>O equivalente de dose ambiente – $H^*(d)$.....</i>	28
3.2.4. <i>Sistemas de monitoração do equivalente de dose ambiente</i>	29
4. MATERIAL E MÉTODOS	33
4.1. FONTES RADIOATIVAS EMPREGADAS.....	33
4.2. MODELO GEOMÉTRICO DE DISTRIBUIÇÃO DAS FONTES NO EMBALADO DE PERFUROCORTANTES E ARRANJO EMBALADO-MONITOR DE RADIAÇÃO	35
4.3. AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA PRESENÇA DE MEIO ABSORVEDOR-ESPALHADOR NO INTERIOR DO EMBALADO PARA A ESTIMATIVA DA ATIVIDADE.....	37
4.4. ESTIMATIVA DA ATIVIDADE NOS EMBALADOS, CORREÇÃO TEMPORAL E DETERMINAÇÃO DO FATOR K.....	39
4.5. ANÁLISE ESTATÍSTICA	40
4.6. CONSIDERAÇÕES ÉTICAS.....	42
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
5.1. AVALIAÇÃO DO EFEITO RESULTANTE DA CORREÇÃO PROPOSTA NO ICRU REPORT 47 SOBRE A MÉDIA DAS LEITURAS OBTIDAS EM CADA FACE DO COLETOR PARA A ESTIMATIVA DA ATIVIDADE PRESENTE NO COLETOR EM CADA INSTANTE DE TEMPO, SEM MEIO ABSORVEDOR-ESPALHADOR ..	43

5.2. AVALIAÇÃO INTRA-ENSAIO, BASEADA NA COMPARAÇÃO DA ATIVIDADE ESTIMADA À PARTIR DA MONITORAÇÃO LOCAL NOS PONTOS MONITORADOS (A, B, C E D) E A ATIVIDADE REAL	45
5.3. AVALIAÇÃO COMPARATIVA ENTRE A ATIVIDADE ESTIMADA À PARTIR DA MÉDIA DOS PONTOS MONITORADOS (A, B, C E D) E A ATIVIDADE REAL	49
5.4. AVALIAÇÃO COMPARATIVA INTERENSAIOS, ATRAVÉS DO FATOR K OBTIDO PARA CADA ENSAIO	50
6. CONCLUSÃO	54
REFERÊNCIAS.....	55
ANEXO 1. TABELAS DE RESULTADOS REFERENTES À AVALIAÇÃO DO EFEITO RESULTANTE DA CORREÇÃO PROPOSTA NO ICRU REPORT 47 SOBRE A MÉDIA DAS LEITURAS OBTIDAS EM CADA FACE DO COLETOR PARA A ESTIMATIVA DA ATIVIDADE PRESENTE NO COLETOR EM CADA INSTANTE DE TEMPO.....	59
ANEXO 2. TABELAS DE RESULTADOS REFERENTES À AVALIAÇÃO INTRA-ENSAIO BASEADO NA COMPARAÇÃO DA ATIVIDADE ESTIMADA À PARTIR DA MONITORAÇÃO LOCAL NOS PONTOS MONITORADOS (A, B, C E D) E A ATIVIDADE REAL	60
ANEXO 3. TABELAS DE RESULTADOS REFERENTES À AVALIAÇÃO COMPARATIVA ENTRE A ATIVIDADE ESTIMADA À PARTIR DA MÉDIA DOS PONTOS MONITORADOS (A, B, C E D) E A ATIVIDADE REAL	64

1. INTRODUÇÃO

A utilização das radiações ionizantes deve trazer um benefício líquido para a sociedade, obedecendo aos princípios da justificação, da otimização da proteção radiológica e da limitação de dose ^{1,2}. A medicina nuclear é a modalidade médica que emprega radiofármacos (fármacos marcados com radionuclídeos) para o diagnóstico e tratamento de diversas doenças.

A administração de radiofármacos em pacientes para realização de terapias e/ou diagnósticos invariavelmente resulta na produção de rejeitos radioativos. Rejeitos radioativos são materiais radioativos para os quais não são previstas nenhuma utilização presente ou futura ^{3,4}. A liberação de materiais radioativos no meio ambiente potencialmente expõe a população à radiação ionizante, aumentando assim o risco de efeitos deletérios à saúde ⁴. Dado o potencial risco à saúde das populações, introduzido pela liberação de materiais radioativos, torna-se necessária a introdução de um sistema de gestão e gerenciamento de rejeitos radioativos, de forma a maximizar os benefícios do emprego de materiais radioativos com relação aos riscos associados ao seu uso.

A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), através da norma CNEN NN-8.01 ⁵, regulamenta como deve ser elaborado o plano de gerenciamento de rejeitos radioativos de uma instalação radioativa, descrevendo como os rejeitos radioativos devem ser descritos e classificados, qual o procedimento correto para coleta, segregação, acondicionamento, identificação, como e quando eles devem ser armazenados, os limites de isenção para o seu efetivo descarte nas redes urbanas de coleta de resíduos.

A preparação dos radiofármacos e a sua posterior administração nos pacientes para realização de procedimentos diagnósticos e terapêuticos produz uma quantidade de rejeitos radioativos, com diferentes características físicas, químicas e biológicas, dentre os quais: fontes de calibração fora de uso; agulhas, seringas e escalpes descartáveis; luvas descartáveis; frascos; papel absorvente; plásticos; restos de alimentos; utensílios e objetos que eventualmente venham a apresentar contaminação radioativa não passível de remoção por métodos simples.

Conforme definido em CNEN-NN-8.01⁵ e CNEN-NN-3.05⁶, todos os embalados contendo rejeitos radioativos, devem ser corretamente identificados e inventariados, tendo a sua atividade estimada e registrada na sinalização a ser afixada no mesmo e, registrada no inventário de rejeitos radioativos. A determinação/estimação da atividade contida no embalado é importante ainda para a definição do tempo de guarda dos rejeitos radioativos até que os mesmos possam ser liberados no sistema de coleta urbana de resíduos sólidos e de resíduos de serviços de saúde^{3,5,6}.

Materiais como frascos, seringas, cânulas IV, são de especial interesse uma vez que além de reterem uma quantidade de material radioativo, apresentam risco biológico, visto que em sua maioria são materiais perfurocortantes de uso intravenoso em pacientes. Todos esses materiais devem ser descartados em receptáculos de segurança biológica, conhecidos como coletores de perfurocortantes³, de forma a minimizarem o risco de contaminação biológica de todos aqueles envolvidos na manipulação dos mesmos.

Em atendimento aos requisitos normativos^{3,5,6}, as atividades, totais e específicas⁵ dos embalados devem ser portanto medidas ou estimadas, sendo demandados procedimentos que permitam de forma prática realizar tal medição ou estimativa.

A emissão da radiação ionizante, a partir de uma fonte, depende diretamente da sua geometria e distribuição de atividade⁷. No caso de fontes pontuais, essa emissão ocorre de forma isotrópica (igualmente distribuída em todas as direções do espaço), ao passo que no caso de fontes com geometrias complexas a distribuição espacial das emissões torna-se igualmente mais complexa^{7,8}.

A medição ou a estimação da atividade de qualquer tipo de fonte pode ser melhor realizada quando do emprego de um sistema de medição com geometria 4π ⁴, onde toda a informação espacialmente emitida em torno da fonte pode ser registrada com menor perda de informação.

Entre os sistemas detectores de radiação^{4,9,10} disponíveis nos Serviços de Medicina Nuclear (SMN), o detector que melhor se aproxima de uma geometria 4π é o medidor de atividade (ativímetro)^{11,12}, graças a sua configuração tipo poço. Apesar de sua melhor geometria para medir a atividade de forma direta, seu poço estreito só permite realizar a medida de pequenas amostras, como seringas e frascos, de forma isolada. Portanto, não é possível a sua utilização para a medição da atividade de

fontes de grandes dimensões, tais como a dos coletores de perfurocortantes, sendo necessário o emprego de uma metodologia para a medição ou estimativa da atividade do embalado.

A estimativa da atividade dos coletores de perfurocortantes geralmente é feita de forma indireta utilizando monitores de radiação, aproximações geométricas e fórmulas matemáticas, quando é realizado o seu armazenamento e descarte, usando a relação da taxa de exposição (\dot{X}) e atividade (A) de uma fonte pontual, e mediante a aplicação das constantes de taxa de exposição (T_δ) características de cada radionuclídeo envolvido ^{4,13-16}. No Brasil, a estimativa da atividade é normalmente realizada através da medida com o monitor de radiação situado à distância de 10 cm ou 100 cm da superfície do coletor perfurocortante ^{15,16}.

Contudo, a estimativa da atividade por esse método, considera o coletor de perfurocortante como uma fonte pontual, não levando em consideração a sua dimensão, geometria e distribuição não homogênea da atividade em seu volume, assim como os efeitos de autoabsorção, espalhamento e atenuação, que também são ignorados, mas que tem o potencial de gerar estimativas da atividade do embalado com diferenças da ordem de 20% a 70% com relação à atividade real presente no mesmo ^{15,16}.

2. OBJETIVO

O objetivo desse trabalho é avaliar a metodologia aplicada pelo SMN/INCA para estimar a atividade nos coletores de perfurocortantes, por meio da medida da taxa de exposição, com um monitor de radiação dotado de detector Geiger-Muller e comparar tais estimativas com a atividade real dos rejeitos radioativos de forma a determinar um fator de correção para tais estimativas.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Medicina Nuclear é uma especialidade médica, que emprega materiais radioativos denominados radionuclídeos, em conjunto com substâncias (fármacos) que sejam concentradas, excretadas ou metabolizadas por órgãos ou sistemas orgânicos alvo de estudo, com o objetivo de realizar o diagnóstico ou tratamento de diversas patologias ¹⁷⁻¹⁹.

A utilização dos radiofármacos em medicina nuclear invariavelmente resulta na produção de rejeitos radioativos. Rejeito radioativo é definido pela Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) como *“qualquer material que contenha ou esteja contaminado com radionuclídeos em concentrações ou valores de atividades maiores que os limites estabelecidos pela autoridade competente”* ²⁰.

Os rejeitos radioativos produzidos em medicina nuclear, geralmente apresentam características químicas e biológicas que tornam o seu gerenciamento mais complexo. Dessa forma os sistemas de gerenciamento dos rejeitos radioativos em medicina nuclear devem levar em consideração restrições ao manuseio direto dos diversos materiais, dado aos diferentes riscos físico, químico e biológico ^{3,20}.

A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), autoridade regulatória brasileira, determina que a dispensa de rejeitos radioativos sólidos só pode ser realizada no sistema de coleta de resíduo urbano quando sua atividade, específica ou total esteja limitada aos valores estabelecidos para cada radionuclídeo ⁵.

Para o tecnécio-99-metaestável (^{99m}Tc), radionuclídeo mais utilizado em medicina nuclear ^{18,21-23}, o limite de concentração de atividade para dispensa de materiais com quantidade inferior a 1000 kg é de 1×10^2 kBq/kg ⁵, fazendo com que os rejeitos radioativos possam ser liberados como resíduos sólidos de serviço de saúde no sistema de coleta urbana, sem oferecer qualquer risco extra devido à presença do material radioativo.

Como pode ser então observado, os rejeitos radioativos devem ser armazenados em segurança e em conformidade com os requisitos normativos ^{3,5,20} até que os mesmos atinjam atividades dentro dos níveis de dispensa. De forma a atender tais requisitos normativos, a atividade dos rejeitos radioativos deve então ser medida ou estimada ^{5,6,15,16}.

3.1. ATIVIDADE DE UMA FONTE RADIOATIVA (A).

O termo radioatividade refere-se aos fenômenos associados a transformações espontâneas que envolvem mudanças nos núcleos dos átomos ou nos seus estados energéticos. A energia liberada em tais transformações é emitida como partículas nucleares (prótons, nêutrons, partículas alfas, beta e pósitrons) e/ou fótons. Um núcleo instável, que dá origem a outro núcleo, que pode ou não ser estável, mas resulta em um estado de menos energia, é chamado radionuclídeo ^{4,12,24}.

Em uma amostra de material radioativo, o número de transformações espontâneas por segundo é proporcional ao número de átomos que estão por se transformar naquele instante. A probabilidade de decaimento por átomo por segundo é denominada de Constante de Decaimento (λ), é característica de cada radionuclídeo ^{4,8-10,12,24-26} e sua atividade em um determinado momento é dada matematicamente pela seguinte expressão:

$$A = - \frac{dN}{dt} = \lambda N$$

(equação 1)

onde dN é o número médio de núcleos nesse estado de energia devido a transformações nucleares espontâneas no intervalo de tempo dt . A unidade de atividade no Sistema Internacional de unidades (SI) é o s^{-1} , denominada becquerel (Bq). A antiga unidade denominada curie (Ci), ainda é, muitas vezes, adotada em alguns países, incluindo na rotina dos SMN no Brasil, a relação entre as unidades é $1\text{Ci} = 3,7 \times 10^{10}\text{Bq}$.

A norma CNEN-NN-8.01 estabelece que a concessão de dispensa aos rejeitos radioativos sólidos deve ser dada em termos de atividade total (A) ou específica (\bar{A}). A atividade específica de uma amostra radioativa é definida como a razão entre a atividade (A) e a sua massa total (m) ^{4,8}, que pode ser matematicamente dada pela expressão:

$$\bar{A} = \frac{A}{m}$$

(equação 2)

3.2. DETERMINAÇÃO DA ATIVIDADE EM EMBALADOS CONTENDO REJEITOS RADIOATIVOS EM MEDICINA NUCLEAR

A medida da atividade de uma fonte radioativa é geralmente baseada em algum processo de interação da radiação emitida pela fonte com a matéria (ionização, excitação, etc.). Essa interação resulta em algum tipo de sinal que pode ser posteriormente processado de uma forma prática, fornecendo um meio de se determinar a presença da radiação, a quantidade de radiação emitida ou mesmo a energia das radiações emitidas ^{9,10,12,25,27}.

A medida da atividade de uma amostra radioativa é comumente realizada por meio da contagem dos eventos de interação da radiação emitida pela fonte e o meio no qual essa interage, o qual denominamos contador de radiação ^{9-12,25-27}, ou seja, o registro de uma certa quantidade de eventos que ocorre na área sensível do detector em uma fração de tempo ^{9,11,12}.

Em geral, os sistemas de detecção são escolhidos de forma que a contagem registrada seja proporcional à taxa de decaimento ou atividade da fonte de radiação ^{9,10,25}. Contudo, nem sempre os detectores de radiação podem ser operados de forma a medir diretamente uma grandeza específica de interesse, tal como a atividade, sendo necessária a introdução de fatores de conversão que levam em conta as diferenças de interação da radiação com o meio detector (gás, líquido, sólido), além das condições de medição: se foram realizadas no ar, num simulador, e nas condições de temperatura e pressão padronizadas ^{4,28}.

Para isso os equipamentos devem ser calibrados sob condições especiais, utilizando-se radiações com as mesmas características físicas e faixa de energia que se pretende medir, com o objetivo de se obter um fator de calibração (ou conversão) a ser multiplicado pela leitura do instrumento para a determinação do valor das quantidade e unidade desejada para aquela aplicação específica ^{4,25,28}. Este é o procedimento utilizado para converter as grandezas básicas, como fluência e

exposição^{4,12,29}, que possuem padrões internacionais, para as grandezas operacionais^{4,28,30}.

