

**Caracterização das Exposições Ocupacionais e Eficiência da Dosimetria Pessoal em
Radiologia Intervencionista Vascular**

FERNANDO ANTONIO BACCHIM NETO

Dissertação apresentada ao Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Campus de Botucatu para obtenção do título de Mestre em Farmacologia e Biotecnologia.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Diana Rodrigues de Pina

BOTUCATU - SP

2017

**Caracterização das Exposições Ocupacionais e Eficiência da Dosimetria Pessoal em
Radiologia Intervencionista Vascular**

FERNANDO ANTONIO BACCHIM NETO

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Diana Rodrigues de Pina

Dissertação apresentada ao Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Campus de Botucatu para obtenção do título de Mestre em Farmacologia e Biotecnologia.

BOTUCATU - SP

2017

B116c

Bacchim Neto, Fernando Antonio

Caracterização das Exposições Ocupacionais e Eficiência da
Dosimetria Pessoal em Radiologia Intervencionista Vascular /
Fernando Antonio Bacchim Neto. -- Botucatu, 2017

105 p. : il., tabs., fotos + 1 CD-ROM

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Instituto de Biociências, Botucatu

Orientadora: Diana Rodrigues de Pina

1. dosimetria pessoal. 2. exposições ocupacionais. 3. radiologia
intervencionista vascular. 4. dose efetiva. 5. dosímetros
termoluminescentes. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de
Biociências, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

À minha família.

Agradecimentos

À minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Diana Rodrigues de Pina, sempre disposta a contribuir em todos os aspectos profissionais e pessoais. Foram muitos desafios encontrados e conseguimos vencer todos. Agradeço também a grande amizade durante todos esses anos. Registro aqui o meu muitíssimo obrigado.

Ao Prof. Dr. José Ricardo de Arruda Miranda por todo o auxílio acadêmico e amizade. Foram muitas conversas dentro e fora do laboratório, discussões e cervejas durante todos esses anos.

À Prof.^a Dr.^a Regina Moura por ter dado apoio total a esta pesquisa, desde o início, pelas discussões e por ter disponibilizado todas as instalações do Setor de Hemodinâmica do Hospital das Clínicas de Botucatu, sempre que necessário. Seu apoio foi fundamental para que este trabalho fosse concluído.

À Dr.^a Yvone Mascarenhas e à Dr.^a Maria de Fátima Magon pelo apoio, enorme dedicação e paciência durante esta pesquisa. Não poderíamos ter concluído este trabalho sem o auxílio de vocês e de toda a equipe da Sapra Landauer.

Aos amigos do Laboratório de Física Aplicada ao Radiodiagnóstico (LAFAR), pela constante convivência, amizade e troca de conhecimentos: Allan, Ana Luiza, Ana Júlia, Fernando, Marcela, Maria Eugênia, Matheus, Nadine, Nataly, Renan e Thiago.

Aos amigos do Laboratório Biomagnetismo (BIOMAG), pela convivência diária e valiosas discussões.

À todos que direta ou indiretamente colaboraram para a conclusão deste trabalho.

À CAPES pelo apoio Financeiro.

Agradecimentos Pessoais

Aos meus pais, Ludmar José Bacchim e Marcia Raquel Pelaes Bacchim, pelo apoio incondicional, dedicação, carinho e por serem os melhores exemplos possíveis a se seguir. Não caberia aqui, em palavras, o quanto sou grato por tudo.

À minha avó, Madalena Maronez Bacchim, minha segunda mãe, por todo seu amor e carinho durante todos os momentos da minha vida.

Ao meu avô, Fernando Antonio Bacchim, embora a nossa convivência tenha sido pouca, o exemplo de honestidade, que o senhor nos deixou, sempre estará comigo.

À todos os meus familiares, em especial ao meu tio Emerson e à minha tia Cristiane, que nunca mediram esforços para me apoiar e incentivar.

Aos amigos Allan e Ricardo pela convivência diária. Vocês se tornaram membros da minha família.

Ao pessoal da república Bagudos, pela convivência e amizade.

Resumo

A Radiologia Intervencionista (RI) é a área da medicina que proporciona as maiores exposições ocupacionais. Os valores de dose aos quais os intervencionistas são expostos são difíceis de padronizar. Nesta pesquisa apresentamos uma avaliação completa das exposições ocupacionais e determinamos a eficiência de distintos métodos de dosimetria pessoal utilizados na RI. Essa pesquisa foi abordada em 2 etapas, conforme descrito a seguir:

A primeira etapa se baseou em caracterizar as exposições ocupacionais em diferentes modalidades de procedimentos de RI vascular para duas categorias de profissionais e estimar o número de procedimentos anuais que cada profissional pode realizar sem exceder os limites de dose. Foi avaliada a exposição ocupacional, através de dosimetria termoluminescente, em diferentes partes do corpo (cristalino, tireoide, tórax, abdômen, pés e mãos) de duas categorias de intervencionistas (principais e assistentes) em três modalidades diferentes de procedimentos de RI vascular. As maiores doses equivalentes foram encontradas para as mãos de ambos os profissionais, podendo chegar a aproximadamente 9 mSv em um único procedimento. Algumas regiões dos profissionais em alguns procedimentos podem receber, durante o ano, níveis de doses perigosamente perto dos limites anuais. Dosímetros posicionados no tórax podem subestimar as doses para outras regiões do corpo, especialmente abdômen, extremidades e cristalinos.

Na segunda etapa foram avaliadas as eficiências de 6 diferentes metodologias de dosimetria pessoal empregadas internacionalmente para estimar a dose efetiva recebida por profissionais intervencionistas. E, com base nessa análise, determinar as características de cada metodologia. Um dos métodos de dosimetria pessoal recomendados pela legislação brasileira se mostrou o mais conservador, superestimando, em média, a dose efetiva em dos profissionais em até 200%,

atingindo valores máximos próximos de 400%. O método mais preciso foi o utilizado na América do Norte. Este método não superestimou a dose efetiva dos profissionais mais do que alguns por cento e seu desvio padrão em relação à dose efetiva de referência foram os mais baixos. Com base nesses resultados, a escolha de metodologias que empregam, pelo menos, dois dosímetros, um por baixo e por cima de aventais protetores é recomendada. Além disso, em algumas situações onde a dose nas mãos pode ser alta, dosímetros adicionais para esta região também são recomendados.

Palavras-chave: Dosimetria pessoal, exposições ocupacionais, radiologia intervencionista vascular, dose efetiva, dosímetros termoluminescentes, fantoma antropomórfico.

Abstract

Interventional Radiology (IR) is the area of medicine that provides the largest occupational exposures. The dose values to which interventionists are exposed are difficult to standardize. In this research we present a complete evaluation of occupational exposures and determine the efficiency of different personal dosimetry methods used in IR. This research was performed in 2 stages, as described below:

The first step was to characterize the occupational exposures in different modalities of vascular IR procedures for two categories of professionals. We also estimated the number of annual procedures that each professional can perform without exceeding the dose limits. Occupational exposures were evaluated in different body parts (crystalline, thyroid, thorax, abdomen, feet and hands) by two interventional categories (primary and assistants) in three different modalities of vascular IR procedures. The highest equivalent doses were found for the hands of both professionals, reaching approximately 9 mSv in a single procedure. Some regions of professionals in some procedures may receive dose levels during the year dangerously close to annual limits. Dosimeters positioned in the chest may underestimate the doses to other regions of the body, especially the abdomen, extremities and crystalline.

The second stage, we evaluated the efficiencies of 6 different personal dosimetry methodologies used internationally to estimate the effective dose received by interventional professionals. And, based on this analysis, determine the characteristics of each methodology. One of the personal dosimetry methods recommended by Brazilian legislation was the most conservative, overestimating, on average, the effective dose in professionals by up to 200%, reaching maximum values close to 400%. The most accurate method was that used in North America. This method did not overestimate the effective dose of the professionals more than a

few percent and their standard deviation relative to the effective reference dose were the lowest. Based on these results, the choice of methodologies that employ at least two dosimeters, one under and one above protective aprons is recommended. In addition, in some situations where the dose in the hands may be high, additional dosimeters for this region are also recommended.

Keywords: Personal dosimetry, occupational exposition, vascular interventional radiology, effective dose, termoluminescente dosimetry, anthropomorphic phantom.

Esta pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Física Aplicada ao Radiodiagnóstico (LAFAR), devidamente aprovada pelo Comitê de Ética em Pesquisa (CEP) sob protocolo: CAAE 16932513.5.0000.5411.

Lista de Figuras

Figura 1: Efeitos biológicos da radiação ionizante.....	24
Figura 2: Ilustração do posicionamento dos profissionais na sala de exames durante os procedimentos avaliados. P1 é a posição do profissionais principal, P2 é a posição do profissional assistente, M é a representação da mesa de procedimentos e a região demarcada pelo símbolo da radiação representa a região onde há incidência do feixe primário de radiação.	33
Figura 3: Demonstração da posição dos dosímetros termoluminescentes.	35
Figura 4: Taxas de dose equivalentes do intervencionista principal (boxplots pretos) e assistente (boxplots cinzas) para a cristalino, tiroide, tórax, abdômen, pés e mãos para procedimentos de angiografia. Cada boxplot representa os seguintes valores estatísticos: os limites inferior e superior da caixa indicam os 25º e 75º percentis; A linha horizontal sólida na caixa marca a mediana; o quadrado representa o valor médio e as barras de erro acima e abaixo da caixa representam o desvio padrão.....	40
Figura 5: Taxas de dose equivalentes do intervencionista principal (boxplots pretos) e assistente (boxplots cinzas) para a cristalino, tiroide, tórax, abdômen, pés e mãos para procedimentos de angiografia. Cada boxplot representa os seguintes valores estatísticos: os limites inferior e superior da caixa indicam os 25º e 75º percentis; A linha horizontal sólida na caixa marca a mediana; o quadrado representa o valor médio e as barras de erro acima e abaixo da caixa representam o desvio padrão.....	41
Figura 6: Taxas de dose equivalentes do intervencionista principal (boxplots pretos) e assistente (boxplots cinzas) para a cristalino, tiroide, tórax, abdômen, pés e mãos para procedimentos de tratamento de A. A. A. Cada boxplot representa os seguintes valores estatísticos: os limites inferior e superior da caixa indicam os 25º e 75º percentis; A linha horizontal sólida na caixa	

marca a mediana; o quadrado representa o valor médio e as barras de erro acima e abaixo da caixa representam o desvio padrão.....	42
Figura 7: Fluxograma que resume as 3 etapas executadas, descritas na seção “metodologia” ..	51
Figura 8: Regressão linear dos FCs medidos para 75 e 85 kVp.	61
Figura 9: E de referência calculada utilizando os FCs e os 6 métodos para estimar as doses efetivas adotados neste estudo. Cada caixa representa os seguintes valores estatísticos: os limites inferior e superior da caixa indicam os 25º e 75º percentis; A linha horizontal sólida na caixa marca a mediana; o quadrado representa o valor médio e as barras de erro acima e abaixo da caixa representam o desvio padrão.....	62
Figura 10: Bland Altman para a diferença e média entre a E de referência e as Es estimativas usando os Métodos 1 (A) e 2 (B). A diferença refere-se ao E obtido com a metodologia testada menos a E de referência dividido pela E de referência. Estas diferenças foram calculadas para cada procedimento monitorado. As linhas centrais pretas correspondem ao valor médio dos desvios. As linhas cinzas contínuas indicam o intervalo de 2 desvios-padrão. As linhas pretas tracejadas correspondem ao valor da mediana das diferenças.	63
Figura 11: Bland Altman para a diferença e média entre a E de referência e as Es estimativas usando os Métodos 3 (A) e 4 (B). A diferença refere-se ao E obtido com a metodologia testada menos a E de referência dividido pela E de referência. Estas diferenças foram calculadas para cada procedimento monitorado. As linhas centrais pretas correspondem ao valor médio dos desvios. As linhas cinzas contínuas indicam o intervalo de 2 desvios-padrão. As linhas pretas tracejadas correspondem ao valor da mediana das diferenças.	64
Figura 12: Bland Altman para a diferença e média entre a E de referência e as Es estimativas usando os Métodos 5 (A) e 6 (B). A diferença refere-se ao E obtido com a metodologia testada menos a E de referência dividido pela E de referência. Estas diferenças foram calculadas para	

cada procedimento monitorado. As linhas centrais pretas correspondem ao valor médio dos desvios. As linhas cinzas contínuas indicam o intervalo de 2 desvios-padrão. As linhas pretas tracejadas correspondem ao valor da mediana das diferenças. 65