Por esse motivo, os equipamentos de medida de radiação são calibrados com fontes de radiação padrão, rastreáveis a padrões onde se conhece a emissão da fonte e, assim, pode-se saber a resposta do detector a determinada medida^{4,28,30}. Dessa forma, a atividade de uma fonte radioativa pode ser obtida por meio do método de medida direta ou indireta, dependendo somente do tipo de uso e da calibração do detector.

Entre os detectores de radiação normalmente utilizados em medicina nuclear, a câmara de ionização^{4,9,10,25} do tipo poço se destaca na medida da atividade das fontes radioativas tanto no preparo, quanto na dispensação dos radiofármacos a serem administrados nos pacientes, sendo portanto denominados como medidores de atividade ou ativímetro^{11,12,31,32}. O ativímetro é utilizado para medir a atividade em pequenos recipientes, como seringas e frascos, e por esse motivo, são calibrados para ler diretamente em unidades de atividade, com opções para vários radionuclídeos diferentes¹².

Para a medida da atividade de uma fonte de grande volume, com distribuição homogênea da atividade, onde em geral não haja riscos adicionais quanto à sua manipulação, é possível a retirada de uma pequena amostra do material com volume e massa conhecidos e, por meio da medida da atividade dessa amostra no medidor de atividade, obter a atividade específica do material que pode ser corrigida para o volume total da fonte, permitindo dessa forma determinar a atividade total da fonte.

Entretanto, os coletores de rejeitos radioativos utilizados em medicina nuclear, além de apresentarem dimensões apreciavelmente maiores que aquelas adequadas para a mensuração direta da atividade nos ativímetros, não apresentam uma distribuição homogênea da atividade, e dada à sua natureza, geralmente envolvem riscos biológicos na sua manipulação, tornando inviável a sua utilização para fins de determinação da atividade dos embalados.

Ao menos no Brasil, geralmente a estimativa da atividade nos embalados contendo rejeitos radioativos é realizada de forma indireta, através da utilização de outra classe de detectores de radiação, os monitores de radiação^{11,12,26,27}.

Dentre os diferentes tipos de monitores de radiação, aqueles baseados em detectores Geiger-Müller^{4,9-12,27}, são os mais comumente disponíveis nos SMN. Ainda

que calibrados para operar como monitor de área, é possível utilizá-los para estimar a atividade dos embalados contendo rejeitos radioativos ^{15,16}.

Ao contrário dos ativímetros - que são calibrados para dar uma resposta direta da atividade da fonte radioativa em bequerel ou curie – os monitores de área são geralmente calibrados em outras grandezas, tais como a taxa de exposição \dot{X} e o equivalente de dose ambiente $H^*(10)$ ^{4,28}, exigindo que aproximações físicas e modelos matemáticos sejam empregadas na estimativa da atividade dos rejeitos contidos em cada embalado ^{8,15,16,33,34}.

3.2.1. Taxa de Exposição (\dot{X}) e Kerma no ar (K_{ar})

Para realizar a calibração de um equipamento e verificar a sua resposta em relação à interação da radiação e aos subprodutos resultantes dessas interações, torna-se necessário conhecer muito bem o campo de radiação e as suas características, e a definição de grandezas para não somente determinar a resposta do equipamento, como comparar essas respostas em relação aos padrões primários rastreáveis ³⁰.

Para descrever os níveis de radiação em um ambiente, a grandeza exposição (X) foi inicialmente definida. Exposição refere-se à quantidade de ionização do ar causada por uma fonte de fótons, ou seja, carga total média dos íons de um mesmo sinal, completamente freados no ar, produzidos por fótons incidentes em uma massa de ar seco ^{4,12,24,25}.

A unidade da exposição no SI é o C/kg, e a sua unidade especial é o roentgen (R). Uma exposição de 1 R implica em ionizações com liberação de uma quantidade de carga igual a $2,58 \times 10^{-4}$ C/kg de ar seco em condições padrão de temperatura e pressão. Em face às diversas limitações da grandeza exposição (ser limitada ao ar e aos fótons X ou γ) ^{4,12,25}, a mesma foi sendo substituída por uma quantidade relacionada conhecida como *kerma* (K), definida como:

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm}$$

(equação 3)

onde dE_{tr} é a soma das energias cinéticas iniciais de todas as partículas carregadas liberadas no material de massa dm . A unidade do kerma no sistema internacional de unidades (SI) é o $J.kg^{-1}$ ou gray (Gy) ^{4,24}. O *kerma* (***kinectic energie released per unit of mass***) é a grandeza que determina a quantidade de energia cinética média liberada na matéria para radiações de qualquer natureza, ao contrário da exposição, que se refere à carga produzida em decorrência das ionizações produzidas no ar e somente para fótons.

Usando o fato de que são necessários 33,7 eV de energia para produzir um par de íons no ar, e supondo que as perdas devidas à radiação de freamento (*bremstrahlung*) possam ser ignoradas, a relação entre a exposição (X) e kerma no ar (K_{ar}), pode ser calculada como ^{12,25}:

$$K_{ar}(Gy) \approx X \left(\frac{C}{kg} \right) \times 33,7 \approx X(R) \times 0,00869$$

(equação 4)

Exposição e kerma podem ser medidas através da utilização de sistemas de detecção baseados na medida da quantidade de ionizações produzidas pela radiação com as quais interagem.

3.2.2. Relação entre taxa de exposição (\dot{X}) e atividade da fonte (A).

A taxa de exposição (ou kerma no ar) \dot{X} ou \dot{K}_{ar} para fótons de energia superior à δ , que são emitidos por uma fonte pontual radioativa com atividade A a uma distância d no vácuo ^{12,24,25}, pode ser definida da seguinte forma:

$$\dot{X} \text{ ou } \dot{K}_{ar} = T_{\delta} \frac{A}{d^2}$$

(equação 5)

onde a constante de taxa de exposição (ou kerma no ar) T_δ é responsável por relacionar a atividade A , de uma fonte pontual de radiação isotrópica com a taxa de exposição (ou kerma no ar) \dot{X} ou \dot{K}_{ar} , a uma determinada distância d e δ é a energia de corte que determina os fótons de energia mínima que podem contribuir para essa exposição ^{13,25}.

Os fótons mencionados na definição incluem raios gama, raios x característicos e *bremsstrahlung* interno. A constante de taxa de exposição (ou kerma no ar) T_δ é característica de cada radionuclídeo específico ^{12,24,25}, sendo definida em termos de uma fonte pontual ideal, e não é aplicável a uma fonte extensa. Para uma fonte extensa podem ser produzidos atenuação, dispersão, radiação de aniquilamento e *bremsstrahlung* externo. Em muitos casos, esses processos exigem correções significativas. Qualquer meio que intervenha entre a fonte e o ponto de medição dará origem à absorção e dispersão para as quais são necessárias correções ^{24,25}.

Em termos do espectro de decaimento de um radionuclídeo, a constante de taxa de exposição (ou kerma no ar) T_δ pode ser escrita como:

$$T_\delta = \frac{1}{4\pi} \sum_i \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_i Y_i E_i$$

(equação 6)

Onde $\left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_i$ é o coeficiente de absorção de energia em massa no ar para fótons de energia E_i emitidos pelo radionuclídeo com rendimento Y_i . Esta relação terá unidades de taxa de exposição por unidade de atividade na distância d quando conversões de unidades e suposições apropriadas forem aplicadas ^{4,13}.

Para estimarmos a atividade de uma fonte de fótons precisamos conhecer, além da sua taxa de exposição, sua forma geométrica, espectro de emissão, distância e geometria da medida. Precisamos também separar as fontes, segundo seu aspecto da autoabsorção, em três categorias: fontes sem autoabsorção (caso ideal); fontes com autoabsorção e fontes com múltipla dispersão ⁸.

3.2.3. O equivalente de dose ambiente – $H^*(d)$

Ainda que os cálculos que levam à determinação das grandezas de proteção (tais como a dose absorvida) possam ser considerados simples, tais cálculos são baseados em dadas geometrias e condições de irradiação muito específicas que raramente são encontradas nas situações práticas^{4,30}. A Comissão Internacional de Unidades e Medidas de Radiação (ICRU) definiu novos conceitos e grandezas radiológicas mais consistentes ou úteis na prática para monitoração de área e individual^{4,28,30,35}. Essas grandezas foram adotadas pela CNEN e são denominadas grandezas operacionais^{4,28,30}.

A grandeza operacional recomendada para monitoração de área em campos de radiação de fótons, para radiação fortemente penetrante^{2,4,28}, é o equivalente de dose ambiente, $H^*(d)$. O equivalente de dose ambiente é definido em um ponto de um campo de radiação, sendo o valor do equivalente de dose que seria produzido pelo correspondente campo expandido e alinhado na esfera ICRU, na profundidade d , no raio que se opõe ao campo alinhado^{4,28,30}.

O campo expandido é definido como um campo hipotético onde a fluência e as suas distribuições angulares e energéticas tem o mesmo valor em todo o volume de interesse, no ponto de referência P , para um campo de radiação real. Um campo expandido e alinhado é um campo hipotético onde a fluência e distribuição energética são as mesmas que no campo expandido, porém, a fluência é unidirecional^{4,28,30}.

O valor recomendado de d pela ICRU é de 10 mm para radiações fortemente penetrantes e sua unidade de medida é o $J kg^{-1}$, que recebe o nome de *sievert* (Sv)^{4,12,28,30}. A esfera ICRU é composta por um material tecido equivalente com a seguinte composição em massa: 76,2% de oxigênio, 10,1% de hidrogênio, 11,1 de carbono e 2,6% de nitrogênio para uma densidade igual a $1 g/cm^3$; e seu diâmetro é igual a 30 cm.

Por esse motivo, todos os equipamentos para monitoração de área deveriam ser necessariamente, calibrados nessa unidade. Ainda que a medida de $H^*(d)$ requeira que o campo de radiação seja uniforme sobre as dimensões do instrumento e que o mesmo tenha uma resposta isotrópica²⁸.

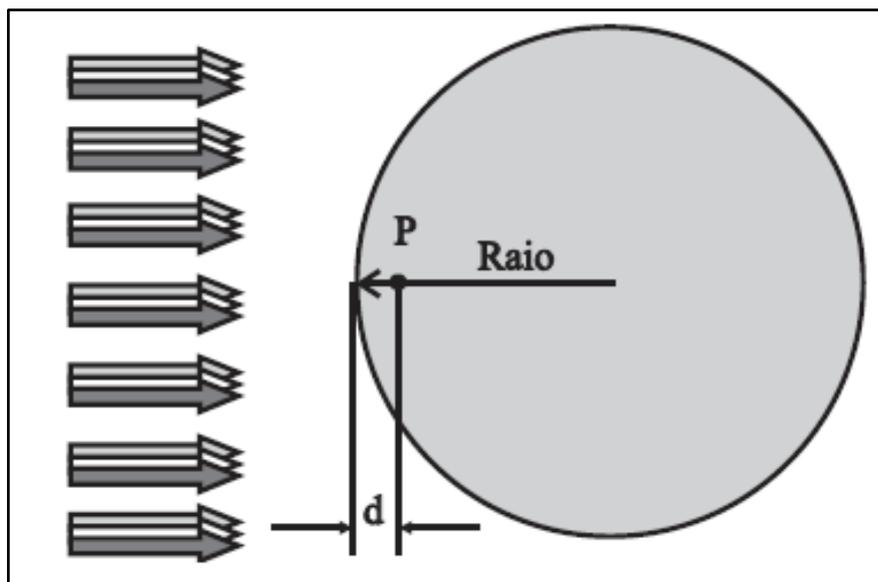


Figura 1. Protocolo de irradiação e cálculo do equivalente de dose ambiente $H^*(10)$ para radiações fortemente penetrantes, por meio de um campo expandido e alinhado na esfera ICRU. ⁴

3.2.4. Sistemas de monitoração do equivalente de dose ambiente

Como apresentado anteriormente, de forma que se possa mensurar o equivalente de dose ambiente sob todas as condições torna-se necessário que o instrumento tenha uma resposta angular isotrópica e características de retroespalhamento similares às da esfera ICRU, o que não pode ser atingido pelo uso do detector numa esfera real, em face às interações que ocorreriam na esfera, resultando numa resposta não isotrópica ^{28,30}. Instrumentos cuja resposta é quase isotrópica tem a sua resposta energética ajustada (quando necessário) de forma a simular os efeitos da absorção e espalhamento que a esfera teria sobre a sua resposta.

Para fótons, a resposta energética de um instrumento é diferente quando diferentes grandezas são avaliadas, como no caso de energias abaixo de 200 keV, onde as funções resposta nas grandezas exposição (ou kerma no ar) e o equivalente de dose ambiente apresentam diferenças importantes em função da energia ^{28,30}. Para fótons de energias abaixo de 300 keV, raios X filtrados são muitas vezes utilizados na calibração de dosímetros e monitores utilizados em proteção radiológica e as suas

dependências energéticas nas respostas desses instrumentos podem ser determinadas.

Dessa forma, coeficientes de conversão para o espectro fotônico são requeridos e diversos autores os tem fornecido de forma a correlacionar as diferentes grandezas, como por exemplo $H^*(10)$ e *exposição* ou *kerma no ar* ²⁸. Em geral tais coeficientes são necessários para modificar e recalibrar instrumentos que foram originalmente projetados para mensurar unidades/grandezas diferentes das grandezas operacionais.

Dentre os diversos sistemas de detecção da radiação ^{4,9,10,12,25,28}, as câmaras de ionização estão entre os mais largamente utilizados para a medida da dose equivalente e da taxa de dose equivalente para fótons e elétrons, sendo a ionização por unidade de massa do gás no interior da câmara relacionada com a dose absorvida em sua parede pelo princípio de Bragg-Gray ^{4,25,30,36,37}, por meio da medida da corrente gerada na câmara, as dimensões da cavidade e as propriedades do gás e da parede ²⁸.

Ainda que câmaras de ionização apresentem características que as tornem muito utilizadas para a mensuração das grandezas dose equivalente e taxa de dose equivalente, elas são mais comumente encontradas nos SMN na forma de ativímetros. Como anteriormente explicitados, estes são calibrados para mensurar a atividade de pequenas amostras. Em contrapartida, os monitores de radiação normalmente empregados em medicina nuclear (no Brasil) são baseados em outro tipo de detector a gás denominados contadores Geiger-Müller (GM) ^{4,9,10,25}, sendo esses também largamente empregados para medir taxas de dose equivalente a partir de campos de fótons e raios α e β ²⁸, através do número de contagens, visto que qualquer radiação que interaja no interior do volume sensível do detector produz pulsos de virtualmente o mesmo tamanho ^{4,9,10,25,28}.

Entretanto, para fótons a resposta energética relativa dos contadores GM para a grandeza $H^*(10)$ depende das características da parede do detector (número atômico e espessura). A resposta do detector aumenta com a energia para a faixa abaixo de 300 keV ^{9,28}. De forma a se normalizar a resposta do detector para uma ampla faixa de energias de interesse, usualmente utiliza-se um filtro perfurado construído por diferentes materiais de forma isolada ou em ligas metálicas, dentre os materiais empregados para tal fim se destacam o estanho, o cádmio, o chumbo entre outros, dependendo do tipo de aplicação ^{28,35}. A resposta para incidência normal pode

ser uniformizada para fótons entre 50 keV e 1,5 MeV dentro de $\pm 15\%$, sendo que usualmente tais filtros são projetados para nivelar a resposta relativa para a exposição, mas podem ser também redesenhados para nivelar a resposta na grandeza $H^*(10)$ ³⁸.

Para os detectores Geiger-Müller, o sinal é o resultado da soma das contribuições de todas as avalanches de íons produzidas em todo o volume sensível do detector, devido à interação com a radiação. A forma e a altura dos pulsos não são muito importantes, porque o pulso é usado apenas para sinalizar a presença da partícula ou fóton primário no volume sensível do detector ⁹⁻¹¹. Durante a formação de um pulso, o campo elétrico é bastante reduzido devido à presença de íons positivos ao redor do ânodo. Se uma nova partícula ou fóton chegar durante esse período, nenhum novo pulso será formado, porque o contador está inativo. Esse período de inatividade do detector, chamado de tempo morto (ou tempo de resolução do sistema) tem uma determinada duração ⁸⁻¹².

O detector se recupera lentamente, com a altura do pulso crescendo exponencialmente durante o período de recuperação ^{9,10,25}. O tempo morto típico para os detectores Geiger-Muller se encontra entre 10 e 200 μs , limitando a taxa máxima de contagens e juntamente com outros parâmetros, limitam a máxima taxa de dose equivalente que pode ser medida, demandando em muitos casos a aplicação de uma correção de tempo morto nas situações em que a taxa de contagem seria considerada moderada (algumas centenas de pulsos por segundo) ⁹.

Pode ser sumarizado que para um sistema de detecção ser apropriado, é necessário que, além de ser adequado para a medida de interesse, apresente as seguintes características: repetitividade (grau de concordância dos resultados obtidos sob as mesmas condições de medida), reprodutibilidade (grau de concordância dos resultados obtidos em diferentes condições de medida), estabilidade (capacidade de conservar constantes suas características de medida ao longo do tempo), exatidão (grau de concordância dos resultados com o “valor verdadeiro” ou valor de referência), precisão (grau de concordância dos resultados entre si), sensibilidade (razão entre a variação da resposta de um instrumento e a correspondente variação do estímulo), e eficiência (capacidade de converter em sinais de medição os estímulos recebidos) ⁴. A resposta do detector é afetada pela eficiência geométrica, que é a eficiência com que o detector intercepta a radiação emitida pela fonte; pela eficiência intrínseca do detector, que se refere à eficiência com que o detector absorve eventos da radiação

incidente e os converte em sinais uteis; e pela absorção e espalhamento da radiação no interior da própria fonte, ou por material entre a fonte e o detector de radiação ^{4,9,12,25,28}.

Como apresentado até aqui, diversos fatores podem influenciar na mensuração das grandezas, alterando a resposta ou o valor dado pelo sistema de detecção. Entre esses fatores temos a radiação de fundo, a geometria fonte-detector, o tempo de resolução do sistema de detecção (tempo morto), a influência do volume da amostra no detector, a absorção, a autoabsorção, a dispersão, entre outros ¹⁴.

Deve-se ter atenção especial com a radiação de fundo ^{9,12,14,20,26}, visto que no ambiente da medicina nuclear existem várias fontes de radiação que podem contribuir e alterar os resultados das medidas, dentre as quais: pacientes injetados, fontes de testes e calibração, estoque de material radioativo entre outras.

A radiação de fundo é sempre assinalada pelo sistema de detecção e, portanto, deve ser subtraída das contagens para a obtenção do resultado real ^{8,12,14}. Existem vários métodos simples e práticos para diminuir a influência da radiação de fundo em uma sequência de medições, entre os quais: usar detectores e materiais livres de contaminação, encerrar os detectores em castelos de chumbo, evitar lugares próximos de materiais radioativos ou aparelhos de raios X ¹⁴. Devido a variações na radiação de fundo durante as contagens, deve-se mensurá-la no começo e no fim de cada série de medições.

A geometria das medições e o volume da amostra (arranjo fonte-detector) tem o potencial de influenciar os resultados, demandando que as medições devam ser realizadas sempre sobre o mesmo arranjo fonte-detector ¹⁴.

Qualquer material interposto entre a fonte e o detector pode absorver a radiação, em proporção que depende do tipo de radiação e da densidade do meio absorvedor. Além disso, podem causar a dispersão (espalhamento), desviando e alterando a energia da radiação, modificando os resultados das medições. A autoabsorção tem seu efeito mais pronunciado para radiações corpusculares, mas pode ocorrer em fótons dependendo da energia da radiação, e aumenta com a espessura e densidade do meio que compõe a fonte ^{12,14,26}.

4. MATERIAL E MÉTODOS

De forma a estudar a metodologia para o cálculo da atividade presente nos embalados de rejeitos sólidos radioativos perfurocortantes, atualmente empregada no Serviço de Medicina Nuclear do Hospital de Câncer do Instituto Nacional de Câncer José Alencar Gomes da Silva (SMN/HC I-INCA), foi realizado um conjunto de sete (07) ensaios utilizando embalados com diferentes atividades e diferentes meios absorvedor-espalhador de radiação (5 ensaios com meio absorvedor-espalhador e 2 ensaios sem meio absorvedor-espalhador), e um mesmo sistema de monitoração de radiação calibrado na grandeza $H^*(10)$.

Foram empregadas aproximações e realizados cálculos de forma a estimar as atividades de cada embalado, por meio das medições realizadas com o monitor de radiação, e as estimativas foram comparadas com a atividade real presente no embalado.

Todas as fontes utilizadas, o arranjo geométrico das fontes, a construção dos diferentes meios absorvedor-espalhador, os modelos de cálculo empregados na estimação da atividade a partir das mensurações na grandeza $H^*(10)$, as correções para a estimação das atividades nos embalados, assim como os procedimentos de análise estatística serão apresentados a seguir.

4.1. FONTES RADIOATIVAS EMPREGADAS

Todas as fontes radioativas continham o radionuclídeo tecnécio (^{99m}Tc) na forma de pertecnetato de sódio, obtidos através da eluição de geradores de molibdênio (^{99}Mo) fornecidos pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN-SP, São Paulo), que são semanalmente enviados para o SMN/HC I-INCA.

Todos os ensaios foram realizados com cinco fontes dentro de cada coletor perfurocortante, sendo quatro seringas e um frasco de vidro. Em cada ensaio foi

realizada a eluição do gerador com 6 mL de solução fisiológica, obtendo num frasco (frasco-mãe) uma atividade inicial total ($A_{\text{frasco-mãe}}$).

A atividade total obtida no frasco-mãe foi dividida da seguinte forma: retirou-se 1,0 mL para cada uma das quatro fontes radioativas (seringas) e o volume restante foi mantido no frasco-mãe que passou a ser considerado como a quinta fonte radioativa (frasco), com aproximadamente 2,0 mL de solução. Ainda que as seringas suportassem um valor máximo igual a 5 mL e o frasco suportasse um volume superior a 6,0 mL, as suas respectivas capacidades máximas não foram utilizadas, sendo escolhidos volumes que fossem compatíveis com aqueles que podem em geral ser encontrados no interior de embalados de rejeitos radioativos perfurocortantes resultantes da rotina operacional do SMN/HC I-INCA.

Após o preparo das cinco fontes, registrou-se a atividade real e o momento da medição inicial (A_{0i}) para cada uma individualmente utilizando-se um único medidor de atividade (ativímetro) do SMN/HC I-INCA (modelo CRC-25R, número de série 252318, Capintec Inc., New Jersey, EUA).

O equipamento é de uso rotineiro, aferindo as atividades dos radiofármacos marcados com o ^{99m}Tc , a serem administrados nos pacientes que serão submetidos aos estudos diagnósticos, e passa por testes de controle de qualidade de acordo com as normas estabelecidas. Testes diários (de inspeção visual, repetibilidade, ajuste do zero, radiação de fundo e alta voltagem); testes semestrais (de precisão e exatidão) e testes anuais (de linearidade e de geometria), todos os testes realizados estão de acordo com a normatização ⁶.

Devido ao decaimento natural das fontes radioativas, em cada medição, o seu horário foi registrado e o valor da atividade real de cada fonte radioativa envolvida no ensaio foi devidamente corrigida com relação ao horário de medição da atividade inicial das mesmas (equação 7):

$$A_i(t_1) = A_{0i} \cdot e^{\frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot (t_1 - t_0)}$$

(equação 7)

onde $T_{1/2}$ é meia-vida física do radionuclídeo, t_0 é o horário de medição (medição da atividade real no ativímetro) após a produção das fontes, $(t_1 - t_0)$ é o intervalo de

tempo entre a produção da fonte e a realização da medição de taxa equivalente de dose ambiente com o monitor GM.

As referidas atividades corrigidas das fontes são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Valores da atividade real para cada fonte radioativa utilizada em cada ensaio.

		Atividade Real (MBq)							
		Com meio absorvedor-espalhador					Sem meio absorvedor-espalhador		
Ensaio		1	2	3	4	5	1	2	
Medição	1	8252,0	5407,0	5016,0	4706,0	4716,0	6284,0	5865,0	
	2	935,6	1183,0	957,2	747,7	742,8	1085,0	995,0	
	3	101,4	396,0	426,9	385,2	409,7	395,4	358,0	

Deve ser observado que, ainda que a correção temporal da atividade das fontes no interior dos embalados, para as diferentes medições, nos diferentes ensaios sejam necessárias; as medições são temporalmente independentes, dado que as equações empregadas para o cálculo da atividade sendo estimada, a partir das leituras de taxa de dose instantânea, que não são dependentes do intervalo de tempo decorrido entre as diferentes medições (equações 8 e 9). Dessa forma a informação temporal, ainda que possa estar presente na apresentação de alguns resultados, apenas para efeito de comparação gráfica entre as diferentes medições, em si não é de relevância para esse trabalho.

4.2. MODELO GEOMÉTRICO DE DISTRIBUIÇÃO DAS FONTES NO EMBALADO DE PERFUROCORTANTES E ARRANJO EMBALADO-MONITOR DE RADIAÇÃO

Foram utilizadas, em cada ensaio, caixas coletoras de perfurocortantes (coletor) com volume máximo de 13,0 L (modelo 0160301, Descarpack, São Paulo, Brasil) empregados rotineiramente no SMN/HC-INCA para a coleta de material

perfurocortante (Figura 2a), onde foram posicionadas as fontes radiativas, com cada uma das quatro seringas fixada em uma das arestas e o frasco fixado no centro da face inferior (base) do coletor com a utilização de cola instantânea, como apresentado na Figura 2b.

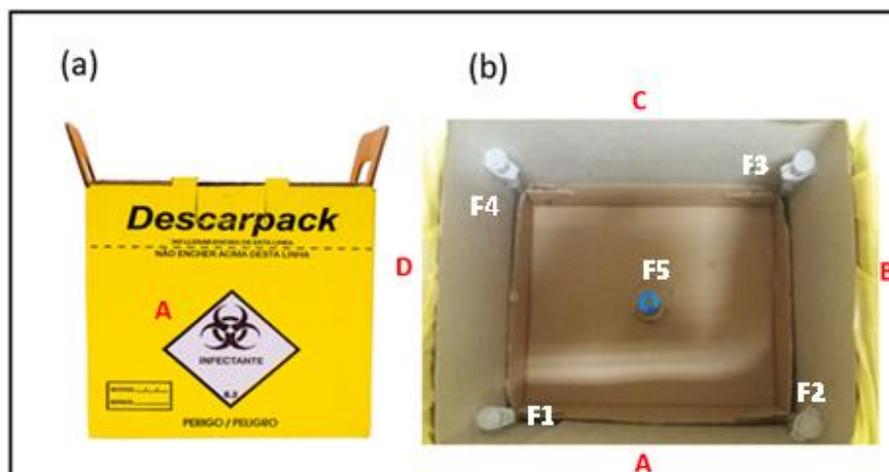


Figura 2. a) Exemplo de coletor de perfurocortante utilizado nos ensaios. b) Posicionamento adotado para as fontes dentro do coletor.

Cada face lateral do coletor recebeu uma marcação de A até D (Figura 2b). As medições em cada ensaio foram realizadas a uma distância de um metro entre cada face lateral do coletor e a sonda interna do detector (conforme indicação presente no equipamento). Esse modelo de arranjo geométrico fonte-detector foi determinado de forma a tornar todos os ensaios reprodutíveis (Figura 3).

Os ensaios praticados dessa forma têm por objetivo aproximar ao máximo as condições onde essas medidas são feitas na rotina do serviço, de forma a incluir o fator de absorção e espalhamento da radiação devido ao piso e parede onde as medidas são normalmente realizadas.

O equipamento utilizado para as realizações das medidas de taxa de exposição foi um monitor de radiação do tipo Geiger-Müller (Monitor Inteligente de Radiação - MIR, modelo 7028, número de série 196, MRA-Indústria de Equipamentos Eletrônicos, Ribeirão Preto/SP, Brasil). O equipamento foi calibrado como monitor de área em equivalente de dose ambiente $H^*(10)$ pelo Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD/CNEN-RJ) no dia 12 de março de 2018. O teste de reprodutibilidade do equipamento com fonte de césio-137 (^{137}Cs) foi realizado diariamente, de forma a

garantir o bom funcionamento do mesmo, ainda que NN-3.05⁶ defina a periodicidade do teste como mensal.

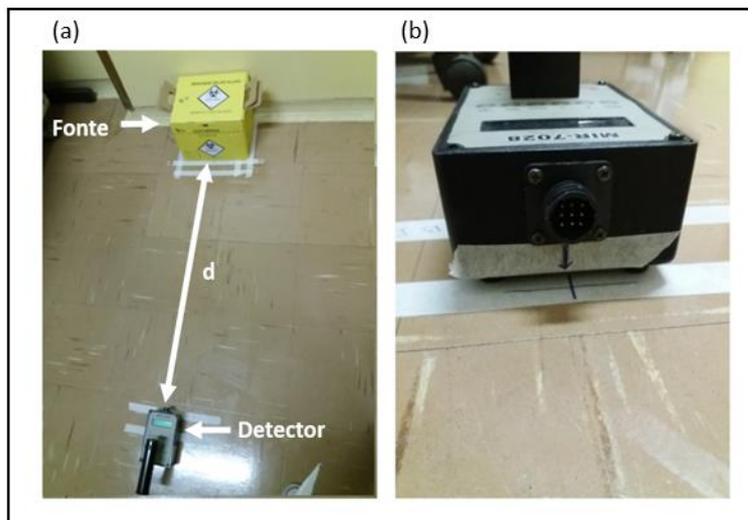


Figura 3. (a) Posicionamento do coletor de perfurocortante com relação ao monitor de radiação. (b) Ajuste do detector com relação ao ponto fixo de monitoração

4.3. AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA PRESENÇA DE MEIO ABSORVEDOR-ESPALHADOR NO INTERIOR DO EMBALADO PARA A ESTIMATIVA DA ATIVIDADE

Foram realizados dois ensaios com as fontes posicionadas conforme anteriormente definido, sem a presença de meio absorvedor-espalhador incorporado no interior do embalado. Esses ensaios tiveram por objetivo estabelecer um padrão de comparação de forma a avaliar a influência da presença de meio absorvedor-espalhador para a estimativa da atividade que foi executada nos demais cinco ensaios.