Lista de Tabelas

Tabela 1: Diferentes valores de w_T segundo a ICRP 103.	28
Tabela 2: Limites de dose efetiva e equivalente para IOE.	30
Tabela 3: Mediana (range interquartil) dos valores de dose equivalentes (μSv) para cristalinos, tireoide, peito, abdómen, pés e mãos em todos os procedimentos para intervencionistas principais e assistentes.	39
Tabela 4: Número de procedimentos anuais que cada profissional pode realizar sem exceder os limites de dose efetiva anuais (medidos no tórax). Os resultados foram baseados nos valores de mediana e dose máxima com blindagem de chumbo de 0,25 e 0,5mm.	44
Tabela 5: Número de procedimentos anuais que cada profissional pode realizar sem exceder os limites de dose equivalente anuais. Os resultados foram baseados nos valores de mediana e dose máxima e um fator de atenuação de 60% para o óculos plumbífero. Para as extremidades não consideramos fatores de atenuação porque não é usual blindagens nessas regiões.	44
Tabela 6: Posição e número de dosímetros no fantoma antropomórfico.	57
Tabela 7: Doses equivalentes nas regiões monitoradas na prática clínica. Média, DP, mediana e range interquartil (RIn) de doses equivalentes em todas as regiões monitoradas.	59
Tabela 8: FCs para 75 kVp e 85 kVp, FCs médios e DP dos FCs para cada tecido ou órgão.	60

Lista de Abreviaturas

RI – Radiologia Intervencionista;

IOE – Indivíduo Ocupacionalmente Exposto;

DNA – Ácido Desoxirribonucleico;

TLD – Dosímetro Termoluminescente;

D_A – Dose Absorvida;

D_E – Dose Equivalente;

E – Dose Efetiva;

NCRP – National Council on Radiological Protection and Measurements;

ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária;

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear;

A. A. A. – Aneurisma de Aorta Abdominal;

Sv – Sievert;

TDE – Taxa de Dose Equivalente;

NMPA – Número Máximo de Procedimentos Anuais;

ICRP – International Commission on Radiological Protection;

PKA – Produto Kerma Área;

FC – Fator de Correlação;

RIn – *Range* Interquartil;

Sumário

Capítulo 1: Introdução, justificativa e relevância do tema	17
Capítulo 2: Objetivos.....	21
Capítulo 3: Fundamentos teóricos.....	23
3.1. Efeitos Biológicos da Radiação	23
3.1.1. Mecanismo Direto	24
3.1.2. Mecanismo Indireto	25
3.2. Dosimetria da Radiação Ionizante.....	25
3.2.1. Dose Absorvida.....	27
3.2.2. Dose Equivalente.....	27
3.2.3. Dose Efetiva.....	27
3.3. Estimativa da dose efetiva dos profissionais na prática clínica	28
3.4. Proteção Radiológica.....	29
Capítulo 4: Caracterização das exposições ocupacionais	31
4.1. Metodologia	31
4.1.1. Seleção dos procedimentos	31
4.1.2. Descrição do equipamento	33
4.1.3. Dosimetria dos profissionais	34
4.1.4. Construção dos perfis de taxa de dose equivalente	36
4.1.5. Número máximo de procedimentos anuais.....	36

4.1.6. Análise estatística	37
4.2. Resultados	38
4.3. Discussão	45
4.4. Conclusão	48
Capítulo 5: Avaliação da dosimetria pessoal	50
5.1. Metodologia	50
5.1.1. Dosimetria dos profissionais na prática clínica	53
5.1.2. Metodologias utilizadas para estimar a dose efetiva dos profissionais	54
5.1.3. Doses efetivas de referência e fatores de correlação ente doses externas e internas.....	56
5.1.4. Análises estatísticas.....	59
5.2. Resultados	59
5.3. Discussão	66
5.4. Conclusão	68
Capítulo 6: Conclusões finais	70
Capítulo 7: Referências bibliográficas.....	71
Apêndice A	74
Apêndice B	Erro! Indicador não definido.

Capítulo 1: Introdução, justificativa e relevância do tema

A utilização da radiação ionizante dentro da medicina aumenta anualmente. Devido ao fácil acesso e ao rápido desenvolvimento dos equipamentos, no Brasil, o uso desse recurso cresce a taxas próximas de 10% ao ano (Soares et al., 2011, Miller et al., 2010b).

Uma importante aplicação da radiação ionizante na medicina é a radiologia intervencionista (RI) (Hausler et al., 2009). Essa aplicação compreende intervenções tanto diagnósticas quanto terapêuticas realizadas por acesso percutâneo e guiadas através de imagens fluoroscópicas. Assim, são localizadas lesões vasculares e seus respectivos locais de tratamento (Hausler et al., 2009). A fluoroscopia proporciona imagens dinâmicas, em tempo real, permitindo aplicações nestes exames que necessitam da obtenção de imagens de estruturas ou funções do organismo (Hausler et al., 2009, Kim et al., 2012).

A RI obteve um avanço em sua utilização na metade da década de 1970 devido ao aumento da capacidade das técnicas de aquisição de imagens médicas (Soares et al., 2011). Desde então, o emprego dessa técnica cresce de maneira notável na substituição cirurgias complicadas e altamente invasivas por procedimentos mais simples e menos invasivos. Desta maneira, o tempo de recuperação do paciente é reduzido (Soares et al., 2011, Miller et al., 2010b, Kim et al., 2012).

Devido à extrema proximidade e ao longo período de exposição dos intervencionistas à radiação espalhada, a RI é a área da medicina responsável pelas maiores doses de radiação ionizante na equipe médica (Hausler et al., 2009, Jacob et al., 2013).

A avaliação da radiação incidente em diferentes regiões do corpo do profissional durante o procedimento permite um melhor entendimento sobre quais ações são necessárias para garantir a proteção radiológica dos indivíduos ocupacionalmente expostos (IOEs) (Miller et al., 2010a,

Hausler et al., 2009). Os pacientes são a principal fonte de radiação espalhada durante um procedimento de RI, portanto, os profissionais que permanecem mais próximos ao paciente são os que recebem maiores níveis de radiação (Vano et al., 2010, Hausler et al., 2009, Schonfeld et al., 2011).

Os valores de dose aos quais os intervencionistas são expostos são difíceis de padronizar (Miller et al., 2010a). Estas doses dependem de muitos fatores, como tempo de exposição, carga no tubo de raios X, tipo de exame, locais de intervenção, anatomia e condições gerais do paciente (ICRP, 2007, UNSCEAR, 2008, Hausler et al., 2009, Miller et al., 2010a). Estudos mostram que os dosímetros pessoais podem subestimar a dose nos IOE, principalmente nas suas extremidades (Hausler et al., 2009, Jacob et al., 2013, Schonfeld et al., 2011).

Vários outros fatores podem modificar o risco de radiação para a equipe, como a altura do profissional, o local de seu posicionamento na sala, a posição do tubo em relação à mesa e ao paciente, o uso adequado de vestimentas e anteparos de proteção radiológica, a técnica utilizada durante o procedimento e, principalmente, o tempo total de acionamento do feixe de raios X (ICRP, 2007, Jacob et al., 2013, Chida et al., 2013, Kim et al., 2012).

Por ser a área que mais contribui com as exposições ocupacionais dentro da medicina, a RI merece maior atenção na otimização de seus protocolos (Miller et al., 2010a, Hausler et al., 2009). Dessa maneira pode-se otimizar a razão risco/benefício, ou seja, controlar as exposições, aproveitando-as ao máximo, e produzindo imagens com técnicas ótimas (Hausler et al., 2009, Vano et al., 2010, Chida et al., 2013, Wagner et al., 1994).

No Brasil, a fim de determinar as doses efetivas recebidas pelos IOEs, para práticas envolvendo o radiodiagnóstico, exige-se um dosímetro na região mais exposta do tronco (ANVISA, 1998).

Esta metodologia (dosímetro único, posicionado no tórax) é eficiente em situações de exposições em campos homogêneos de radiação (Miller et al., 2010a). Porém, em situações onde os profissionais são expostos à doses diferentes em cada região do corpo, existe a possibilidade desses dosímetros não descreverem de maneira acurada as doses efetivas desses profissionais (Miller et al., 2010b, Miller et al., 2010a, Hausler et al., 2009).

Os campos de radiação aos quais a equipe médica é exposta em procedimentos de RI não são homogêneos, no entanto, a metodologia de dosimetria exigida para os profissionais é a mesma das demais práticas (Hausler et al., 2009, ANVISA, 1998). Desta maneira, são necessários estudos para avaliar a eficiência da dosimetria pessoal na RI. E ainda, estudos que abordem uma metodologia mais eficiente de dosimetria a ser empregada na equipe médica poderiam trazer contribuições consideráveis para a proteção dos profissionais (Miller et al., 2010b, Miller et al., 2010a, Hausler et al., 2009). No entanto, mesmo com a necessidade evidente, trabalhos que avaliem a eficiência de diversos métodos utilizados internacionalmente para estimar a dose efetiva (E) dos profissionais são uma lacuna na literatura.

Diversos estudos avaliaram as exposições à radiação da equipe médica em RI, tanto para um melhor entendimento das exposições ocupacionais, como para melhorar as estratégias de proteção radiológica. No entanto, a maioria deles se concentraram em um procedimento específico, ou em uma região específica do profissional, como os cristalinos, ou as medidas de dose são adquiridas em situações artificiais, ou ainda, negligenciam algumas regiões, como o abdômen (Koukorava et al., 2011, Hausler et al., 2009, Domienik et al., 2011, Kim et al., 2012, Miller et al., 2010b, Jacob et al., 2013, Vanhavere et al., 2011, Nikodemova et al., 2011). Portanto, estudos que avaliem de maneira completa as doses recebidas sob condições típicas de um procedimento trarão importantes contribuições para a literatura (Hausler et al., 2009, Vano et

al., 2010). Estas avaliações podem proporcionar subsídios para medidas de proteção radiológica de toda a equipe médica e para o desenvolvimento de uma técnica de dosimetria mais eficiente.

Diante destas lacunas descritas anteriormente, foram quantificadas, de maneira abrangente, as doses recebidas pela equipe médica durante procedimentos de RI. Ainda nesta pesquisa foram avaliadas as respostas de diferentes métodos utilizados internacionalmente para estimar a dose efetiva dos profissionais. Traremos assim contribuições originais para a literatura através de um completo entendimento das exposições ocupacionais, sem negligenciar regiões do corpo do profissional e ainda monitorando mais de uma modalidade de procedimento intervencionista. Ainda como contribuição original, compararemos diferentes metodologias para estimar a dose efetiva dos profissionais. Podendo, desta maneira, evidenciar as características de cada metodologia e apontando a mais indicada para uso clínico. Considerando um estudo muito denso em metodologia e resultados, esta dissertação seguirá uma apresentação conforme descrito a seguir: No capítulo corrente apresentamos a introdução (Capítulo 1); No Capítulo 2 serão abordados detalhadamente os objetivos desta pesquisa; O Capítulo 3 abordará uma síntese dos fundamentos teóricos para subsídios do leitor; O Capítulo 4 apresentará o primeiro objetivo desta pesquisa abordado em forma de artigo (como fruto deste capítulo foi publicado um artigo completo na revista *Physica Medica: European Journal of Medical Physics*, apresentado no Apêndice A.); O Capítulo 5 contempla o segundo objetivo proposto nesta pesquisa, apresentado também em forma de artigo (como fruto deste capítulo temos um artigo recentemente enviado para a revista *Physica Medica: European Journal of Medical Physic*, apresentado no Apêndice B).

Capítulo 2: Objetivos

Conforme descrito anteriormente, este trabalho foi dividido em duas etapas com objetivos distintos. Cada uma dessas etapas deu origem a um artigo (o primeiro deles apresentado no Capítulo 4 e no Apêndice A e o segundo no Capítulo 5 e no Apêndice B). A seguir será descrito detalhadamente os objetivos propostos para este capítulo:

- Caracterizar as exposições ocupacionais em diferentes modalidades de procedimentos de RI vascular para duas categorias de profissionais: intervencionista principal e intervencionista assistente. Com base nessas informações determinar o número máximo de procedimentos anuais que cada intervencionista pode realizar sem exceder os limites de doses ocupacionais.
 - Seleção das modalidades de procedimentos a serem avaliadas;
 - Monitorar a dose incidente nos cristalinos, tireoide, tórax, abdômen, pés e mãos dos intervencionistas principais e assistentes durante as modalidades selecionadas;
 - Estimar o número máximo de procedimentos que cada intervencionista poderá realizar anualmente sem exceder os limites de doses ocupacionais.
- Avaliar a eficiência de 6 diferentes metodologias de dosimetria pessoal empregadas nacionalmente e internacionalmente para estimar a dose efetiva recebida por profissionais em RI vascular. E, com base nessa análise, determinar as características de cada metodologia.
 - Monitorar a dose de radiação incidente em diferentes regiões do corpo do intervencionista durante a rotina clínica;
 - Estimar a dose efetiva recebida pelo intervencionista de acordo com 6 métodos;

- Calcular com maior precisão a dose efetiva desses profissionais para ser usada como referência na comparação desses métodos. Para isso, medidas experimentais utilizando objetos simuladores antropomórficos foram realizadas.

Capítulo 3: Fundamentos teóricos

3.1. Efeitos Biológicos da Radiação

A radiação ionizante é um importante recurso utilizado em diagnósticos e tratamentos de doenças, no entanto, é um potente agente carcinogênico e promotor de mutações (Prasad et al., 2004, Wardman, 2009). Os efeitos biológicos induzidos pela radiação ionizante podem ter um grande tempo de latência, e se manifestar anos após a sua indução. No entanto, os eventos químicos que os desencadeiam acontecem em poucos milissegundos (Wardman, 2009).

O processo de ionização, produzido pela radiação ionizante, pode alterar o arranjo da eletrosfera dos átomos. Ao alterar esse átomos, podem alterar as estruturas das moléculas que os contêm. Se a energia de excitação ultrapassar a energia de ligação química entre os átomos, é possível a ocorrência de quebra das ligações químicas e, conseqüentemente, mudanças moleculares (Dance et al., 2014, Tahuata et al., 2003).

Caso a radiação afete moléculas que fazem parte da composição de uma célula, esta pode sofrer as conseqüências de suas alterações, diretamente ou indiretamente, com a produção de íons, elétrons e radicais livres (Tahuata et al., 2003). As interação da radiação com a célula pode resultar em alteração ou morte celular (Dance et al., 2014).

Os mecanismos de ação das radiações podem ser divididos em duas categorias, como representadas na Figura 1 a seguir:

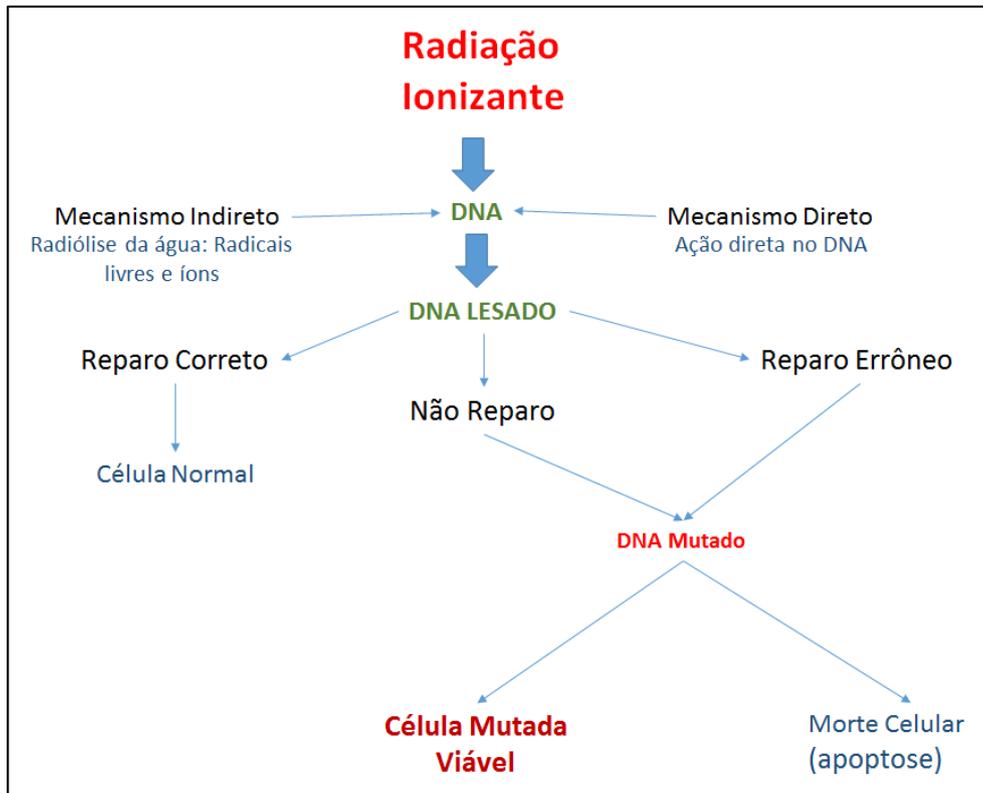


Figura 1: Efeitos biológicos da radiação ionizante.

3.1.1. Mecanismo Direto

O mecanismo direto ocorre quando a radiação age diretamente nas moléculas importantes, como as de ácido desoxirribonucleico (DNA). Os danos nos DNAs resultam em anormalidades nos cromossomos, chamadas de aberrações cromossômicas. Entre os danos, os mais frequentes são: mudança de uma base, perda de uma base, quebra das pontes de hidrogênio, quebra de uma fita, quebra de duas fitas, ligação cruzada dentro da hélice de uma molécula de DNA, ligação cruzada entre duas moléculas de DNA ou ligação de uma molécula de DNA a uma proteína (Prasad et al., 2004, Wardman, 2009, Dance et al., 2014, Tahuata et al., 2003, Okuno and Yoshimura, 2010). As quebras das duas fitas da molécula de DNA é a lesão que mais demanda energia, no entanto, exposições à raios X em doses bastante baixas já são suficientes para proporcionar essas lesões (Rothkamm and Lobrich, 2003).

3.1.2. Mecanismo Indireto

No mecanismo indireto de produção de dano biológico, a molécula da água irradiada sofre radiólise (quebra por radiação). Durante a quebra, são produzidos íons H^+ e OH^- e radicais livres. Os íons H^+ e OH^- não produzem nenhuma consequência, já que estes existem em grande quantidade nos fluidos corporais. No entanto, os radicais livres podem se manter estáveis ou reagir com outras moléculas em solução. Os radicais livres podem ainda se recombinar e produzir peróxido de hidrogênio, agente oxidante poderoso, que pode interagir com as moléculas de DNA resultando em dano biológico (Dance et al., 2014, Okuno and Yoshimura, 2010).

3.2. Dosimetria da Radiação Ionizante

A dosimetria da radiação ionizante pode ser realizada através de um dispositivo ou sistema que meça, de maneira direta ou indireta, certa quantidade de radiação. Muitas grandezas podem ser mensuradas, como a dose absorvida, a dose equivalente e a dose efetiva (Attix, 1986).

As propriedades de um dosímetro são: exatidão e precisão, linearidade de resposta, dependência da dose ou taxa de dose, resposta à energia medida e dependência direcional. Obviamente, nem todos os dosímetros podem satisfazer todas estas características. A escolha de um dosímetro de radiação deve, portanto, ser feita criteriosamente, levando em conta as exigências da situação da medição (Podgorsak and International Atomic Energy Agency., 2005, Knoll, 2010).

No radiodiagnóstico, o conhecimento exato tanto da dose absorvida no ar quanto em um meio simulador e a sua distribuição espacial são de grande importância, bem como a possibilidade de obter a dose para um órgão de interesse no paciente ou nos IOEs. Os medidores de radiação mais utilizados para as práticas diagnósticas e intervencionistas são as câmaras de

ionização e os dosímetros termoluminescentes (TLD) (Podgorsak and International Atomic Energy Agency., 2005).

Alguns materiais, após a incidência de radiação, têm a capacidade de reter parte da energia depositada. Quando esta energia é posteriormente liberada na forma de luz ultravioleta, visível ou infravermelhos, o fenômeno é chamado de luminescência. O processo de luminescência pode ser acelerado através de uma fonte de excitação. Se o agente excitador é o calor, o fenômeno é conhecido como termoluminescência e o dosímetro que utiliza esse fenômeno recebe o nome de termoluminescente (do inglês, *thermoluminescent dosimeter*, TLD) (Podgorsak and International Atomic Energy Agency., 2005, Knoll, 2010, Wagner et al., 1994).

A radiação ionizante ao incidir no dosímetro TLD eleva alguns elétrons da estrutura do cristal para bandas de energia superiores, produzindo pares elétrons-lacunas. O dosímetro possui armadilhas em sua estrutura cristalina a fim de capturar uma quantidade significativa de elétrons e não permitir que eles se recombinem imediatamente com suas lacunas. Ao manter esse armadilhamento estável, a energia referente à diferença entre a energia da banda em que o elétron estava antes da exposição à radiação e a energia da banda em que ele está após a exposição à radiação foi armazenada. Para se quantificar a exposição de radiação, o elétron capturado recebe uma energia de excitação (calor, no caso da termoluminescência) para se liberar da armadilha e migrar para a lacuna. No momento em que ocorre a recombinação do elétron com a lacuna, um fóton de luz é emitido. O número total de fótons produzidos e a energia desses fótons é proporcional à radiação incidente no dosímetro (Podgorsak and International Atomic Energy Agency., 2005, Knoll, 2010).