De forma a reduzir os possíveis efeitos de espalhamento externo, devido às paredes e ao piso, todos os ensaios foram realizados numa sala blindada para radiações, com paredes e piso construídos com concreto de alta densidade. Para os ensaios sem meio-absorvedor interno ao coletor de perfurocortantes, foi posicionada uma manta de chumbo com 1,0 mm de espessura entre a caixa coletora e o piso, de

forma a reduzir a possível influência do efeito de retroespalhamento fotônico, devido ao piso, na direção do detector (Figura 4).



Figura 4. Manta de chumbo posicionada abaixo do coletor de perfurocortantes para os ensaios sem meio absorvedor-espalhador.

De forma a simular a influência que a presença de um meio absorvedor-espalhador poderia apresentar na estimação da atividade contida nos embalados de rejeitos radioativos perfurocortantes, devido aos diferentes materiais descartados dentro do coletor (seringas e frascos contendo líquidos), foram utilizados flaconetes com volume igual a 5,0 mL, sendo 350 flaconetes preenchidos com água e 350 contendo apenas ar, aleatoriamente acondicionados no interior do coletor até o volume útil do mesmo (10,0 L), como apresentado na Figura 5.

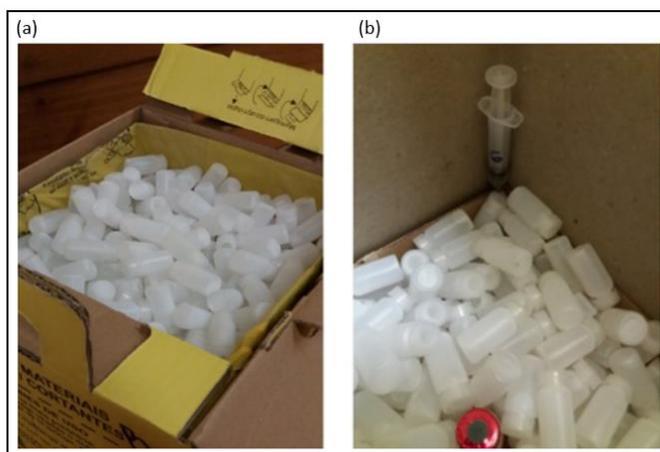


Figura 5. (a) e (b) Flaconetes posicionados no interior do coletor de forma a simular um meio absorvedor-espalhador. Trezentos e cinquenta preenchidos com água em todo o seu volume e trezentos e cinquenta preenchidos com ar.

4.4. ESTIMATIVA DA ATIVIDADE NOS EMBALADOS, CORREÇÃO TEMPORAL E DETERMINAÇÃO DO FATOR K

Foi inicialmente realizada uma avaliação do efeito resultante da aplicação do fator de conversão $H^*(10)/X$ ($cSvR^{-1}$) disponível na tabela A.2 do ICRU report 47²⁸ sobre a média das leituras obtidas em cada face do coletor, para a estimativa da atividade presente no coletor em cada instante de tempo (equação 8). Essa avaliação teve por objetivo determinar a necessidade e os possíveis efeitos da aplicação de tal correção, em comparação com a aplicação direta das leituras fornecidas pelo monitor de radiação para a estimativa da atividade (equação 9). A avaliação foi baseada nos ensaios sem espalhamento, visto que, a presença de meio absorvedor-espalhador potencialmente altera o espectro de energia dos fótons^{28,30}. Como o documento não apresenta um fator de conversão para a energia de 140 keV (fótons do ^{99m}Tc), foi realizada uma interpolação linear entre os valores de 100 e 150 keV.

$$A[mCi] = \frac{H^*(10) \left[\frac{\mu Sv}{h} \right] \cdot d^2 [cm^2]}{0,795 \left[\frac{R \cdot cm^2}{mCi \cdot h} \right]} \cdot \left(\frac{X}{H^*(10)} \left[\frac{10000 \mu Sv}{R} \right] \right) \quad (\text{equação 8})$$

$$A[mCi] = \frac{H^*(10) \left[\frac{\mu Sv}{h} \right] \cdot d^2 [cm^2]}{0,795 \left[\frac{R \cdot cm^2}{mCi \cdot h} \right] \cdot 10000 \left[\frac{\mu Sv}{R} \right]} \quad (\text{equação 9})$$

onde d é a distância face do coletor-detector, utilizando a constante de taxa de exposição $T = 0,795 \left(\frac{R \cdot cm^2}{mCi \cdot h} \right)^{4,13}$ do radionuclídeo convertido para microsievert. Após a estimativa da atividade em mCi a mesma foi convertida para megabecquerel (MBq).

Cada ensaio consiste num conjunto de 10 medições realizadas em cada face do coletor, realizadas em três diferentes instantes de tempo, com o objetivo de verificar o efeito da atividade presente no coletor. Portanto, cada ensaio consiste num total de

40 medições para cada um dos três instantes de tempo, totalizando 120 medições por ensaio. Todas as medições foram corrigidas para a radiação de fundo.

Os valores de atividade estimados foram utilizados para a criação de dois grupos. No primeiro grupo foi calculada a média e o desvio padrão para cada uma das 10 medidas realizadas em cada uma das quatro faces do coletor (A, B, C, D) para cada instante de tempo, de forma independente em cada ensaio. O objetivo desse grupo foi permitir a comparação da atividade estimada a partir das medidas em cada face com relação a atividade real em cada ensaio (avaliação intra-ensaio) para cada instante de tempo.

No segundo grupo foi determinada a média e o desvio padrão das 40 medidas oriundas de todas as faces do coletor para cada instante de tempo em cada ensaio. O objetivo desse grupo foi permitir comparar o efeito que a utilização da média das medições realizadas em todas as faces do coletor tem na determinação da atividade total contida no mesmo, em comparação com a atividade real.

Para esse segundo grupo foi ainda determinada razão entre a atividade real contida no interior do coletor e a atividade média estimada através das medidas $H^*(10)$ para cada instante de tempo, determinando um fator k (equação 10). O fator k assim determinado permite a comparação entre os diferentes ensaios e entre os diferentes tempos de estimação funcionando como um fator de normalização (avaliação interensaio).

$$k = \frac{A_R}{A_E}$$

(equação 10)

onde A_R é a atividade real, A_E é a atividade média estimada a partir das monitorações em $H^*(10)$ e k é o fator de correção determinado.

4.5. ANÁLISE ESTATÍSTICA

A avaliação dos efeitos da aplicação do fator de conversão $H^*(10)/X$ foram estudados através da estatística descritiva de cinco números (mínimo, primeiro quartil,

mediana, terceiro quartil e máximo), sendo ainda empregados a média aritmética, e o desvio padrão.

Os resultados obtidos na estimação da atividade a partir das medições (com o monitor de radiação), com e sem a aplicação do fator de correção são comparados com a atividade real de cada embalado e são em alguns casos apresentados na forma de um diagrama de caixa modificados (*Tukey*)³⁹⁻⁴². A escolha desse diagrama recai na sua capacidade de representar graficamente a presença de dados discrepantes (*outliers*), mediante o ajuste dos pontos de máximo e mínimo para a distribuição através do uso do intervalo interquartilico (*IQR*):

$$IQR = Q_3 - Q_1 \quad \text{(equação 11)}$$

$$min = Q_1 - 1,5.IQR \quad \text{(equação 12)}$$

$$max = Q_3 + 1,5.IQR \quad \text{(equação 13)}$$

com Q_1 e Q_3 respectivamente o primeiro e terceiro quartis.

Foi aplicado o teste de normalidade de D'Angostino & Pearson⁴³ de forma a determinar a possibilidade do emprego de uma ANOVA⁴⁴ com um teste post-hoc de múltiplas comparações de Dunnet⁴⁵ de forma a determinar se existe diferença significativa, ao nível de significância de 5%, entre o valor real e aqueles estimados pelo método proposto com e sem correção.

O mesmo procedimento de análise foi empregado nas avaliações comparativas entre as atividades estimadas a partir dos diferentes pontos de monitoração com relação à atividade real presente no embalado (avaliações intra-ensaios).

De forma a avaliar as possíveis diferenças entre as atividades estimadas através da média das monitorações em $H^*(10)$ e as atividades reais presentes no interior dos embalados em cada instante de tempo, foi em alguns casos utilizada uma combinação de um diagrama de caixas (*box-and-whiskers*)⁴⁰⁻⁴² e linhas. Permitindo dessa forma determinar o comportamento temporal da distribuição estatística das atividades estimadas e real nos diferentes ensaios.

Os resultados oriundos da razão das atividades real e estimadas através do emprego das médias das monitorações (*fator k*) foram avaliados através de uma ANOVA com a aplicação de um teste post-hoc de múltiplas comparações de Tukey-Kramer ⁴⁶⁻⁴⁸ ao nível de significância de 5%. Os fatores *k* obtidos nos diferentes ensaios em diferentes tempos foram representados num gráfico de dispersão e os resultados das comparações múltiplas foram representados num gráfico de floresta ^{49,50} para o intervalo de confiança de 95%.

O desvio oriundo das estimativas da atividade com relação à atividade real foi igualmente representado num gráfico de dispersão.

Todas as análises estatísticas foram realizadas com o uso GraphPad Prism 8.0.2 para Windows 64-bit (GraphPad Software, San Diego, California, EUA).

4.6. CONSIDERAÇÕES ÉTICAS

Não se aplicam.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir serão apresentados os resultados dos diferentes componentes desse estudo: avaliação do efeito resultante da correção proposta no ICRU report 47²⁸ sobre a média das leituras obtidas em cada face do coletor para a estimativa da atividade presente no coletor em cada instante de tempo; avaliação intra-ensaio baseado na comparação da atividade estimada à partir da monitoração local nos pontos monitorados (A, B, C e D) e a atividade real; avaliação comparativa entre a atividade estimada à partir da média dos pontos monitorados (A, B, C e D) e a atividade real; avaliação comparativa interensaios, através do fator k obtido para cada ensaio.

5.1. AVALIAÇÃO DO EFEITO RESULTANTE DA CORREÇÃO PROPOSTA NO ICRU REPORT 47 SOBRE A MÉDIA DAS LEITURAS OBTIDAS EM CADA FACE DO COLETOR PARA A ESTIMATIVA DA ATIVIDADE PRESENTE NO COLETOR EM CADA INSTANTE DE TEMPO, SEM MEIO ABSORVEDOR-ESPALHADOR

Os resultados obtidos na avaliação do impacto da aplicação do fator de conversão entre as grandezas equivalente de dose ambiente $H^*(10)$ e exposição (X), para os ensaios sem meio absorvedor-espalhador, são apresentados graficamente nas Figura 6 e Figura 7 e nas Tabela 3 (anexo) e Tabela 4 (anexo).

Observa-se nas Figura 6 e Figura 7 que a aplicação do fator de conversão energética para a grandeza $H^*(10)$ sobre a constante de taxa de exposição resultou numa subestimação da atividade ($E_{\text{corr}} < R$) contida no interior dos embalados ao longo dos diferentes intervalos de tempo; mesmo sem efeitos de atenuação, visto que as fontes se encontravam imersas no ar e as paredes do coletor eram constituídas de papelão.

Ainda que exista uma grande dependência energética na resposta dos monitores de área, a utilização de filtros de compensação energética, como no caso do monitor utilizado (MIR 7028)⁵¹, em geral reduz tal dependência^{9,28,35}. Consequentemente, muitos instrumentos podem ser utilizados para medir o

equivalente de dose ambiente através da mera mudança de escala de R/h para 10 mSv/h ²⁸.

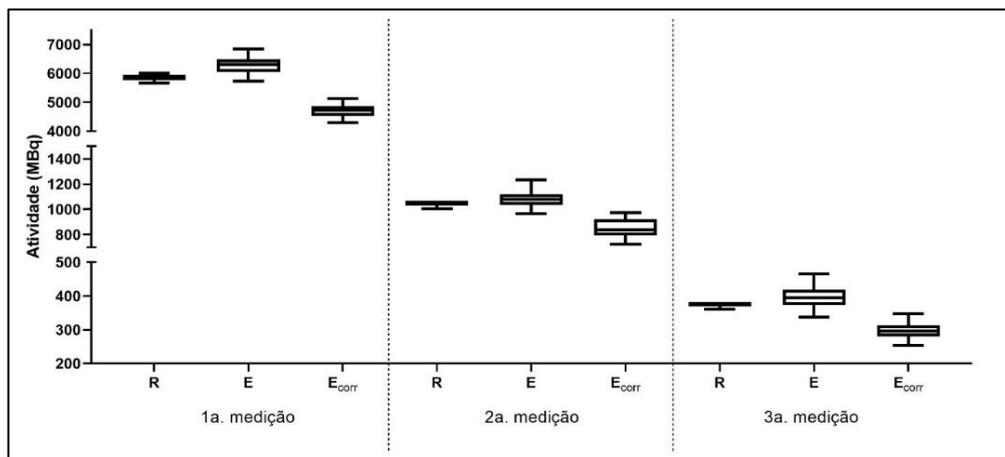


Figura 6. Comparação entre Atividade Real (R), Estimada (E) e Estimada Corrigida (E_{corr}) para o ensaio 1 (sem meio absorvedor-espalhador).

A simples aplicação da mudança de escala da constante de taxa de exposição ocasionou uma superestimação da atividade com relação à atividade real contida no embalado ($E > R$), porém com um menor desvio quando comparado à aplicação do fator de conversão $H^*(10)/X$ para a energia de 140 keV.

A superestimação da atividade, nos casos onde não existe autoabsorção, se apresenta como um problema menor quando comparado à subestimação da mesma, em face a permitir uma melhor aderência aos requisitos normativos, de forma a garantir que o tempo de armazenagem dos rejeitos radioativos não seja inferior àquele necessário para o descarte dos mesmos (conduta conservadora).

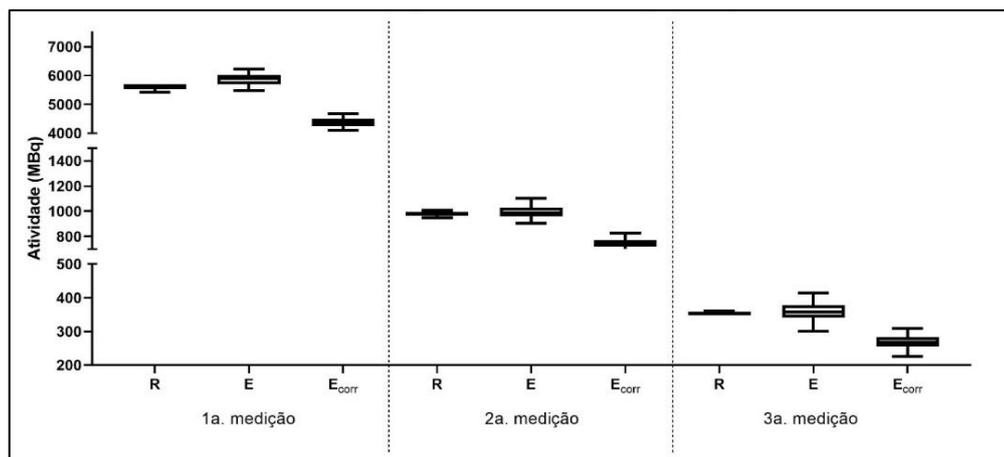


Figura 7. Comparação entre Atividade Real (R), Estimada (E) e Estimada Corrigida (E_{corr}) para o ensaio 2 (sem meio absorvedor-espalhador).