As três grandezas de dose fundamentais para a proteção radiológica são apresentadas a seguir:

3.2.1. Dose Absorvida

Em Radiobiologia, radiologia clínica e proteção radiológica, a dose absorvida (D_A) é a grandeza de dose básica. Esta grandeza é para qualquer tipo de radiação e geometria de irradiação. D_A é definida pelo quociente de dE por dm , onde dE é a energia média depositada em uma determinada massa dm de matéria, conforme apresentado na equação 1 (ICRP, 2007).

$$D_A = \frac{dE}{dm} \quad (1)$$

No Sistema Internacional (SI) a unidade de D_A é $J.kg^{-1}$ e o nome que essa unidade recebe é Gray (Gy).

3.2.2. Dose Equivalente

A grandeza de dose utilizada em proteção radiológica para expressar quantidades de dose específica em cada tecido, decorrente de diferentes tipos de radiação, é a dose equivalente (D_E). A somatória das doses absorvidas, $D_{A,R}$, decorrentes da incidência de diferentes tipos de radiação, multiplicados pelos fatores de ponderação de cada tipo de radiação, w_R , resulta na D_E conforme apresentado na equação 2 (ICRP, 2007).

$$D_E = \sum_R w_R \cdot D_{A,R} \quad (2)$$

Para fótons, principal tipo de radiação utilizado no radiodiagnóstico, o fator de ponderação, w_R , é igual a 1. No SI, a unidade de D_E é $J.kg^{-1}$ e recebe o nome de Sievert (Sv) (ICRP, 2007).

3.2.3. Dose Efetiva

Dose efetiva (E) é a principal grandeza de dose utilizada em proteção radiológica. No sentido de descrever os possíveis detrimientos que um indivíduo pode sofrer por exposições a radiação, a dose efetiva é a grandeza que melhor descreve os riscos envolvidos em uma determinada

exposição. A dose efetiva é definida como uma somatória ponderada das doses equivalentes de todos os tecidos de um indivíduo, como descrito na equação 3 (ICRP, 2007).

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T \quad (3)$$

Onde w_T é o fator de ponderação do tecido T e o somatório de todos os w_T dos tecidos de um indivíduo resulta em 1. Todos os tecidos considerados sensíveis à indução de efeitos estocásticos, proporcionados pela radiação, recebem um valor de w_T . Os valores de w_T são determinados para representar as contribuições de um único órgão ou tecido para os detrimientos totais proporcionados por uma exposição à radiação (ICRP, 2007). No SI, a unidade de dose efetiva é o $J.kg^{-1}$ e também recebe o nome de Sievert (Sv).

Os diferentes valores de w_T para todos os órgãos de maior radiosensibilidade são apresentados na Tabela 1 (ICRP, 2007).

Tabela 1: Diferentes valores de w_T segundo a ICRP 103.

Tecido	w_T	$\sum w_T$
Medula óssea, Cólon, Pulmão, Estomago, Mama e Tecidos restantes*	0,12	0,72
Gônadas	0,08	0,08
Bexiga, Esôfago, Fígado, Tireoide	0,04	0,16
Superfície óssea, Cérebro, Glândulas salivares e Pele	0,01	0,04
	Total	1,00

*Tecidos restantes: Adrenais, Região extratorácica, Vesícula biliar, Coração, Rins, Nódulos linfáticos, Músculos, Mucosa oral, Pâncreas, Próstata, Intestino delgado, Baço, Timo e Útero/Colo do útero.

3.3. Estimativa da dose efetiva dos profissionais na prática clínica

Internacionalmente, foram adotados diferentes métodos para estimar o valor de E dos profissionais em procedimentos intervencionistas (Miller et al., 2010a). Na Europa, um dosímetro

posicionado no tórax, abaixo dos aventais de proteção radiológica, era previamente considerado um bom método para estimar o valor de E dos profissionais, de acordo com Miller *et al.* (ICRP, 2007, Miller et al., 2010a). No entanto, um único dosímetro usado abaixo dos aventais protetores não fornece nenhuma informação sobre as regiões do corpo não protegidas (Miller et al., 2010a).

Nos Estados Unidos, o National Council on Radiological Protection and Measurements (NCRP) recomenda o uso de dois dosímetros pessoais, sendo um acima e um abaixo de proteções radiológicas. O dosímetro usado acima dos aventais pode ser posicionado no pescoço (NCRP, 1995), enquanto o dosímetro usado abaixo das proteções radiológicas pode ser posicionado no tórax ou na altura do abdome (NCRP, 1995). As leituras do dosímetro são então convertidas para as estimativas das E dos profissionais, por uma equação previamente estabelecida (NCRP, 1995).

No Brasil, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) recomenda o uso de um dosímetro na altura da região mais expostas do tronco acima dos aventais de proteção (ANVISA, 1998). De acordo com esta agência, as leituras dos dosímetros devem ser corrigidas por um fator de transmissão de 0,1 para estimar o valor de E dos profissionais (ANVISA, 1998). Em contraste, os estudos que avaliam a eficiência da proteção radiológica apontam que os fatores de transmissão estão abaixo de 10% para a faixa de energia diagnóstica (Christodoulou et al., 2003).

3.4. Proteção Radiológica

A proteção radiológica, segundo a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), é o conjunto de medidas que visam proteger o homem, seus descendentes e seu meio ambiente contra possíveis efeitos indevidos causados por radiação ionizante (CNEN, 2011). As medidas se dividem em três princípios básicos: justificção, otimização e limitação de doses individuais.

O princípio da justificção defende que nenhuma prática que envolva radiação ionizante deve ser autorizada a menos que produza suficiente benefício para o indivíduo exposto ou para

a sociedade. A exposição de caráter médico deve ser útil para produzir um benefício real para a saúde do indivíduo e/ou para a sociedade. A eficácia, os benefícios e os riscos de outras técnicas diagnósticas e terapêuticas que envolvam menos ou nenhuma exposição à radiação ionizante devem ser levados em consideração (CNEN, 2011).

O princípio da otimização sugere que as exposições devem ser feitas com o menor nível de radiação possível, sem que isso implique em perda na qualidade do objetivo da exposição, otimizando a proteção radiológica. Tais atividades devem ser planejadas, analisando-se em detalhes o que se pretende atingir e de que maneira os profissionais deverão atuar (CNEN, 2011).

O princípio da limitação de doses individuais explicita que as doses de radiação, decorrentes de todas as práticas que o indivíduo possa estar exposto, não devem exceder os limites estabelecidos pelas normas de radioproteção. Para os IOE, os limites de dose são apresentados na Tabela 2. Esse princípio só se aplica à IOE e ao público em geral, não restringindo doses de radiação para o paciente sob tratamento (CNEN, 2011).

Tabela 2: Limites de dose efetiva e equivalente para IOE.

Grandeza	Região	Limite de dose anual
<i>Dose efetiva</i>	Corpo inteiro ^[a]	20 mSv/a
<i>Dose equivalente</i>	Cristalino ^[a]	20 mSv/a
	Pele	500 mSv/a
	Mãos e pés	500 mSv/a

[a] Média aritmética em 5 anos consecutivos, desde que não exceda 50 mSv em qualquer ano.

Capítulo 4: Caracterização das exposições ocupacionais

Tendo em vista o grande dinamismo dos procedimentos de RI e a necessidade de uma melhor compreensão dos níveis de exposição à radiação nos profissionais, este capítulo realizou um avaliou exposições ocupacionais em diferentes categorias de profissionais, e em três diferentes modalidades de procedimentos. Estimou-se ainda o número máximo de procedimentos que cada profissional pode realizar sem exceder os limites de exposição ocupacional.

Para isso foi necessário caracterizar os perfis de exposição à radiação da equipe médica durante diferentes procedimentos de RI vascular. Foi realizada uma avaliação completa das doses de radiação incidentes em diferentes regiões do corpo do intervencionista principal e assistente. Esta avaliação foi realizada para as três principais modalidades que representam os maiores potenciais de exposição ocupacional para a equipe médica. Com base neste extenso levantamento também estimamos o número máximo de procedimentos que cada profissional pode realizar em diferentes circunstâncias de proteções radiológicas sem que seja excedido o limite do exposição ocupacional vigente em nosso país.

Como fruto deste capítulo publicamos o artigo “Occupational Radiation Exposure in Vascular Interventional Radiology: A Complete Evaluation of Different Body Regions” na revista *Physica Medica: European Journal of Medical Physics*.

4.1. Metodologia

4.1.1. Seleção dos procedimentos

Foram avaliadas três modalidades diferentes de procedimentos de RI vascular baseado em três critérios: tempo total de exposição (tempo de fluoroscopia), frequência do procedimento e “noise level” (parâmetro selecionado para cada protocolo e é influenciado pela corrente no tubo

– mA). Com base nesses critérios foram selecionados para a avaliação os procedimentos mais frequentes dentre os com maior tempo de fluoroscopia e com maior corrente no tubo. Esses critérios fizeram com que fossem selecionados os procedimentos com maior potencial de dose para a equipe médica.

Com base nesses critérios, foram escolhidas três modalidades de procedimentos para serem avaliados: angiografia de membros inferiores (Angiografias), angioplastias transluminal de membros inferiores (Angioplastias) e tratamento de aneurisma de aorta abdominal com fixação de endoprótese (tratamento de A. A. A.). Foram avaliados 30 procedimentos de cada modalidade selecionada. Sete IOEs foram avaliados durante o estudo. Em cada procedimento, tanto o intervencionista principal quanto o assistente foram monitorados. Durante procedimentos de angioplastia e angiografia o intervencionista principal e o assistente permaneceram do mesmo lado da mesa a aproximadamente 0,5 e 1,0 metro da região imageada do paciente, respectivamente. Durante procedimentos de tratamento de A. A. A. os profissionais permaneceram em lados opostos da mesa, ambos a aproximadamente 0,5 metro da região imageada do paciente. A figura 2 ilustra o posicionamento dos profissionais.

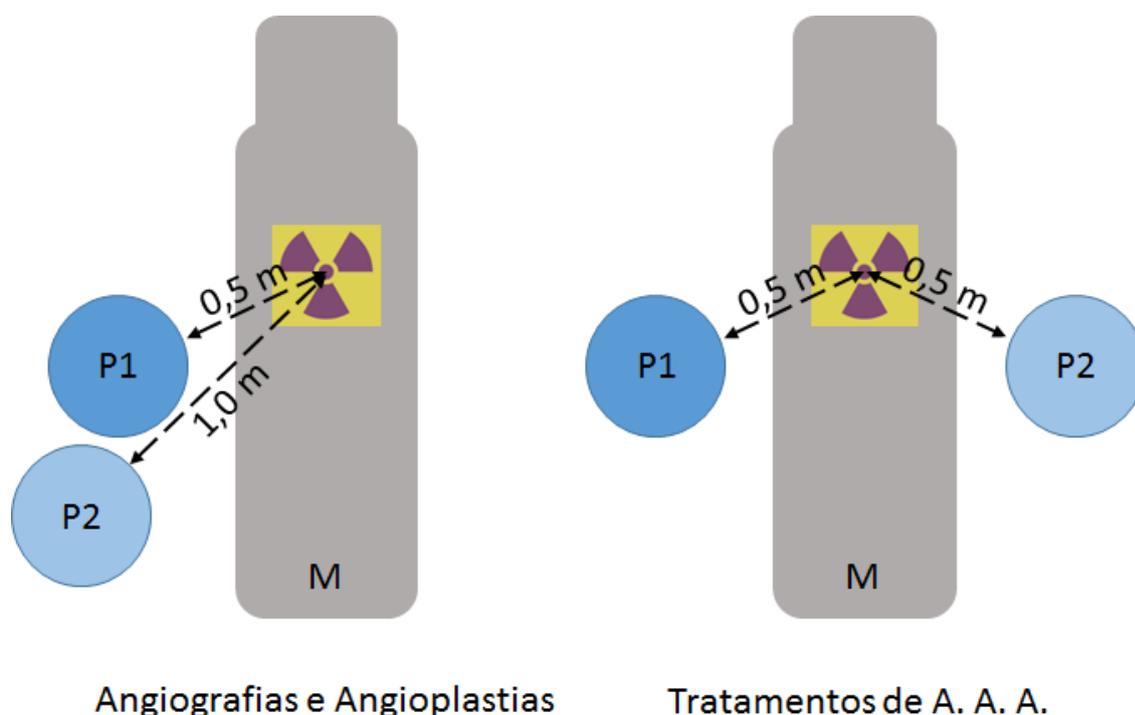


Figura 2: Ilustração do posicionamento dos profissionais na sala de exames durante os procedimentos avaliados. P1 é a posição do profissionais principal, P2 é a posição do profissional assistente, M é a representação da mesa de procedimentos e a região demarcada pelo símbolo da radiação representa a região onde há incidência do feixe primário de radiação.

4.1.2. Descrição do equipamento

Todos os procedimentos foram realizados com o equipamento LCV Plus (Advantix; General Electric Medical Systems, Milwaukee, Wis. USA), o qual estava de acordo com todos os testes de controle de qualidade exigidos legalmente (ANVISA, 1998). Saiotes de chumbo posicionados na mesa de procedimentos eram parte das proteções plumbíferas estacionárias. Esses saiotes estavam posicionados poucos centímetros abaixo da mesa e terminavam aproximadamente 30 cm do chão. O equipamento não dispunha de escudos plumbíferos de acrílico presos no teto para a proteção dos profissionais.

Angiografias e angioplastias foram realizados com o mesmo protocolo: 75 kVp, 1,9 *frames/s*, “médio” noise level, 32 cm de campo de visão, controle automático de mA.

Os procedimentos de tratamento de A. A. A. foram realizados com o mesmo protocolo: 85 kVp, 3,8 *frames/s*, “médio” noise level, 32 cm de campo de visão, controle automático de mA.

Em todos os procedimentos o sistema de imagem (tubo de raios X e detector de imagem) foi posicionado num *range* de 15° para a direita a 15° para a esquerda em relação à projeção posteroanterior, de acordo com a particularidade de cada procedimento. O equipamento não possuía medidor de produto kerma-área, portanto a dose do paciente não foi objeto de estudo deste capítulo.

4.1.3. Dosimetria dos profissionais

Dosímetros termoluminescentes (TLD) (TLD-100 – LiF: Mg, Ti Harshaw) foram utilizados para a dosimetria de todos os procedimentos. Os dosímetros foram calibrados na grandeza equivalente de dose pessoal Hx (medido em Sv), de acordo com a legislação vigente. A calibração foi realizada utilizando uma fonte de Co-60 em uma geometria 4π de exposição livre no ar, utilizando uma placa de “build up” de 3 mm de Lucite®.

Em cada procedimento avaliado os dosímetros foram posicionados no intervencionista principal (profissional que conduzia o procedimento) e em um assistente, ambos permaneceram na sala de exames durante toda duração do procedimento. Os dosímetros foram fixados nas seguintes regiões: cabeça (representando as exposições nos cristalinos, dosímetros posicionados no topo da máscara cirúrgica, alguns milímetros abaixo da linha dos olhos), pescoço (representando as exposições na tireoide), tórax, abdômen, pés e mãos (parte inferior do pulso), como representado na figura 3.

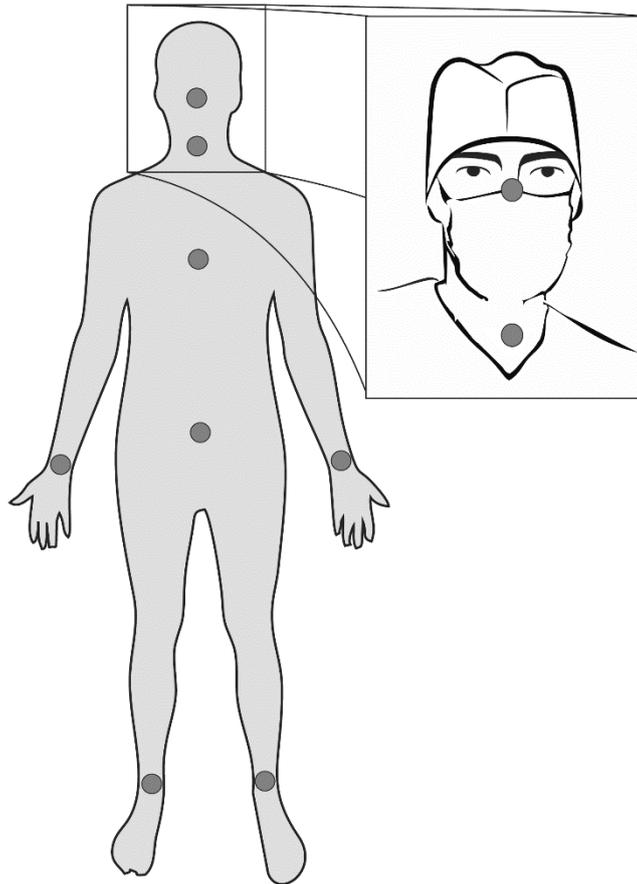


Figura 3: Demonstração da posição dos dosímetros termoluminescentes.

Os dosímetros foram posicionados acima das proteções plumbíferas como avental de chumbo e protetor de tireoide para garantir que as doses incidentes estivessem dentro dos limites de sensibilidade do TLD.

As extremidades foram monitoradas em ambas as mãos e pulsos. Foram utilizados os maiores valores de dose incidentes nessas regiões como a dose das extremidades para as análises (por exemplo, o maior valor de dose recebido nas mãos foi considerado a dose das mãos e o maior valor de dose recebido nos pés foi considerado o valor de dose recebido nos pés). Quando foi necessário um único valor de dose para todas as extremidades, o maior valor de dose entre todas as 4 regiões avaliadas foi utilizado.

Em cada região monitorada foram posicionados três TLDs para uma maior acurácia e para que seja possível descartar algum valor proveniente de erros experimentais de leitura. Cada grupo de dosímetros utilizado para as monitorações (8 conjuntos de 3 pastilhas) possuía um grupo controle (um grupo de três pastilhas) para medição da radiação de fundo. O grupo controle foi mantido o tempo todo junto aos dosímetros de monitoração, com exceção do momento das monitorações ocupacionais. Nesse momento, os dosímetros de controle eram mantidos fora das áreas controladas. Ao final das leituras, os valores de dose dos dosímetros de controle eram subtraídos dos dosímetros de monitoração dos profissionais, desconsiderando assim as exposições que não eram provenientes do procedimento. Durante todo o processo de dosimetria, mais de 4500 leituras foram realizadas.

O tempo de fluoroscopia de cada procedimento era armazenado para as análises.

4.1.4. Construção dos perfis de taxa de dose equivalente

As taxas de dose equivalente (TDEs) de cada região foram obtidas dividindo a dose equivalente incidente em determinada região em determinado procedimento pelo tempo total de fluoroscopia deste procedimento específico. As TDEs foram calculadas para todas as diferentes regiões do corpo das duas categorias de profissionais em cada uma das três modalidades de procedimentos.

4.1.5. Número máximo de procedimentos anuais

Foram determinados número máximo de procedimentos anuais (NMPA) que cada profissional pode realizar sem ultrapassar os limites de dose ocupacional vigentes, o que é similar ao realizado por Hausler et al. (Hausler et al., 2009). Os limites de dose foram divididos pelas medianas e valores máximos de doses encontrados para cada região em cada procedimento avaliado.

Os limites de doses ocupacionais utilizados foram baseados na publicação 103 da Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP) e na normativa 3.01 da Comissão Nacional de Proteção Radiológica (CNEN), que definem limites de doses anuais para diferentes regiões do corpo do profissional (CNEN, 2011, ICRP, 2007).

Para os cristalinos e exposição de corpo todo (dose efetiva) o limite de dose é 20 mSv por ano, em uma média de cinco anos consecutivos onde um único ano não pode ultrapassar 50 mSv. Para extremidades e pele o limite de dose é de 500 mSv por ano (CNEN, 2011, ICRP, 2007). Para o cálculo dos NMPA das extremidades, os limites de doses ocupacionais anuais (500 mSv) foram divididos pelas medianas e valores máximos de dose recebidos por todos os profissionais de cada categoria em cada modalidade de procedimento.

Os valores de dose incidentes nos profissionais também foram corrigidos pelos fatores de atenuação das proteções plumbíferas, definidos em guias internacionais e na literatura (Christodoulou et al., 2003, Miller et al., 2010a). Baseados nessas informações e na energia média utilizada nos procedimentos avaliados, foram considerados os seguintes fatores de atenuação: 85% para proteções equivalentes à 0,25 mm de chumbo e 95% para proteções equivalentes à 0,5 mm de chumbo. Todas as proteções utilizadas estavam de acordo com os testes de controle de qualidade e suas atenuações foram conferidas com a utilização de câmara de ionização. Para óculos plumbífero, foi considerado 60% de atenuação, como definido por Thornton *et al.* e guia internacional (Miller et al., 2010a, Thornton et al., 2010).

4.1.6. Análise estatística

As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software MINITAB 14 (Minitab, USA). Os valores medianos de dose para os intervencionistas principais foram comparados com os valores para intervencionistas assistentes através do teste Mann-Whitney. As hipóteses nulas:

“valores de dose não são diferentes nas diferentes regiões do corpo do profissional durante procedimentos de uma mesma modalidade” e “valores de dose não são diferentes na mesma região do corpo do profissional em diferentes modalidades” foram testadas utilizando o teste Kruskal-Wallis para igualdade de medianas.

4.2. Resultados

As maiores doses equivalentes foram encontradas para tratamentos de A. A. A., onde 90% das avaliações indicaram pelo menos uma região recebendo mais de 1 mSv por procedimento. Os maiores valores de dose para as mãos de ambos os profissionais nesta modalidade foi de aproximadamente 9 mSv.

A tabela 3 resume as medianas (*range* interquartil) das doses equivalentes (μSv) para cada região monitorada tanto para o intervencionista principal quanto para o assistente. Esses valores foram obtidos acima das proteções plumbíferas.

Tabela 3: Mediana (*range* interquartil) dos valores de dose equivalentes (μSv) para cristalinos, tireoide, peito, abdômen, pés e mãos em todos os procedimentos para intervecionistas principais e assistentes.