Dessa forma a utilização da constante da taxa de exposição corrigida para a escala de monitoração se mostrou como uma escolha viável para a estimação da atividade nos embalados sem meio autoabsorvedor, a partir da monitoração com o instrumento calibrado na grandeza $H^*(10)$, sem prejuízo para a manutenção dos requisitos normativos. Ainda, que nos casos onde exista meio absorvedor seja esperado que não ocorra tal superestimação.

5.2. AVALIAÇÃO INTRA-ENSAIO, BASEADA NA COMPARAÇÃO DA ATIVIDADE ESTIMADA À PARTIR DA MONITORAÇÃO LOCAL NOS PONTOS MONITORADOS (A, B, C E D) E A ATIVIDADE REAL

Observamos uma grande variação dos resultados obtidos pela metodologia de estimação da atividade quando temos a presença de meio absorvedor-espalhador no interior dos embalados para cada ponto de monitoração individualmente, conforme descrito na Figura 8a, Figura 8b, Figura 9, e tabelas 5 a 9 do anexo 2. Como pode ser observado, a atividade estimada é inferior ao valor real da atividade em todos os casos onde existe a presença do meio absorvedor, em comparação com a atividade que é superestimada para os casos sem a presença do meio absorvedor (Tabelas 10, 11 e Figura 10).

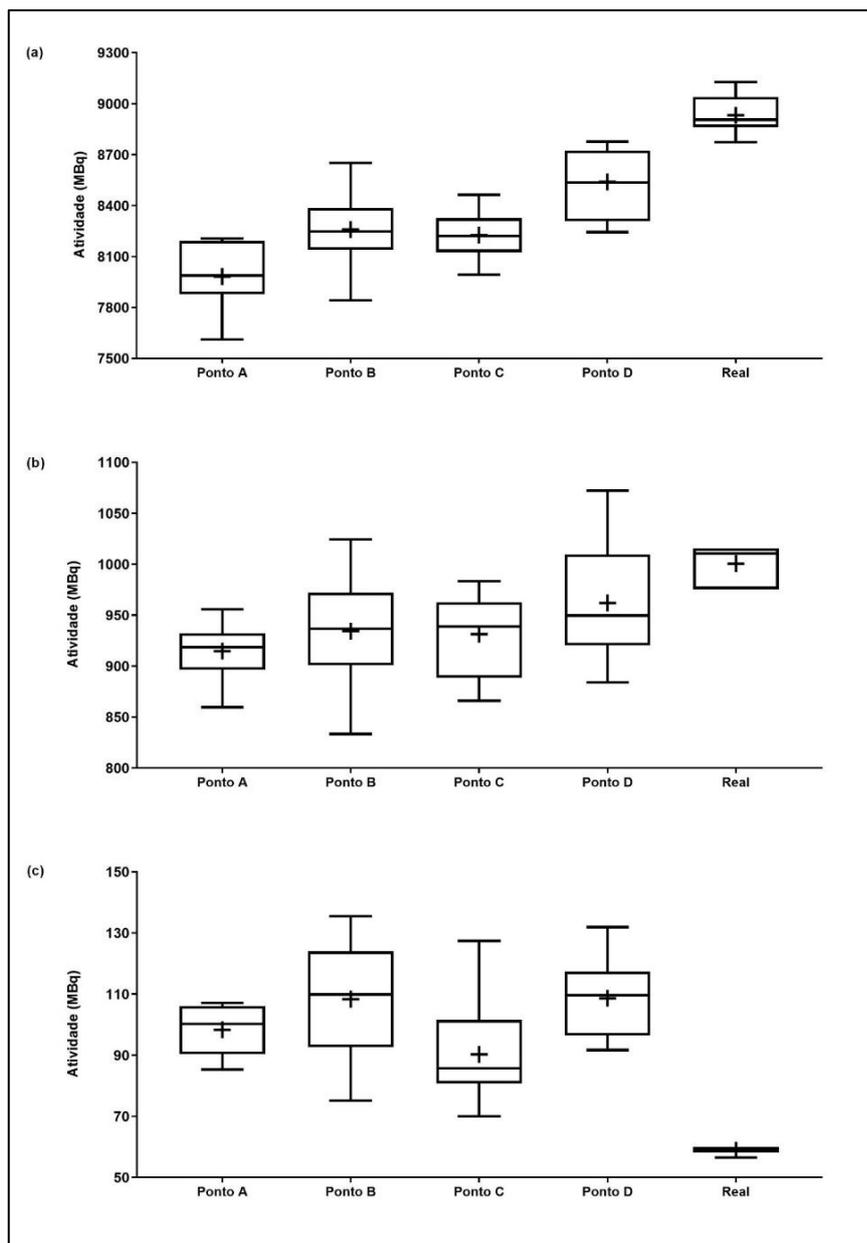


Figura 8. Comparação entre Atividade Real (R) e as Atividades Estimadas (E) nos pontos de monitoração, para o ensaio 1 (com meio absorvedor-espalhador). Onde (a), (b) e (c) são as 1^a, 2^a e 3^a medição no tempo para o ensaio, respectivamente.

Conforme esperado, as diferentes distribuições dos meios absorvedor-espalhador com relação aos arranjos fonte-detector acarreta em diferenças na resposta do monitor para os diferentes pontos de monitoração, ainda que em todos os casos, onde exista a presença de meio absorvedor no interior do embalado, ocorra o decréscimo da atividade estimada.

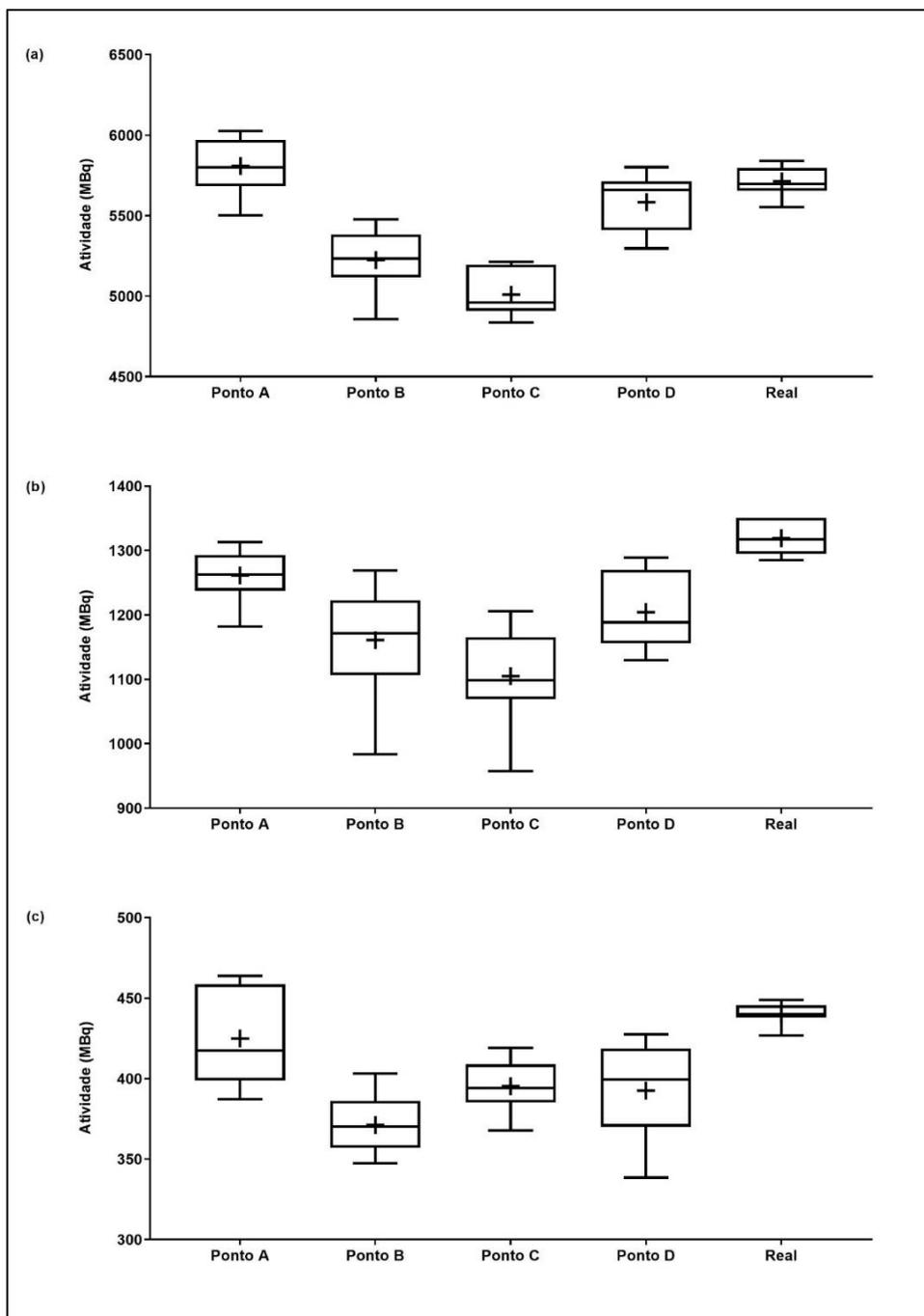


Figura 9. Comparação entre Atividade Real (R) e as Atividades Estimadas (E) nos pontos de monitoração, para o ensaio 2 (com meio absorvedor-espalhador). Onde (a), (b) e (c) são as 1ª, 2ª e 3ª medição no tempo para o ensaio, respectivamente.

Entretanto, como observado na Figura 8c as atividades estimadas foram superiores a atividade real, diferentemente do que foi verificado nos demais ensaios para os pontos de monitoração individual com meio absorvedor (tabelas 5 a 9 do

anexo 2). Este fato isolado pode ser resultado de algum erro de monitoração naquele instante de tempo, não tendo o mesmo se repetido ao longo dos demais ensaios.

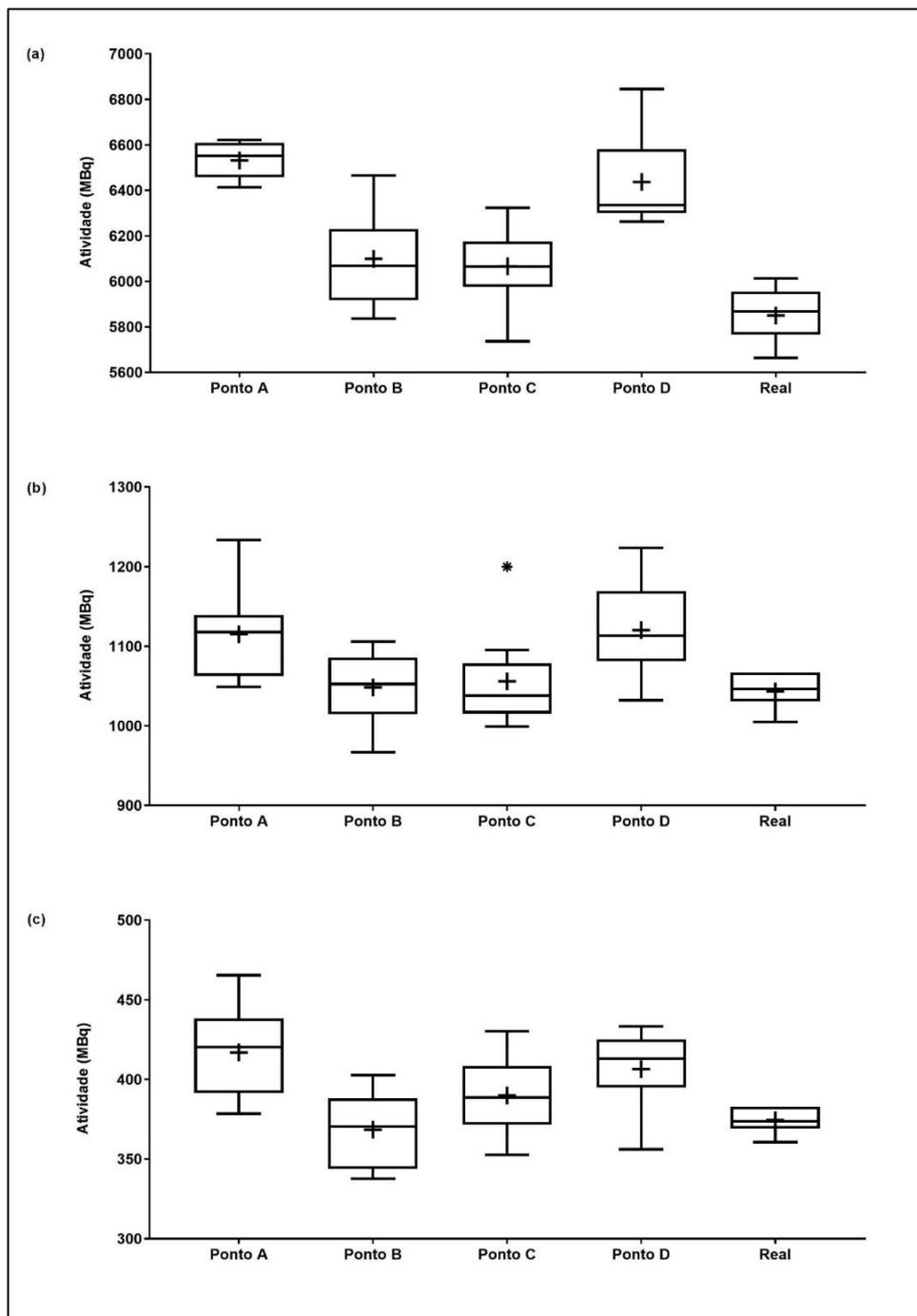


Figura 10. Comparação entre Atividade Real (R) e as Atividades Estimadas (E) nos pontos de monitoração, para o ensaio 1 (sem meio absorvedor-espalhador). Onde (a), (b) e (c) são as 1^a, 2^a e 3^a medição no tempo para o ensaio, respectivamente.

5.3. AVALIAÇÃO COMPARATIVA ENTRE A ATIVIDADE ESTIMADA À PARTIR DA MÉDIA DOS PONTOS MONITORADOS (A, B, C E D) E A ATIVIDADE REAL

A utilização da atividade estimada à partir da média das leituras dos pontos de monitoração, resultou numa menor variabilidade, em cada instante de tempo dentro de cada ensaio, o que pode ser visto tanto nos experimentos com e sem meio absorvedor (Figura 11, Figura 12, Figura 13 e Tabelas 12 a 17 do anexo 3). Conforme anteriormente explicitado, cada medição é independente entre si e a escala temporal só foi utilizada para compor os gráficos, sem apresentar relevância entre as diferentes medições.

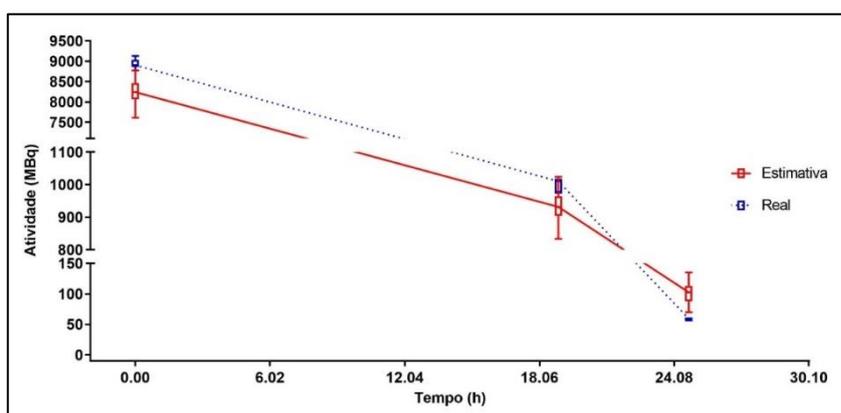


Figura 11. Comparação entre Atividade Real (R) e as Atividades Estimadas (E) considerando o comportamento conjunto dos pontos de monitoração, para o ensaio 1 (com meio absorvedor-espalhador).