Intervencionista Principal						
	Cristalinos	Tireoide	Tórax	Abdômen	Pés	Mãos
Angiografia	18,6 (10,2-49,9)	22,5 (4,4-66,5)	21,8 (5,8-85,4)	31,8 (8,2-227,6)	52,1 (9,7-123,5)	33,1 (11,7-149,2)
Angioplastia	53,7 (14,6-126,6)	58,8 (14,2-183,1)	103,8 (13,5-224,2)	152,2 (46,0-301,2)	95,8 (28,2-205,8)	178,2 (35,4-645,8)
Tratamento de A. A. A.	364,3 (143,1-472,7)	338,4 (79,3-422,3)	292,6 (88,4-459,5)	1177,3 (178,5-2134,7)	874,7 (218,6-1285,8)	2105,3 (826,2-4679,2)
Intervencionista Assistente						
Angiografia	9,8 (1,2-57,4)	16,2 (9,1-56,7)	37,1 (14,7-85,9)	39,7 (6,8-129,2)	22,3 (13,9-90,9)	37,5 (8,5-84,3)
Angioplastia	28,0 (6,5-52,4)	35,3 (11,7-50,8)	43,8 (23,4-44,9)	44,3 (13,2-62,6)	70,6 (15,3-90,7)	33,6 (15,7-71,1)
Tratamento de A. A. A.	207,0 (101,2-383,8)	122,9 (118,5-280,8)	207,0 (73,6-407,0)	215,3 (72,0-2893,6)	790,3 (166,3-2484,7)	417,7 (210,3-5751,3)

Os tempos de fluoroscopia médios foram $6,7 \pm 4,6$ min para angiografias, $15,6 \pm 10,7$ minutos para angioplastias e $29,3 \pm 17,2$ minutos para tratamentos de A. A. A.

As TDEs para angiografias, angioplastias e tratamentos de A. A. A. para ambos os profissionais estão representadas como *boxplot* nas figuras 4 – 6. Esses perfis foram determinados para um profissional sem proteções plumbíferas. As figuras 4 – 6 apresentam das TDEs para o intervecionista principal em *boxplots* pretos e assistente em *boxplot* cinzas, para cabeça, pescoço, tórax, abdômen, pés e mãos.

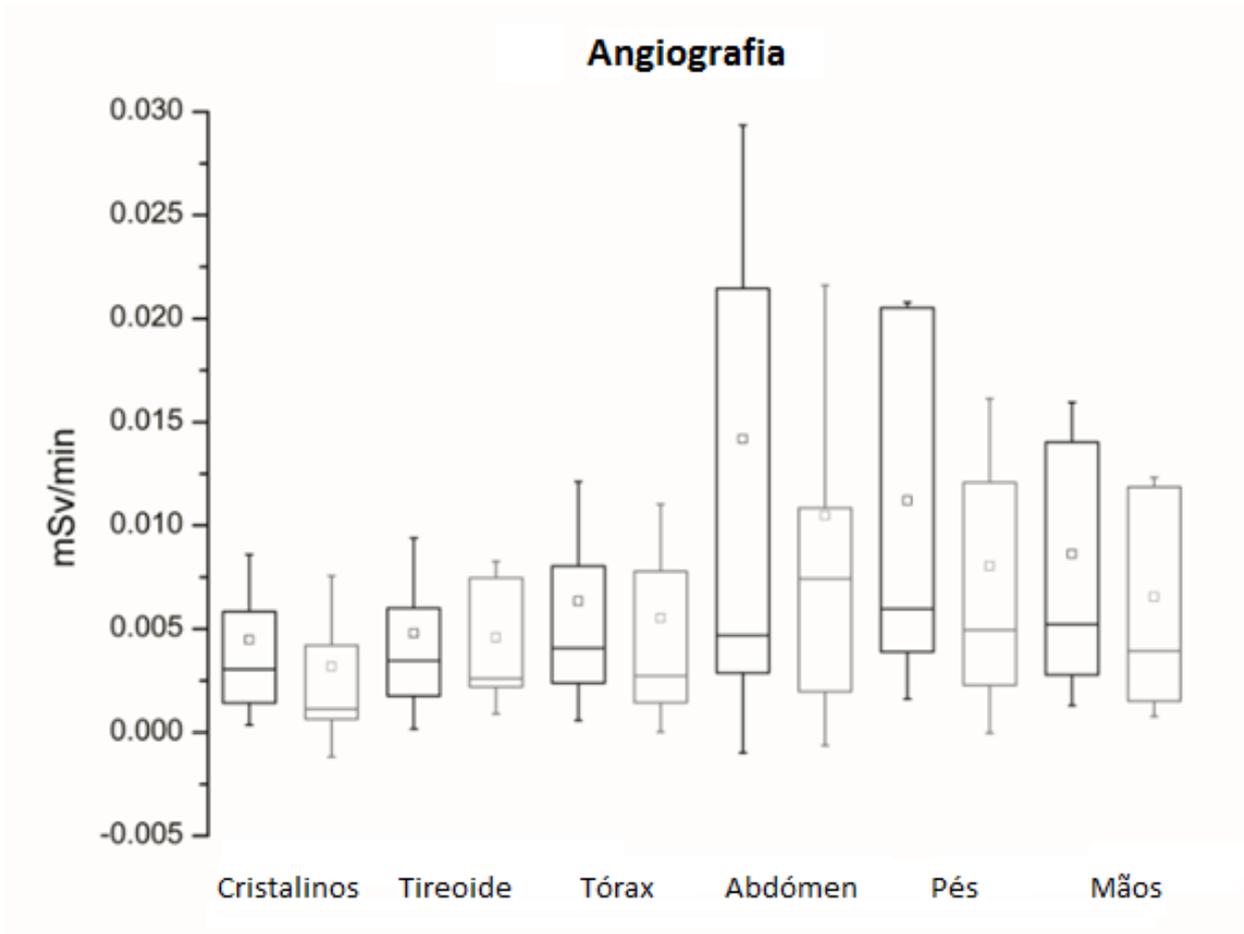


Figura 4: Taxas de dose equivalentes do intervencionista principal (*boxplots* pretos) e assistente (*boxplots* cinzas) para a cristalino, tireoide, tórax, abdómen, pés e mãos para procedimentos de angiografia. Cada *boxplot* representa os seguintes valores estatísticos: os limites inferior e superior da caixa indicam os 25º e 75º percentis; A linha horizontal sólida na caixa marca a mediana; o quadrado representa o valor médio e as barras de erro acima e abaixo da caixa representam o desvio padrão.

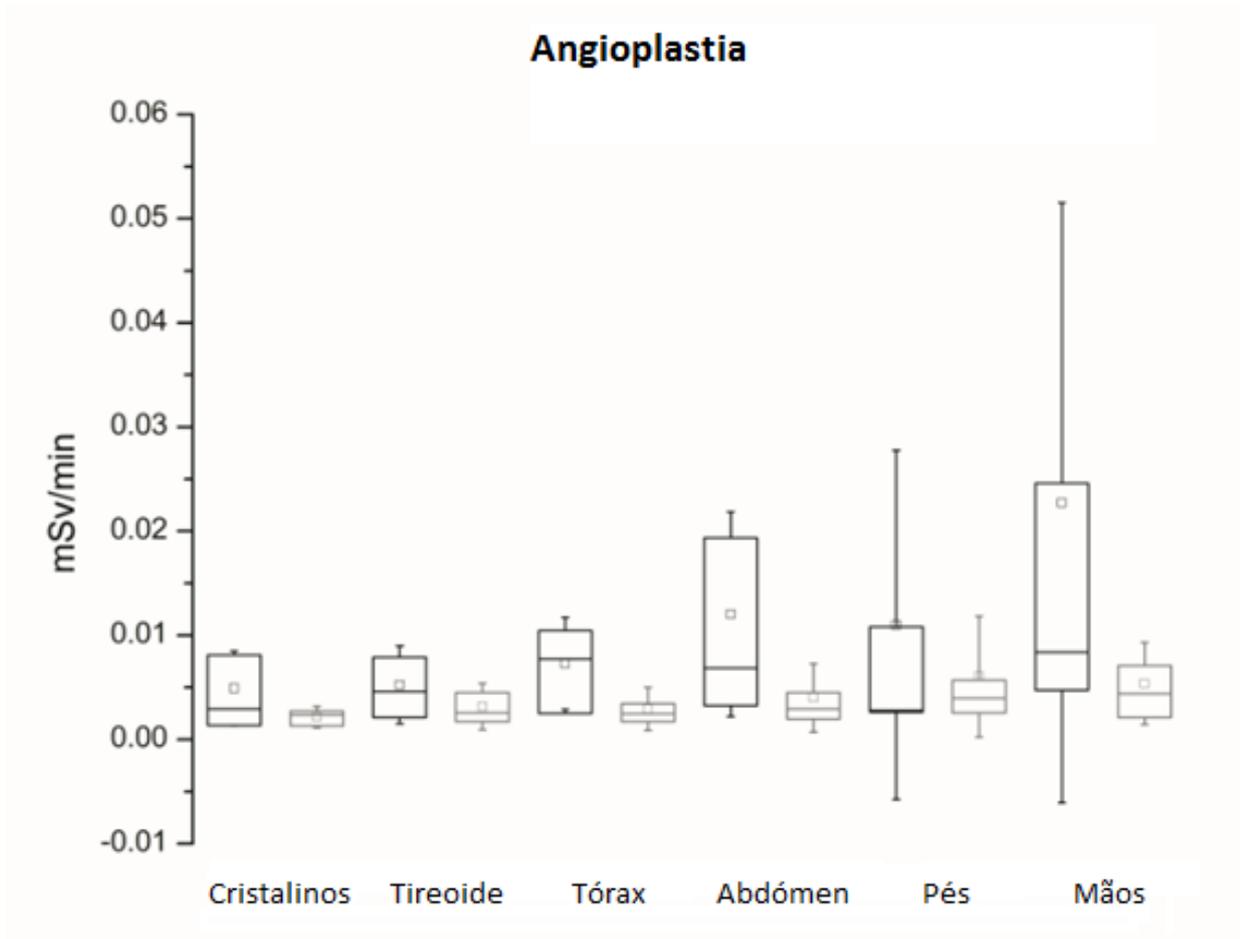


Figura 5: Taxas de dose equivalentes do intervecionista principal (*boxplots* pretos) e assistente (*boxplots* cinzas) para a cristalino, tiroide, tórax, abdómen, pés e mãos para procedimentos de angiografia. Cada *boxplot* representa os seguintes valores estatísticos: os limites inferior e superior da caixa indicam os 25º e 75º percentis; A linha horizontal sólida na caixa marca a mediana; o quadrado representa o valor médio e as barras de erro acima e abaixo da caixa representam o desvio padrão.

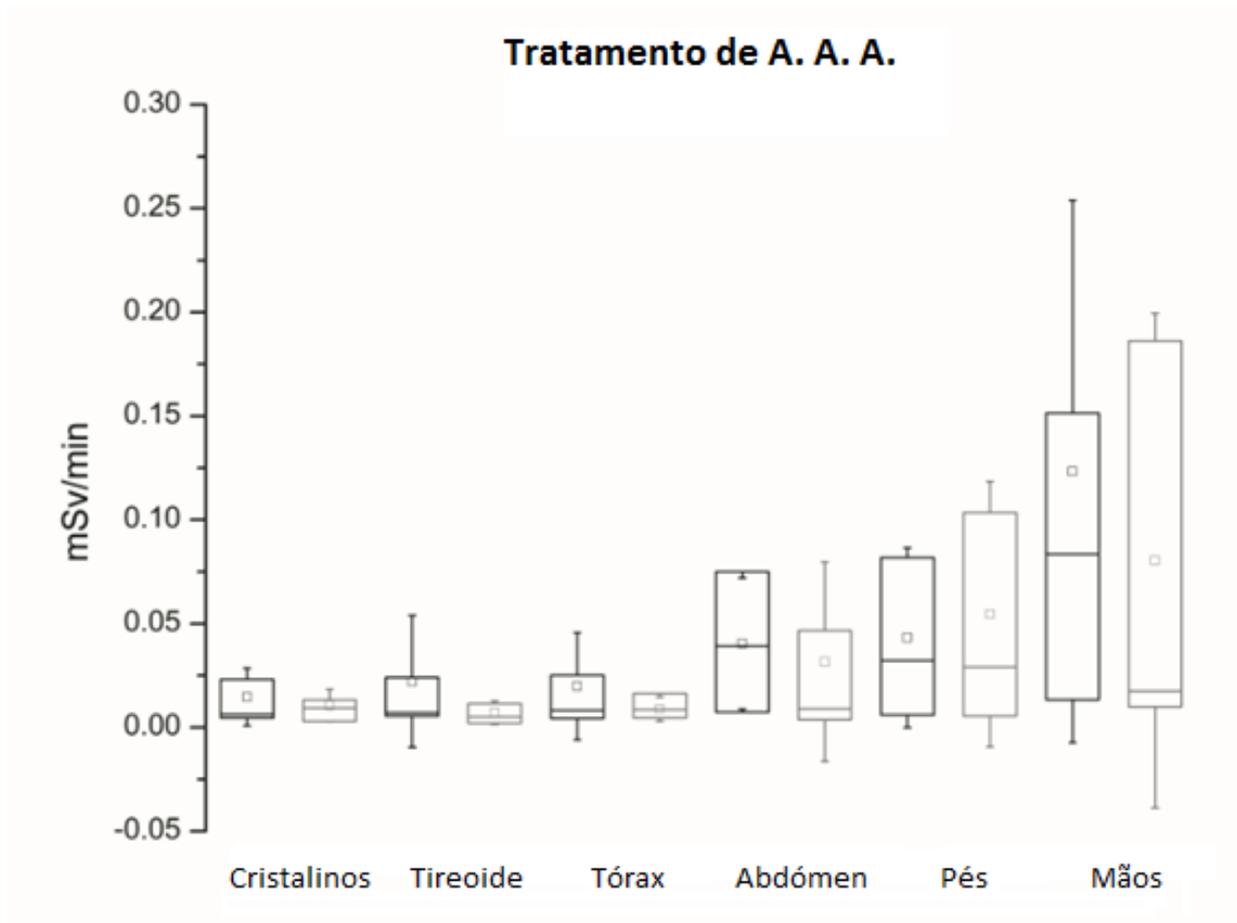


Figura 6: Taxas de dose equivalentes do intervencionista principal (*boxplots* pretos) e assistente (*boxplots* cinzas) para a cristalino, tireoide, tórax, abdómen, pés e mãos para procedimentos de tratamento de A. A. A. Cada *boxplot* representa os seguintes valores estatísticos: os limites inferior e superior da caixa indicam os 25º e 75º percentis; A linha horizontal sólida na caixa marca a mediana; o quadrado representa o valor médio e as barras de erro acima e abaixo da caixa representam o desvio padrão.

Para auxiliar na determinação de estratégias de proteção radiológica, os TDEs para diferentes regiões do corpo foram comparados estatisticamente com todos os procedimentos. A angioplastia foi a única modalidade de procedimento que apresentou TDEs medianas estatisticamente diferentes para diferentes profissionais nas seguintes regiões: cabeça ($p = 0,03$), tórax ($p = 0,03$), abdómen ($p = 0,01$) e mãos ($p = 0,03$). Para angiografia e tratamento de A. A. A. as TDEs não mostraram diferença significativa entre as mesmas regiões dos dois profissionais.

As TDEs para diferentes regiões dos intervencionistas principais e assistentes foram analisados para cada tipo específico de procedimentos. A hipótese nula de que a dose mediana não seria diferente para diferentes regiões do corpo no mesmo procedimento foi descartada para o tratamento de A. A. A. para os intervencionistas principais e assistentes ($p = 0,05$).

As TDEs para cada região do corpo foram obtidos para todos os procedimentos, o que nos permitiu comparar as TDEs para regiões específicas em diferentes procedimentos para intervencionistas primários e assistentes. A hipótese nula de que a dose mediana não diferiria entre as mesmas regiões do corpo em diferentes procedimentos foi descartada para pés ($p = 0,04$) e mãos ($p = 0,02$) para os intervencionistas primários. Para os assistentes, a hipótese nula foi descartada para cabeça ($p = 0,01$), pés ($p = 0,03$) e mãos ($p = 0,01$).

Estimamos os NMPAs que cada intervencionista pode realizar sem atingir os limites anuais de dose efetiva (dose no tórax) e dose equivalente (extremidades e cristalino) para intervencionistas principais e assistentes. Foram consideradas duas situações para a dose efetiva: uma pessoa usando um avental de chumbo de blindagem de 0,25 mm e uma pessoa usando um avental de chumbo de blindagem de 0,50 mm. Foi realizado um cálculo semelhante para os cristalinos, com a exceção de que, neste caso, o fator de atenuação foi de 60%, devido à utilização de óculos plumbíferos. Para as extremidades, consideramos apenas pessoas não blindadas, uma vez que o uso de proteção nessas regiões não é comum. A Tabela 4 resume o NMPA para doses efetivas, e a Tabela 5 mostra as doses equivalentes. NMPA superiores a 2.500 foram considerados "ilimitados", porque mais de 10 procedimentos diários ultrapassam a rotina de trabalho para um profissional padrão.

Tabela 4: Número de procedimentos anuais que cada profissional pode realizar sem exceder os limites de dose efetiva anuais (medidos no tórax). Os resultados foram baseados nos valores de mediana e dose máxima com blindagem de chumbo de 0,25 e 0,5mm.

Intervencionista Principal				
Proteção	0,25 mm Pb		0,50 mm Pb	
Dose no tórax	Mediana	Máximo	Mediana	Máximo
Angiografia	Ilimitado	1560	Ilimitado	Ilimitado
Angioplastia	1290	600	Ilimitado	1780
Tratamento de A. A. A.	460	290	1370	870
Intervencionista Assistente				
Angiografia	Ilimitado	1550	Ilimitado	Ilimitado
Angioplastia	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado
Tratamento de A. A. A.	640	330	1930	980

Tabela 5: Número de procedimentos anuais que cada profissional pode realizar sem exceder os limites de dose equivalente anuais. Os resultados foram baseados nos valores de mediana e dose máxima e um fator de atenuação de 60% para o óculos plumbífero. Para as extremidades não consideramos fatores de atenuação porque não é usual blindagens nessas regiões.

Intervencionista Principal						
Proteção	Cristalinos				Extremidades	
	Nenhuma		Óculos plumbífero		Nenhuma	
	Mediana	Máximo	Mediana	Máximo	Mediana	Máximo
Angiografia	1080	400	Ilimitado	1000	Ilimitado	Ilimitado
Angioplastia	370	160	930	390	Ilimitado	770
Tratamento de A. A. A.	60	40	140	110	500	100
Intervencionista Assistente						
Angiografia	2040	358	Ilimitado	870	Ilimitado	Ilimitado
Angioplastia	720	380	1790	950	Ilimitado	Ilimitado
Tratamento de A. A. A.	100	50	240	130	640	90

4.3. Discussão

Foram avaliados os perfis de TDE da equipe médica para diferentes procedimentos de RI. Também avaliamos o número máximo de procedimentos que cada profissional poderia realizar, sem exceder os limites de dose anual em diferentes configurações de proteções plumbíferas.

Encontramos a TDE mediana para cristalinos do intervencionista principal para tratamento de A. A. A. (0,01 mSv/min) consistente com aqueles encontrados por Vano *et al.* (Vano et al., 2008), empregando metodologias com fantomas para o mesmo equipamento de fluoroscopia. Doses medidas nas pernas dos intervencionistas por Efstathopoulos *et al.* (Efstathopoulos et al., 2011) durante angiografias de membros inferiores foram consideravelmente próximas de nossas medidas para os pés (cerca de 20 μ Sv para assistentes e 50 μ Sv para intervencionistas primários). No entanto, mesmo as menores medianas de cristalinos encontradas em nosso estudo (9,8 μ Sv) foram maiores do que os dados mostrados por Hausler *et al.* (Hausler et al., 2009) (2,4 μ Sv), o que era um resultado esperado, uma vez que no equipamento utilizado o estudo de Hausler *et al.* estava disponível o escudo de acrílico plumbífero suspenso do teto. Os valores de NMPA para dose máxima no tórax, para um profissional utilizando proteções plumbíferas (0,25 mm Pb) em Angiografias e Angioplastias (em torno de 1560 e 600, respectivamente) foram maiores do que os valores encontrados por Hausler *et al.* (Hausler et al., 2009) (cerca de 500 e 270, respectivamente). Durante procedimentos de tratamento de A. A. A. as doses medianas encontradas para cristalinos estão de acordo com as encontradas por Vano *et al.* (Vano et al., 1998) (cerca de 300-400 μ Sv). Desta maneira, nossos resultados se mostram semelhantes em alguns casos a outros apresentados na literatura.

Procedimentos mais longos podem resultar em maior exposição para a equipe intervencionista quando comparado com os mais curtos. Portanto, empregamos taxa de dose

para melhor descrever as condições de exposição para diferentes procedimentos e desconsiderando assim a influência do tempo de exposição.

Os perfis de TDEs demonstraram que as regiões inferiores do corpo (abdómen e pés) e mãos apresentavam valores mais elevados de dose. Isto ocorre devido ao posicionamento do tubo de raios X (abaixo da mesa de procedimentos). Valores elevados de dose para o abdómen e para os pés indicam que os saíotes de chumbo abaixo da mesa não estavam corretamente posicionadas para proteger totalmente estas regiões. A manipulação extensiva de instrumentos durante a aquisição de imagens provoca altos níveis de exposição das mãos. Em angiografias, devido à menor manipulação de instrumentos durante a aquisição de imagens, as mãos apresentaram menor TDEs em relação a outras regiões do corpo e ambos os intervecionistas permanecem em situações semelhantes.

Encontramos diferenças significativas na dose entre os intervecionistas principais e assistentes para angioplastia. Cristalinos, tórax, abdômen e mãos dos assistentes resultou em TDEs significativamente menores em comparação com os intervecionistas principais nestes procedimentos. Essa diferença ocorre principalmente devido ao posicionamento dos profissionais durante a aquisição de imagem (conforme descrito na seção de métodos "4.1.1. Seleção dos procedimentos"). Nesta modalidade, durante a aquisição das imagens o intervecionista principal manipula diversos instrumentos, fazendo com que ele necessariamente fique mais próximo do paciente do que o intervecionista assistente. Como não há uma extensa manipulação de instrumentos durante a aquisição de imagens em angiografias, assumimos que essa era a razão pela qual essa diferença não foi encontrada nesta modalidade de procedimento.