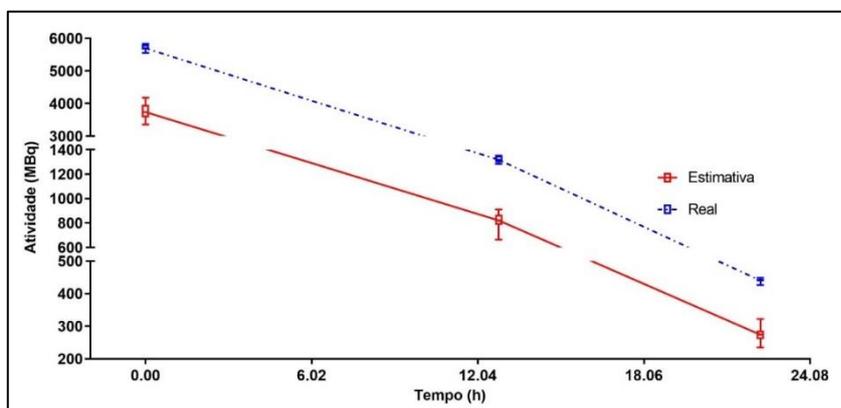


Figura 12. Comparação entre Atividade Real (R) e as Atividades Estimadas (E) considerando o comportamento conjunto dos pontos de monitoração, para o ensaio 2 (com meio absorvedor-espalhador).

Como anteriormente apresentado, a terceira medição para o ensaio 1 (Figura 11) apresenta um comportamento diferente dos demais ensaios. O que pode ser considerado um possível erro de medição.

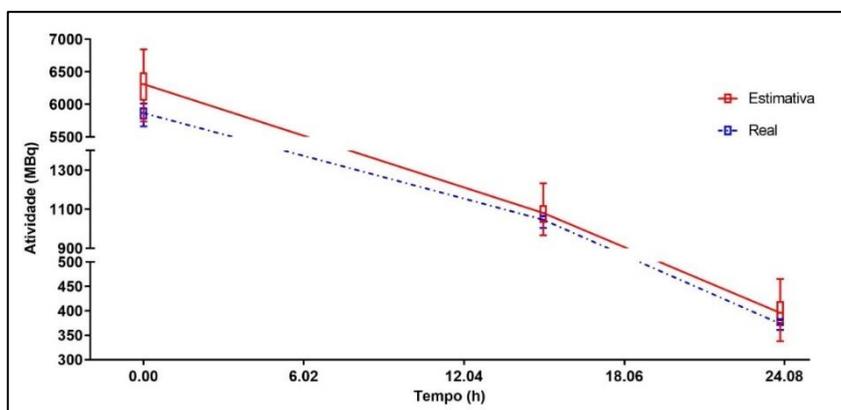


Figura 13. Comparação entre Atividade Real (R) e as Atividades Estimadas (E) considerando o comportamento conjunto dos pontos de monitoração, para o ensaio 1 (sem meio absorvedor-espalhador).

A homogeneidade dos resultados com a aplicação do valor médio das leituras obtidas nos pontos de monitoração para a determinação da atividade com relação a atividade real, tem o potencial de permitir a aplicação de um fator de correção fixo (k) para a determinação da atividade nos embalados.

5.4. AVALIAÇÃO COMPARATIVA INTERENSAIOS, ATRAVÉS DO FATOR K OBTIDO PARA CADA ENSAIO

A avaliação comparativa entre a atividade real e a atividade estimada apresentou um valor de desvio máximo inferior a 15% (Tabela 2). Os valores obtidos para o fator de correção k são apresentados graficamente na Figura 14.

Pode ainda ser observado que em todos os ensaios o fator de correção permanece confinado ao intervalo de erro intrínseco de leitura para o monitor de radiação empregado, que é igual a $\pm 20\%$ ⁵¹ (Figura 15). Igualmente esse é o intervalo máximo de incerteza permitida nos requisitos normativos ⁶ para essa classe de equipamentos (Figura 16).

A utilização de um equipamento com menor incerteza na medição poderia ter um impacto significativo na exatidão da estimativa da atividade. Câmaras de ionização apresentam uma menor dependência energética com relação as medidas de taxa de exposição em relação aos monitores GM, com o potencial de fornecer uma melhor estimativa da atividade ³⁸.

Tabela 2. Média dos valores estimados, atividade real, k e desvio padrão para cada ensaio.

Presença de meio abs-esp (*)	Ensaio	Medição	Atividade Real (MBq)	Atividade Estimada (MBq)	K	Desvio (%)
Sim	1	1	8861,24	8252,00	1,07	-6,88
		2	1005,54	935,60	1,07	-6,96
		3	58,29	101,40	0,57	73,95
	2	1	5724,85	5407,00	1,06	-5,55
		2	1311,29	1183,00	1,11	-9,78
		3	440,03	396,00	1,11	-10,01
	3	1	5067,84	5016,00	1,01	-1,02
		2	1014,89	957,20	1,06	-5,68
		3	412,62	426,90	0,97	3,46
	4	1	5342,07	4706,00	1,14	-11,91
		2	861,25	747,70	1,15	-13,18
		3	441,98	385,20	1,15	-12,85
	5	1	4893,10	4716,00	1,04	-3,62
		2	788,87	742,80	1,06	-5,84
		3	413,98	409,70	1,01	-1,03
Não	1	1	5838,05	6284,00	0,93	7,64
		2	1036,00	1085,00	0,95	4,73
		3	371,81	395,40	0,94	6,35
	2	1	5527,52	5865,00	0,94	6,11
		2	979,01	995,00	0,98	1,63
		3	350,68	358,00	0,98	2,09

(*) meio abs-esp → meio absorvedor-espalhador

Ainda que seja observada uma diferença significativa entre os fatores de correção *k* para os ensaios sem e com meio absorvedor-espalhador, isto não ocorre para a comparação entre os ensaios onde existe a presença desse meio (Figura 17). Indicando que a aplicação de um fator de correção único é possível na rotina de

estimação da atividade dos embalados de perfurocortantes adotando-se uma conduta conservadora.

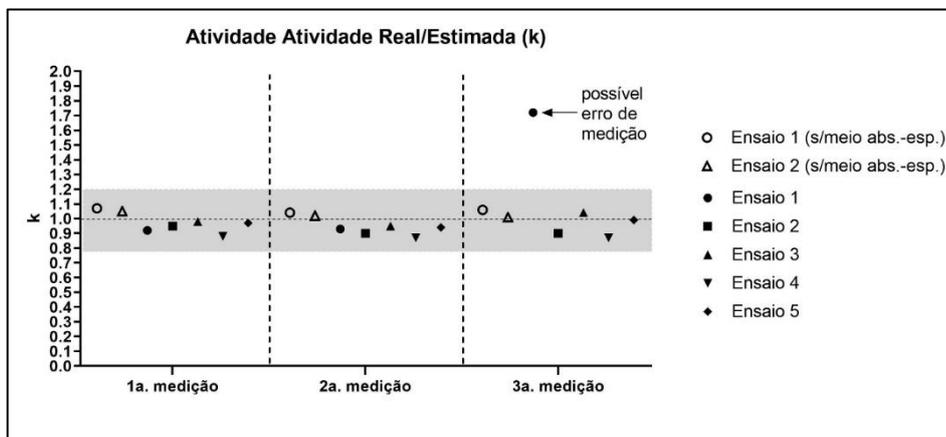


Figura 14. Valores da atividade real/atividade estimada (k) para todos os ensaios em cada uma das 3 medidas realizadas.

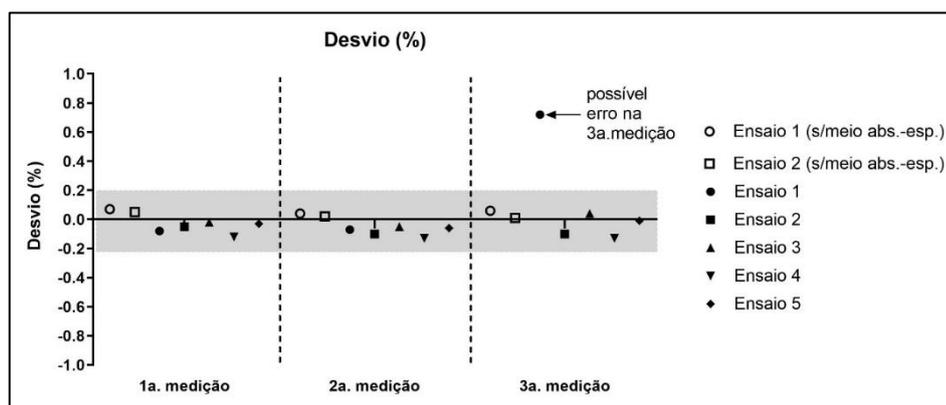


Figura 15. Valores calculados para os erros das constantes k.

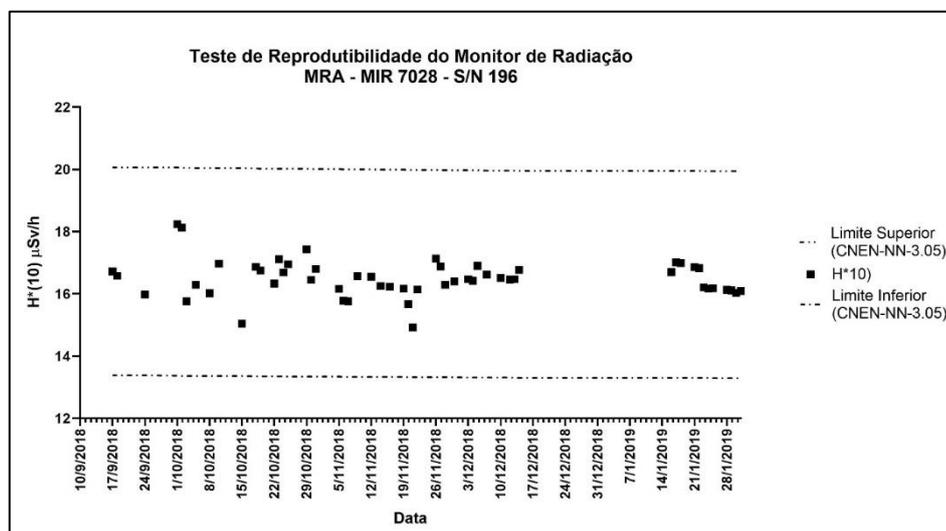


Figura 16. Controle de reprodutibilidade do monitor de radiação empregado para a estimativa da atividade nos embalados.

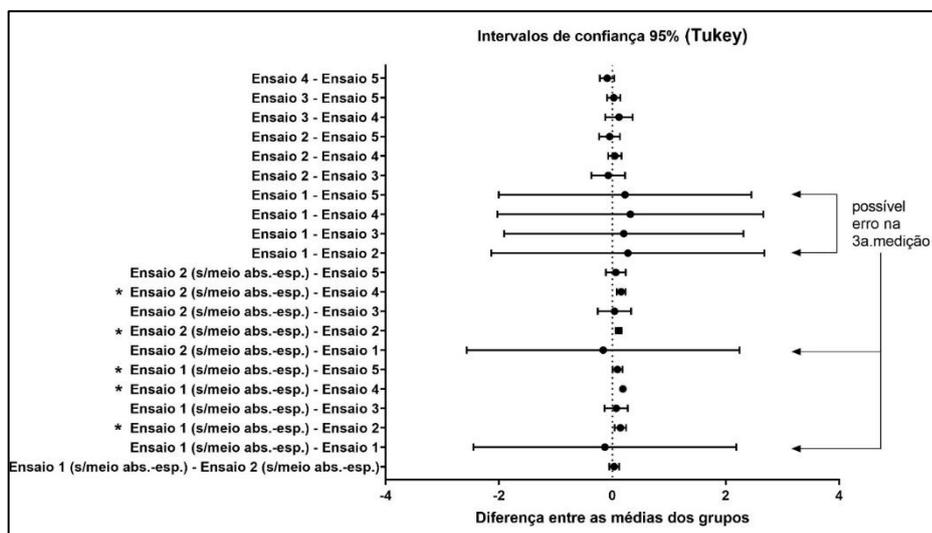


Figura 17. Teste de comparação múltiplas (Tukey-Kramer)⁴⁶⁻⁴⁸ com intervalo de confiança de 95%. (*) indicam diferenças significativas ($p < 0,05$).

6. CONCLUSÃO

A metodologia empregada para estimar a atividade dos embalados, contendo rejeitos radioativos perfurocortantes, subestima a atividade real contida nos embalados em até 20%. Essas diferenças são devidas as variações de leituras obtidas com o monitor de radiação Geiger-Müller. Entretanto, tais variações se encontram na faixa de tolerância para tal classe de monitores calibrados em $H^*(10)$.

Embora existam diferenças entre a atividade real e a estimada, a correção é possível através de um fator de ajuste fixo, que pode ser escolhido de forma a garantir que a metodologia produza resultados compatíveis com os requisitos normativos de proteção radiológica definidos pela CNEN.

Conforme os resultados obtidos nesse estudo, sugere-se o emprego do fator de correção $k = 1,2$, em face aos limites de tolerância adotados tanto pelo fabricante do monitor de radiação, quanto pela CNEN, ambos de 20%.

Futuros trabalhos deveriam avaliar o impacto da metodologia para diferentes monitores de radiação, geometrias, radionuclídeos e meios absorvedores-espalhadores.

REFERÊNCIAS

- 1 BRASIL. Ministério da Saúde. Secretária de Vigilância Sanitária. Portaria no. 453, de 01 de junho de 1998: Aprova o Regulamento Técnico que estabelece as diretrizes básicas de proteção radiológica em radiodiagnóstico médico e odontológico, dispõe sobre o uso dos raios- x diagnósticos em todo território nacional e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 01 de junho de 1998, Seção 1, p. 1-59.
- 2 _____. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Comissão Nacional de Energia Nuclear. CNEN-NN-3.01: Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 01 de janeiro de 2005, Seção 1, p. 1-22.
- 3 _____. Ministério da Saúde. Secretária de Vigilância Sanitária. Portaria no. 222, de 28 de março de 2018: Regulamenta as Boas Práticas de Gerenciamento dos Resíduos de Serviços de Saúde e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 29 de março de 2018, Seção 1, p. 1-32.
- 4 TAUHATA, L. et al. **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos**. Rio de Janeiro: IRD/CNEN, 2013. 345
- 5 BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Comissão Nacional de Energia Nuclear. CNEN-NN-8.01: Gerência de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, abril de 2014, Seção 1, p. 1-45.
- 6 _____. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Comissão Nacional de Energia Nuclear. CNEN-NN-3.05: Requisitos de Segurança e Proteção Radiológica para Serviços de Medicina Nuclear. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, dezembro de 2013, Seção 1, p. 1-26.
- 7 BEVELACQUA, J. J. Point Source Approximations in Health Physics. **Radiation Protection Management**, v. 21, n. 5, p. 9-13, 2004.
- 8 BITELLI, T. **Física e dosimetria das radiações**. São Paulo: Atheneu Centro Universitário São Camilo 2006.
- 9 KNOLL, G. F. **Radiation detection and measurement**. 4th. Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons, 2010. 830 p.
- 10 TSOULFANIDIS, N. and LANDSBERGER, S. **Measurement and detection of radiation**. 3rd. Boca Raton, FL: CRC Press, 2011. xxiii, 493 p.
- 11 PREKEGES, J. **Nuclear Medicine Instrumentation**. 2nd. Massachusetts: Jones & Bartlett Learning, 2013. 398 p.
- 12 CHERRY, S. R., SORENSON, J. A. and PHELPS, M. E. **Physics in nuclear medicine**. 4th. Philadelphia: Elsevier/Saunders, 2012. 523 p.

- 13 SMITH, D. S. and STABIN, M. G. Exposure rate constants and lead shielding values for over 1,100 radionuclides. **Health Phys.**, v. 102, n. 3, p. 271-91, Mar 2012.
- 14 HOWELL, R. S. **Guidance on Dose Rate Measurements for Use in Dose-to-Curie Conversions**. Westinghouse Savannah River Company. South Carolina: September 5, 2000, p.15. 2000. Report (ESH-HPT-99-0019)
- 15 BRAMBILLA, C. R. and HOFF, G. Impact evaluation of the geometry on measurements of solid radioactive waste exposure rates in nuclear medicine. **Revista Brasileira de Engenharia Biomédica**, v. 30, n. 4, p. 330-340, 2014.
- 16 _____. Evaluation of the Solid Radioactive Waste Activity in Nuclear Medicine: Definition of Shape Factors to Real Geometries. **IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Record**, p. 985-989, 2012.
- 17 MICHAEL, S. Nuclear medicine dosimetry. **Phys. Med. Biol.**, v. 51, n. 13, p. R187, 2006.
- 18 CARLSON, S. A Glance At The History Of Nuclear Medicine. **Acta Oncol.**, v. 34, n. 8, p. 1095-1102, Jul 1995.
- 19 BRUCER, M. Nuclear medicine begins with a boa constrictor. **J. Nucl. Med.**, v. 19, n. 6, p. 581-98, Jun 1978.
- 20 IAEA. **Management of Radioactive Waste from the Use of Radionuclides in Medicine**. I. A. E. Agency. Vienna, AUT: International Atomic Energy Agency. IAEA-TECDOC-1183: 84 p. 2000.
- 21 SEABORG, G. T. and SEGRÈ, E. Nuclear Isomerism in Element 43. **Phys. Rev.**, v. 55, n. 9, p. 808-814, May 1939.
- 22 RICHARDS, P., TUCKER, W. D. and SRIVASTAVA, S. C. Technetium-99m: An historical perspective. **Int. J. Appl. Radiat. Isot.**, v. 33, n. 10, p. 793-799, Oct 1982.
- 23 BANERJEE, S., PILLAI, M. R. and RAMAMOORTHY, N. Evolution of Tc-99m in diagnostic radiopharmaceuticals. **Semin. Nucl. Med.**, v. 31, n. 4, p. 260-77, Oct 2001.
- 24 INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION, U. and MEASUREMENTS. Report 85: Fundamental quantities and units for ionizing radiation. **J ICRU**, v. 11, n. 1, p. 1-31, Apr 2011.
- 25 AHMED, S. N. **Physics and engineering of radiation detection**. Waltham, MA, USA: Elsevier, 2015. 784
- 26 POWSNER, R. A., PALMER, M. R. and POWSNER, E. R. **Essentials of nuclear medicine physics and instrumentation**. 3rd. New Jersey, USA: Wiley-Blackwell, 2013. viii, 236

- 27 BORKOWSKI, C. J. Instruments for Measuring Radioactivity. **Anal. Chem.**, v. 21, n. 3, p. 348-352, 1949.
- 28 INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS. **Measurement of dose equivalents from external photon and electron radiations**. Bethesda, Md., U.S.A.: International Commission on Radiation Units and Measurements, 1992. viii, 40 p.
- 29 ZIESSMAN, H. A., O'MALLEY, J. P. and THRALL, J. H. **Medicina Nuclear**. Elsevier Editora Ltda., 2014.
- 30 ANTONI, R. and BURGOIS, L. **Applied physics of external radiation exposure Dosimetry and Radiation Protection**. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2016.
- 31 ZIMMERMAN, B. E. and CESSNA, J. T. Experimental determinations of commercial 'dose calibrator' settings for nuclides used in nuclear medicine. **Appl. Radiat. Isot.**, v. 52, n. 3, p. 615-619, Mar 2000.
- 32 SIEGEL, J. A. et al. Accurate dose calibrator activity measurement of ⁹⁰Y-ibritumomab tiuxetan. **J. Nucl. Med.**, v. 45, n. 3, p. 450-4, Mar 2004.
- 33 DULAMA, C. M. D., M.; Dobrin, R.; Pavelescu, M. Estimation of The Gamma Dose Rate For Homogenous Waste Containers. **Romanian Journal of Physics**, v. 56, n. 9-10, p. 1136-1142, 2011.
- 34 ISAKSSON, M. Environmental Dosimetry – Measurements and Calculations. In: P. N. Singh (Ed.). **Radioisotopes - Applications in Physical Sciences** InTech, 2011.
- 35 GRECCO, C. H. S. et al. **Caracterização do Monitor Inteligente de Radiação, Modelo MIR 7026, para Medidas de Equivalente de Dose Ambiente, H*(10)**. VI ENAN - National Meeting on Nuclear Applications. Rio de Janeiro, Brasil: Associação Brasileira de Energia Nuclear 2002.
- 36 STABIN, M. Nuclear medicine dosimetry. **Phys. Med. Biol.**, v. 51, n. 13, p. R187-202, Jul 7 2006.
- 37 STABIN, M. G. **Fundamentals of Nuclear Medicine Dosimetry**. Springer New York, 2008.
- 38 MARSHALL, T. O., BARTLETT, D. T. and BURGESS, P. H. Current and future instrument and dosimeter designs to measure the new CRU radiation quantities. **Journal of the Society for Radiological Protection**, v. 7, n. 3, p. 107-118, 1987.
- 39 TUKEY, J. W. **Exploratory data analysis**. Reading, Mass.: Addison-Wesley Pub. Co., 1977. xvi, 688 p.

- 40 SPITZER, M. et al. BoxPlotR: a web tool for generation of box plots. **Nat. Methods**, v. 11, n. 2, p. 121-2, Feb 2014.
- 41 MCGILL, R., TUKEY, J. W. and LARSEN, W. A. Variations of Box Plots. **The American Statistician**, v. 32, n. 1, p. 12-16, 1978.
- 42 FRIGGE, M., HOAGLIN, D. C. and IGLEWICZ, B. Some Implementations of the Boxplot. **The American Statistician**, v. 43, n. 1, p. 50-54, 1989.
- 43 D'AGOSTINO, R. B. Transformation to normality of the null distribution of g_1 . **Biometrika**, v. 57, n. 3, p. 679-681, 1970.
- 44 FISHER, R. A. On the probable error of a coefficient of correlation deduced from a small sample. **Metron**, v. 1, p. 3-32, 1921.
- 45 DUNNETT, C. W. New Tables for Multiple Comparisons with a Control. **Biometrics**, v. 20, n. 3, p. 482-491, 1964.
- 46 TUKEY, J. W. **The problem of multiple comparisons**. NJ, USA: Princeton University 1953.
- 47 KRAMER, C. Y. Extension of Multiple Range Tests to Group Means with Unequal Numbers of Replications. **Biometrics**, v. 12, n. 3, p. 307-310, 1956.
- 48 _____. Extension of Multiple Range Tests to Group Correlated Adjusted Means. **Biometrics**, v. 13, n. 1, p. 13-18, 1957.
- 49 SEDGWICK, P. How to read a forest plot in a meta-analysis. **Br. Med. J.**, v. 351, 2015.
- 50 LEWIS, S. and CLARKE, M. Forest plots: trying to see the wood and the trees. **Br. Med. J.**, v. 322, n. 7300, p. 1479-80, Jun 16 2001.
- 51 GRECCO, C. H. S., ALMEIDA, J. C. S. and OBADIA, I. J. **Manual de Serviço do Monitor Inteligente de Radiação MIR 7028**. I. d. E. N. (CNEN/RJ). Rio de Janeiro: IEN/CNEN 2002.

ANEXO 1. TABELAS DE RESULTADOS REFERENTES À AVALIAÇÃO DO EFEITO RESULTANTE DA CORREÇÃO PROPOSTA NO ICRU REPORT 47 SOBRE A MÉDIA DAS LEITURAS OBTIDAS EM CADA FACE DO COLETOR PARA A ESTIMATIVA DA ATIVIDADE PRESENTE NO COLETOR EM CADA INSTANTE DE TEMPO

Legendas utilizadas: **A** é a atividade; **Mín** é o mínimo; **Q₁** é o 1º. Quartil; \tilde{x} é a mediana; **Q₃** é o 3º. Quartil; **Máx** é o máximo; \bar{x} é a média aritmética e **s** é o desvio padrão. O valor **p** corresponde à significância das diferenças entre as médias determinadas pelo teste de comparação múltipla de Dunnet, em relação ao valor real R: **(-)** não aplicável; **(****)** extremamente significativa com $p < 0,0001$; **(**)** significativa com $p \leq 0,05$; **(ns)** não significativa com $p > 0,05$.

Tabela 3. Resultados da estimativa para cada uma das três medidas no tempo, em cada ponto para o ensaio 1, sem o meio absorvedor-espalhador.

A (MBq)	Medição	Mín	Q₁	\tilde{x}	Q₃	Máx	\bar{x}	s	p
R	1	5663,0	5765,0	5867,0	5955,0	6013,0	5850,0	112,8	-
E		5737,0	6056,0	6311,0	6493,0	6845,0	6284,0	262,1	****
E_{corr}		4294,0	4533,0	4724,0	4860,0	5124,0	4703,0	196,2	****
R	2	1005,0	1031,0	1046,0	1067,0	1067,0	1043,0	21,3	-
E		967,0	1035,0	1081,0	1121	1233,0	1085,0	61,5	ns
E_{corr}		723,8	794,3	836,6	921,3	974,4	852,3	77,4	****
R	3	360,7	369,0	373,7	383,0	383,0	374,4	8,8	-
E		337,7	373,4	395,7	419,8	465,4	395,4	30,8	**
E_{corr}		252,8	279,5	296,2	314,2	348,4	296,0	23,1	****

Tabela 4. Resultados da estimativa para cada uma das três medidas no tempo, em cada ponto para o ensaio 2, sem o meio absorvedor-espalhador.

A (MBq)	Medição	Mín	Q₁	\tilde{x}	Q₃	Máx	\bar{x}	s	p
R	1	5417,0	5528,0	5610,0	5693,0	5693,0	5599,0	90,45	-
E		5482,0	5690,0	5896,0	6024,0	6238,0	5865,0	205,9	****
E_{corr}		4103,0	4259,0	4413,0	4509,0	4669,0	4390,0	154,1	****
R	2	949,6	966,8	983,9	988,8	1008,0	980,0	16,9	-
E		904,4	959,9	988,0	1028,0	1105,0	995,0	44,2	ns
E_{corr}		677,0	718,5	739,5	769,1	826,9	744,8	33,1	****
R	3	347,2	347,2	354,2	358,6	361,2	353,5	6,1	-
E		300,4	341,3	357,6	378,5	413,8	358,0	25,7	ns
E_{corr}		224,9	255,5	267,7	283,3	309,7	268,0	19,2	****

ANEXO 2. TABELAS DE RESULTADOS REFERENTES À AVALIAÇÃO INTRA-ENSAIO BASEADO NA COMPARAÇÃO DA ATIVIDADE ESTIMADA À PARTIR DA MONITORAÇÃO LOCAL NOS PONTOS MONITORADOS (A, B, C E D) E A ATIVIDADE REAL

Legendas utilizadas: **A** é a atividade; **Mín** é o mínimo; **Q₁** é o 1º. Quartil; \tilde{x} é a mediana; **Q₃** é o 3º. Quartil; **Máx** é o máximo; \bar{x} é a média aritmética e **s** é o desvio padrão.

O valor **p** corresponde à significância das diferenças entre as médias determinadas pelo teste de comparação múltipla de Dunnet, em relação ao valor real R:

1. (–) não aplicável;
2. (****) extremamente significativa com $p < 0,0001$;
3. (***) muito significativa com $p < 0,001$;
4. (**) significativa com $p \leq 0,05$;
5. (ns) não significativa com $p > 0,05$.

Tabela 5. Resultados da estimativa para cada uma das três medições no tempo, em cada ponto para o ensaio 1, com meio absorvedor-espalhador.

Ponto	Medição	Mín	Q ₁	\tilde{x}	Q ₃	Máx	\bar{x}	s	p
A	1	7612,0	7879,0	7988,0	8192,0	8207,0	7982,0	185,9	****
B		7841,0	8140,0	8247,0	8387,0	8651,0	8260,0	218,7	****
C		7992,0	8127,0	8220,0	8325,0	8464,0	8227,0	153,2	****
D		8244,0	8308,0	8537,0	8723,0	8776,0	8540,0	199	**
Real		8773,0	8861,0	8906,0	9038,0	9127,0	8932,0	108,9	-
A	2	859,6	896,5	918,6	932,3	955,9	914,7	27,96	***
B		833,5	900,8	936,7	972,0	1024,0	934,4	53,49	**
C		866,0	888,7	938,9	962,7	983,3	931,3	41,25	**
D		884,3	920,3	949,8	1010,0	1072,0	962,0	56,4	ns
Real		975,4	975,4	1011,0	1016,0	1016,0	1001,0	18,51	-
A	3	85,4	90,4	100,3	106,1	107,1	98,4	8,055	****
B		75,2	92,6	109,9	124,0	135,4	108,3	20,05	****
C		70,0,	80,8	85,6	101,5	127,4	90,3	16,44	***
D		91,7	96,5	109,6	117,4	131,9	108,6	12,58	****
Real		56,54	58,2	59,2	60,0	60,0	58,9	1,166	-

Tabela 6. Resultados da estimativa para cada uma das três medições no tempo, em cada ponto para o ensaio 2, com meio absorvedor-espalhador.

Ponto	Medição	Mín	Q ₁	\tilde{x}	Q ₃	Máx	\bar{x}	s	p
A	1	5502,0	5682,0	5800,0	5971,0	6026,0	5809,0	175,3	ns
B		4859,0	5117,0	5232,0	5383,0	5477,0	5224,0	177,8	****
C		4836,0	4909,0	4962,0	5195,0	5213,0	5009,0	138,4	****
D		5296,0	5408,0	5660,0	5714,0	5801,0	5584,0	179,4	ns
Real		5553,0	5653,0	5696,0	5796,0	5839,0	5713,0	96,6	-
A	2	1182,0	1238,0	1263,0	1293,0	1313,0	1261,0	38,6	**
B		984,0	1106,0	1172,0	1223,0	1269,0	1161,0	81,2	**
C		957,0	1069,0	1099,0	1166,0	1206,0	1105,0	72,5	****
D		1130,0	1156,0	1189,0	1270,0	1289,0	1204,0	56,5	**
Real		1285,0	1295,0	1318,0	1351,0	1351,0	1319,0	25,6	-
A	3	387,3	398,9	417,5	458,5	463,8	424,9	29,8	ns
B		347,4	357,0	370,2	386,1	403,1	371,2	18,0	****
C		367,9	385,2	394,1	408,9	419	395,3	16,8	***
D		338,5	370,1	399,5	418,6	427,5	392,6	30,3	**
Real		426,8	437,8	440,0	445,5	448,8	440,0	6,9	-

Tabela 7. Resultados da estimativa para cada uma das três medições no tempo, em cada ponto para o ensaio 3, com meio absorvedor-espalhador.

Ponto	Medição	Mín	Q ₁	\tilde{x}	Q ₃	Máx	\bar{x}	s	p
A	1	4728,0	4871,0	5176,0	5386,0	5451,0	5139,0	250,2	ns
B		4351,0	4510,0	4570,0	4677,0	5115,0	4613,0	205,7	***
C		4932,0	4973,0	5151,0	5317,0	5594,0	5180,0	217,3	ns
D		4968,0	4995,0	5062,0	5264,0	5436,0	5132,0	164,6	ns
Real		4916,0	4966,0	5119,0	5182,0	5220,0	5093,0	112,7	-
A	2	912,8	918,5	972,2	1034,0	1095,0	984,6	62,9	ns
B		795,3	825,1	846,9	924,4	1076,0	880,5	89,7	**
C		929,0	950,3	1010,0	1039,0	1069,0	1003,0	47,8	ns
D		922,1	929,5	956,3	985,9	1021,0	961,0	34,3	**
Real		984,4	1002,0	1005,0	1020,0	1035,0	1010,0	16,1	-
A	3	397,9	404,6	411,7	476,1	485,0	429,0	35,5	ns
B		322,3	341,2	352,4	365,6	380,2	352,3	17,0	****
C		387,8	397,7	414,0	451,1	474,0	420,9	28,8	ns
D		435,4	447,9	502,9	538,3	617,7	505,5	56,9	**
Real		400,2	400,2	408,5	413,6	425,0	408,9	8,1	-

Tabela 8. Resultados da estimativa para cada uma das três medidas no tempo, em cada ponto para o ensaio 4, com meio absorvedor-espalhador.

Ponto	Medição	Mín	Q ₁	\tilde{x}	Q ₃	Máx	\bar{x}	s	p
A	1	4663,0	4730,0	4845,0	5015,0	5112,0	4868,0	161,4	***
B		3895,0	4218,0	4331,0	4360,0	4595,0	4287,0	181,2	****
C		4510,0	4517,0	4633,0	4665,0	4759,0	4612,0	83,1	****
D		4903,0	4988,0	5034,0	5158,0	5176,0	5056,0	95,7	***
Real		5182,0	5315,0	5342,0	5449,0	5502,0	5353,0	96,6	-
A	2	749,0	777,0	801,2	844,2	864,3	807,9	39,8	**
B		593,0	609,0	632,8	664,2	690,0	635,0	31,5	****
C		685,4	697,9	717,5	765,2	830,3	734,1	46,4	***
D		758,8	780,3	812,3	845,2	875,7	813,8	41,6	**
Real		835,4	835,4	861,3	878,5	878,5	858,7	18,2	-
A	3	351,5	368,5	382,1	403,2	431,5	386,4	24,9	***
B		299,1	312,1	319,3	393,4	421,5	343,9	45,7	***
C		330,0	358,0	391,7	400,3	447,1	384,4	32,7	**
D		386,3	399,6	423,8	451,3	465,9	426,2	27,1	ns
Real		428,7	440,9	444,2	447,5	455,2	443,7	7,3	-

Tabela 9. Resultados da estimativa para cada uma das três medições no tempo, em cada ponto para o ensaio 5, com meio absorvedor-espalhador.

Ponto	Medição	Mín	Q ₁	\tilde{x}	Q ₃	Máx	\bar{x}	s	p
A	1	4999,0	5073,0	5177,0	5312,0	5440,0	5195,0	146,1	**
B		4543,0	4585,0	4688,0	4778,0	4859,0	4687,0	107,4	**
C		4230,0	4273,0	4338,0	4414,0	4458,0	4340,0	81,5	****
D		4404,0	4563,0	4672,0	4746,0	4776,0	4643,0	120,1	**
Real		4746,0	4783,0	4893,0	4966,0	5040,0	4878,0	108,3	-
A	2	751,8	766,3	799,6	843,7	850,3	801,2	38,3	ns
B		713,0	740,0	752,0	785,9	811,3	760,6	30,0	ns
C		629,9	652,6	668,6	695,0	707,6	670,5	27,1	****
D		670,0	704,7	719,5	782,2	844,7	738,9	55,7	ns
Real		773,1	779,0	792,8	804,6	812,5	792,8	14,0	-
A	3	347,2	372,4	410,0	438,5	512,2	413,3	46,9	ns
B		381,6	422,7	453,2	482,0	519,9	451,9	43,5	ns
C		349,2	355,7	370,7	389,4	400,2	373,2	17,8	***
D		353,5	387,5	408,7	413,2	427,9	400,4	21,2	ns
Real		401,6	411,9	416,0	419,2	426,4	415,2	7,3	-

Tabela 10. Resultados da estimativa para cada uma das três medições no tempo, em cada ponto para o ensaio 1, sem meio absorvedor-espalhador.

Ponto	Medição	Mín	Q ₁	\tilde{x}	Q ₃	Máx	\bar{x}	s	p
A	1	6413,0	6457,0	6552,0	6609,0	6622,0	6532,0	79,6	****
B		5835,0	5916,0	6067,0	6229,0	6465,0	6099,0	211,5	**
C		5737,0	5975,0	6065,0	6176,0	6323,0	6066,0	160,9	**
D		6263,0	6299,0	6335,0	6581,0	6845,0	6437,0	189,4	***
Real		5663,0	5765,0	5867,0	5955,0	6013,0	5850,0	112,8	-
A	2	1049,0	1063,0	1118,0	1139,0	1233,0	1115,0	53,5	**
B		967,0	1015,0	1053,0	1086,0	1106,0	1048,0	45,5	ns
C		999,2	1015,0	1038,0	1079,0	1200,0	1056,0	58,6	ns
D		1032,0	1081,0	1113,0	1169,0	1224,0	1120,0	56,4	**
Real		1005,0	1031,0	1046,0	1067,0	1067,0	1043,0	21,3	-
A	3	378,4	391,4	420,2	438,3	465,4	416,9	28,4	**
B		337,7	343,7	370,4	388,1	402,7	368,4	22,5	ns
C		352,7	371,6	388,6	408,5	430,3	389,9	25,2	ns
D		356,1	395,0	413,0	425,1	433,3	406,5	26,2	**
Real		360,7	369,0	373,7	383,0	383,0	374,4	8,8	-

Tabela 11. Resultados da estimativa para cada uma das três medições no tempo, em cada ponto para o ensaio 2, sem meio absorvedor-espalhador.

Ponto	Medição	Mín	Q ₁	\tilde{x}	Q ₃	Máx	\bar{x}	s	p
A	1	5933,0	5974,0	6027,0	6091,0	6236,0	6041,0	89,2	****
B		5482,0	5586,0	5717,0	5863,0	6038,0	5725,0	170,9	ns
C		5551,0	5586,0	5672,0	5779,0	6143,0	5713,0	175,0	ns
D		5762,0	5905,0	5963,0	6065,0	6238,0	5981,0	138,5	****
Real		5417,0	5528,0	5610,0	5693,0	5693,0	5599,0	90,5	-
A	2	946,6	1001,0	1034,0	1040,0	1105,0	1024,0	42,7	**
B		904,4	952,3	996,2	1049,0	1096,0	998,1	60,2	ns
C		949,6	958,9	986,3	1010,0	1054,0	986,8	32,6	ns
D		947,9	956,8	968,5	986,5	1002,0	971,0	17,3	ns
Real		949,6	966,8	983,9	988,8	1008,0	980,0	16,9	-
A	3	340,0	357,6	365,7	383,6	400,7	369,4	18,5	ns
B		327,1	343,3	350,7	364,3	382,6	353,9	17,4	ns
C		300,4	314,7	336,2	353,9	379,9	336,6	26,8	ns
D		336,4	349,6	374,9	392,2	413,8	372,0	24,7	ns
Real		347,2	347,2	354,2	358,6	361,2	353,5	6,1	-

ANEXO 3. TABELAS DE RESULTADOS REFERENTES À AVALIAÇÃO COMPARATIVA ENTRE A ATIVIDADE ESTIMADA À PARTIR DA MÉDIA DOS PONTOS MONITORADOS (A, B, C E D) E A ATIVIDADE REAL

Legendas utilizadas: **A** é a atividade; **Mín** é o mínimo; **Q₁** é o 1º. Quartil; \tilde{x} é a mediana; **Q₃** é o 3º. Quartil; **Máx** é o máximo; \bar{x} é a média aritmética e **s** é o desvio padrão.

O valor **p** corresponde à significância das diferenças entre as médias determinadas pelo teste de comparação múltipla de Dunnet, em relação ao valor real R:

6. (–) não aplicável;
7. (****) extremamente significativa com $p < 0,0001$;
8. (***) muito significativa com $p < 0,001$;
9. (**) significativa com $p \leq 0,05$;
10. (ns) não significativa com $p > 0,05$.

Tabela 12. Resultados da estimativa para a média dos pontos monitorados, para as três medições ao longo tempo para o ensaio 1, com meio absorvedor-espalhador.

	Primeira medição		Segunda medição		Terceira medição	
	Atividade (MBq)		Atividade (MBq)		Atividade (MBq)	
	Estimativa	Real	Estimativa	Real	Estimativa	Real
Mín.	7612,0	8773,0	833,5	975,4	70,0	56,5
Q₁	8064,0	8861,0	904,0	975,4	88,2	58,5
\tilde{x}	8242,0	8906,0	931,8	1011,0	102,5	59,2
Q₃	8459,0	9038,0	964,0	1016,0	113,4	60,0
Máx	8776,0	9127,0	1072,0	1016,0	135,4	60,0
\bar{x}	8252,0	8932,0	935,6	1001,0	101,4	58,9
s	271,2	108,9	47,6	18,5	16,3	1,2

Tabela 13. Resultados da estimativa para a média dos pontos monitorados, para as três medições ao longo tempo para o ensaio 2, com meio absorvedor-espalhador.

	Primeira medição		Segunda medição		Terceira medição	
	Atividade (MBq)		Atividade (MBq)		Atividade (MBq)	
	Estimativa	Real	Estimativa	Real	Estimativa	Real
Mín.	4836,0	5553,0	957,0	1285,0	338,5	426,8
Q₁	5149,0	5653,0	1132,0	1295,0	375,1	437,8
\tilde{x}	5385,0	5696,0	1184,0	1318,0	394,4	440,0
Q₃	5706,0	5796,0	1250,0	1351,0	411,9	445,5
Máx	6026,0	5839,0	1313,0	1351,0	463,8	448,8
\bar{x}	5407,0	5713,0	1183,0	1319,0	396,0	440,0
s	353,2	96,6	84,8	25,6	30,5	6,9

Tabela 14. Resultados da estimativa para a média dos pontos monitorados, para as três medições ao longo tempo para o ensaio 3, com meio absorvedor-espalhador.

	Primeira medição		Segunda medição		Terceira medição	
	Atividade (MBq)		Atividade (MBq)		Atividade (MBq)	
	Estimativa	Real	Estimativa	Real	Estimativa	Real
Mín.	4351,0	4916,0	795,3	984,4	322,3	400,2
Q₁	4784,0	4966,0	917,0	1002,0	382,1	400,2
\tilde{x}	5062,0	5119,0	959,7	1005,0	413,3	408,5
Q₃	5216,0	5182,0	1019,0	1020,0	474,5	413,6
Máx	5594,0	5220,0	1095,0	1035,0	617,7	425,0
\bar{x}	5016,0	5093,0	957,2	1010,0	426,9	408,9
s	311,7	112,7	76,1	16,1	65,7	8,1

Tabela 15. Resultados da estimativa para a média dos pontos monitorados, para as três medições ao longo tempo para o ensaio 4, com meio absorvedor-espalhador.

	Primeira medição		Segunda medição		Terceira medição	
	Atividade (MBq)		Atividade (MBq)		Atividade (MBq)	
	Estimativa	Real	Estimativa	Real	Estimativa	Real
Mín.	3895,0	5182,0	593,0	835,4	299,1	428,7
Q₁	4512,0	5315,0	686,6	835,4	354,0	440,9
\tilde{x}	4683,0	5342,0	764,9	861,3	391,7	444,2
Q₃	4997,0	5449,0	822,3	878,5	418,1	447,5
Máx	5176,0	5502,0	875,7	878,5	465,9	455,2
\bar{x}	4706,0	5353,0	747,7	858,7	385,2	443,7
s	320,4	96,9	82,8	18,2	43,7	7,3

Tabela 16. Resultados da estimativa para a média dos pontos monitorados, para as três medições ao longo tempo para o ensaio 5, com meio absorvedor-espalhador.

	Primeira medição		Segunda medição		Terceira medição	
	Atividade (MBq)		Atividade (MBq)		Atividade (MBq)	
	Estimativa	Real	Estimativa	Real	Estimativa	Real
Mín.	4230,0	4746,0	629,9	773,1	347,2	401,6
Q₁	4448,0	4783,0	695,0	779,0	375,3	411,9
\tilde{x}	4680,0	4893,0	745,6	792,8	405,4	416,0
Q₃	4964,0	4966,0	783,1	804,6	432,0	419,2
Máx	5440,0	5040,0	850,3	812,5	519,9	426,4
\bar{x}	4716,0	4878,0	742,8	792,8	409,7	415,2
s	330,5	108,3	61,1	14,0	44,1	7,3

Tabela 17. Resultados da estimativa para a média dos pontos monitorados, para as três medições ao longo tempo para o ensaio 1, sem meio absorvedor-espalhador.

	Primeira medição		Segunda medição		Terceira medição	
	Atividade (MBq)		Atividade (MBq)		Atividade (MBq)	
	Estimativa	Real	Estimativa	Real	Estimativa	Real
Mín.	5737,0	5663,0	967,0	1005,0	337,7	360,7
Q₁	6056,0	5765,0	1035,0	1031,0	373,4	369,0
\tilde{x}	6311,0	5867,0	1081,0	1046,0	395,7	373,7
Q₃	6493,0	5955,0	1121,0	1067,0	419,8	383,0
Máx	6845,0	6013,0	1233,0	1067,0	465,4	3830,
\bar{x}	6284,0	5850,0	1085,0	104	395,4	374,4
s	262,1	112,8	61,5	21,3	30,8	8,8

Tabela 18. Resultados da estimativa para a média dos pontos monitorados, para as três medições ao longo tempo para o ensaio 2, sem meio absorvedor-espalhador.

	Primeira medição		Segunda medição		Terceira medição	
	Atividade (MBq)		Atividade (MBq)		Atividade (MBq)	
	Estimativa	Real	Estimativa	Real	Estimativa	Real
Mín.	5482,0	5417,0	904,4	949,6	300,4	347,2
Q₁	5690,0	5528,0	959,9	966,8	341,3	347,2
\tilde{x}	5896,0	5610,0	988,0	983,9	357,6	354,2
Q₃	6024,0	5693,0	1028,0	988,8	378,5	358,6
Máx	6238,0	5693,0	1105,0	1008,0	413,8	361,2
\bar{x}	5865,0	5599,0	995,0	980,0	358,0	353,5
s	205,9	90,5	44,2	16,9	25,7	6,1