Durante os tratamentos de A. A. A., os níveis de dose recebidos por ambos os profissionais não foram significativamente diferentes, provavelmente porque os profissionais estão posicionados em lados opostos da mesa durante todo o procedimento, em posições equidistantes do tubo de raios X, fazendo com que recebam níveis de dose semelhantes.

Para os intervencionistas principais e assistentes, a hipótese nula de que os níveis de dose não difeririam entre as diferentes regiões do corpo no mesmo tipo de procedimento foi descartada para tratamento de A. A. A. Estes resultados sugerem a necessidade de mais de um dosímetro para medir com precisão as doses recebidas por esses profissionais nessas circunstâncias.

A hipótese nula de que os níveis de dose não difeririam entre as mesmas regiões do corpo em diferentes tipos de procedimentos, foi descartada para pés e mãos para os intervencionistas primários. Para os assistentes, esta hipótese foi descartada para cristalinos, pés e mãos.

Os tratamentos de A. A. A. são uma modalidade que resulta em doses mais elevadas para os cristalinos e extremidades. O NMPA para essas regiões foi consideravelmente próximo do número de procedimentos realizados em nossa instituição anualmente. Considerando que alguns profissionais são sempre parte da equipe de intervenção para estes procedimentos, eles podem estar perigosamente perto dos limites de dose de exposição para a cristalinos, o que não seria indicado por um dosímetro de tórax.

Nossos dosímetros foram calibrados usando Hx como descrito em "4.1.3. Dosimetria de profissionais". De acordo com H. Stadtmann e C. Hranitzky, as doses medidas usando Hx são uma boa estimativa para as doses medidas usando Hp (0,07), para a faixa de energia do radiodiagnóstico. Para comparação dos nossos resultados com as medidas realizadas em Hp (10)

possíveis diferenças podem surgir devido às incertezas das estimativas de Hp (10) em energias baixas (Stadtmann and Hranitzky, 2008b, Stadtmann and Hranitzky, 2008a).

Há algumas limitações neste estudo. O equipamento utilizado neste estudo não tem um medidor PKA. Portanto, não foi possível correlacionar as doses dos pacientes e dos profissionais. Apesar de apresentar uma descrição das doses de radiação ocupacional em uma única instituição, diferenciamos a exposição pela categoria do intervencionista em cada procedimento, o que é um aspecto importante a ser considerado. No que se refere ao desenho experimental, uma diferença que pode ser observada neste estudo em comparação com outros é a posição dos dosímetros dos cristalinos. Colocamos os dosímetros dos olhos no topo da máscara cirúrgica, entre os olhos do profissional. Vários estudos têm mostrado diferenças entre as doses de olho esquerdo e direito. No entanto, nossos resultados concordam com os valores apresentados na literatura (Vano et al., 2008, Vano et al., 1998).

4.4. Conclusão

Os níveis de dose medidos neste capítulo indicam que os profissionais, que estão adequadamente protegidos, em uma rotina normal, provavelmente não excedem os limites de dose anuais. No entanto, em algumas regiões específicas e para alguns procedimentos específicos, o número máximo de procedimentos anuais é bastante próximo do número de procedimentos que são efetivamente realizados. Nossa análise mostrou que os dosímetros individuais, posicionados no tórax, podem subestimar as doses para outras regiões do corpo, especialmente abdômen, extremidades e cristalinos. Portanto, recomenda-se fortemente uma estratégia envolvendo rotação dos profissionais, dosímetros adicionais (especialmente para as extremidades) e blindagem estacionária adicional para os cristalinos.

Os resultados deste capítulo também indicam que os dosímetros colocados no abdômen, ao invés do tórax, podem representar mais precisamente as doses efetivas recebidas pela equipe médica. Para uma dosimetria profissional mais precisa, podemos sugerir o uso de dois dosímetros, um dentro das proteções plumbíferas na altura do abdômen e outro fora delas na altura do tórax ou pescoço.

Esta metodologia pode ser aplicada a qualquer departamento de RI e fornece informações extremamente importantes para determinar estratégias de proteção radiológica.

Capítulo 5: Avaliação da dosimetria pessoal

O capítulo anterior evidenciou a dificuldade na padronização das exposições ocupacionais na RI, bem como a grande variação possível nas exposições dentro de uma mesma modalidade de procedimentos. Diversas regiões do corpo dos profissionais apresentam níveis de dose diferentes, portanto, medir as doses efetivas desses indivíduos com precisão durante a rotina clínica se torna mais complexo do que nas demais áreas do radiodiagnóstico. Internacionalmente diversos métodos são empregados para estimar a dose efetiva dos profissionais em RI.

O objetivo deste estudo foi avaliar a eficiência de 6 métodos empregados nacionalmente e internacionalmente para estimar a E dos profissionais de RI vascular.

Como fruto deste capítulo temo o artigo “Efficiency of personal dosimetry methods in vascular interventionist radiology” já finalizado que será submetido também à revista *Physica Medica: European Journal of Medical Physics*.

5.1. Metodologia

A metodologia deste capítulo foi realizada em três etapas principais, conforme apresentado na figura 7. O primeiro passo foi construir um banco de dados de dosimetria na prática clínica. Foram monitoradas doses equivalentes incidentes na cabeça, pescoço, tórax, abdômen, pés e mãos de 7 profissionais, que conduziram 50 procedimentos de RI vascular, conforme descrito na seção “5.1.1. Dosimetria dos profissionais na prática clínica”.

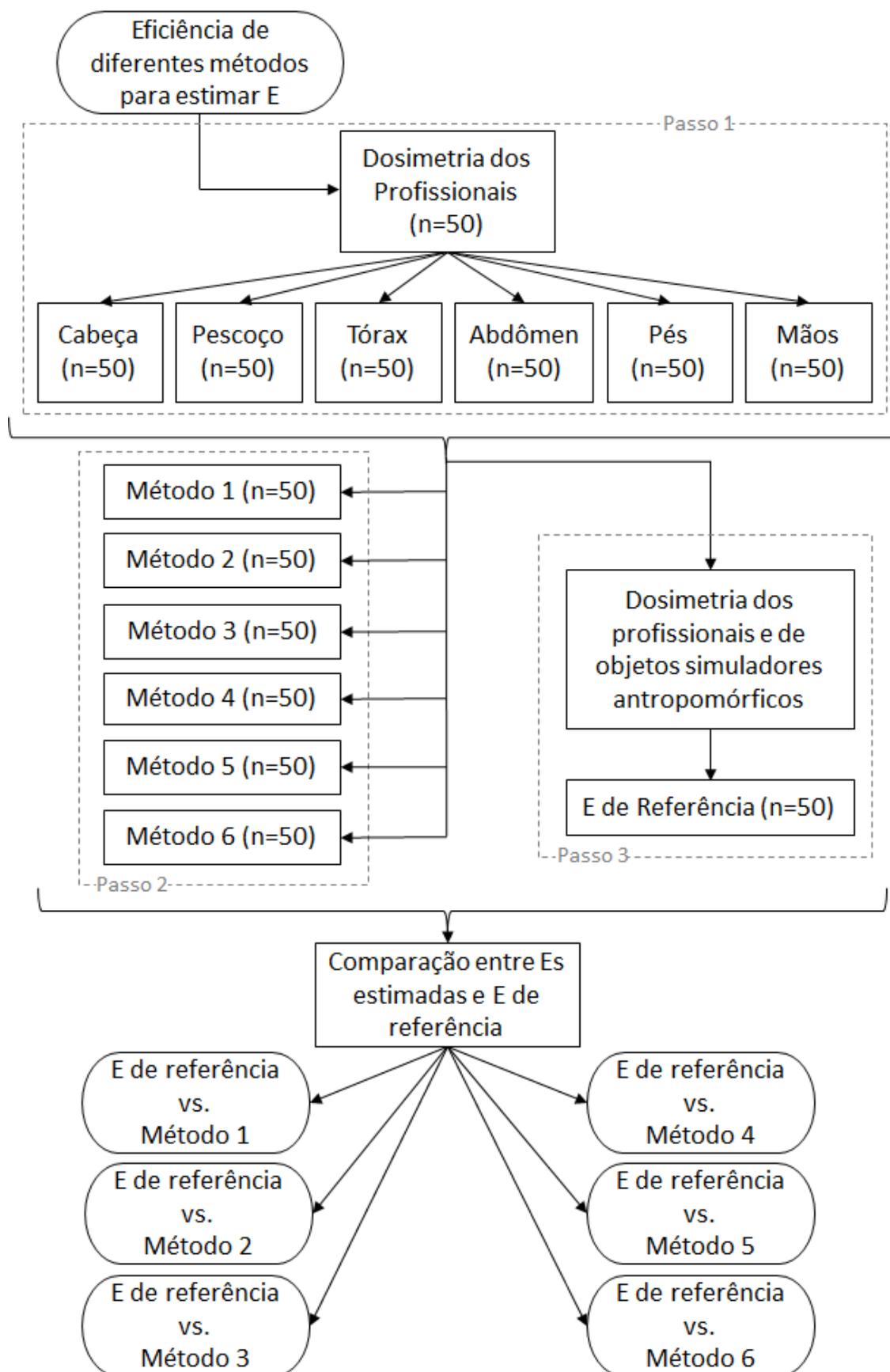


Figura 7: Fluxograma que resume as 3 etapas executadas, descritas na seção “metodologia”.

Utilizando o monitoramento dos profissionais do passo 1, o segundo passo foi estimar os valores de E dos profissionais de acordo com os 6 métodos comumente usados internacionalmente, conforme descrito na seção “5.1.2. Metodologias utilizadas para estimar a dose efetiva dos profissionais”.

Para avaliar a eficiência dos 6 métodos utilizados para estimar a E dos profissionais um valor mais preciso de E foi necessário para ser usado como referência. Portanto, o terceiro passo foi determinar uma avaliação mais abrangente da E dos profissionais para cada procedimento avaliado para comparação com as Es obtidas de acordo com métodos internacionalmente utilizados. Para tanto, foram calculados fatores de correlação (FCs) entre doses equivalentes na superfície dos profissionais (obtidas durante a prática clínica - Passo 1) e doses nos 24 órgãos ou tecidos internos listados pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP) para medições de E (ICRP, 2007). Essas correlações dosimétricas foram obtidas utilizando um fantoma antropomórfico e um fantoma simulador do paciente em uma simulação de procedimento. Após a aplicação dos FCs nas doses externas dos profissionais monitorados no passo 1, obteve-se a E dos profissionais para cada procedimento (E de referência), conforme descrito na seção “5.1.3. Doses efetivas de referência e fatores de correlação entre doses externas e internas”.

As Es estimadas obtidas no passo 2 utilizando os 6 métodos avaliados foram comparadas com as Es de referência obtidas no passo 3. Portanto, a eficiência destes métodos foi avaliada em comparação com a E de referência para cada procedimento monitorado.

Essas etapas foram aplicadas em 50 procedimentos realizados no Hospital das clínicas de Botucatu, Botucatu, Brasil. Os procedimentos foram realizados utilizando um equipamento LCV Plus (Advantx General Electric Medical Systems, Milwaukee, Wisconsin, EUA). O equipamento estava de acordo com todas as avaliações padrão de controle de qualidade. Como blindagem

estacionária, saiotos de chumbo estavam posicionados abaixo da mesa do paciente. Proteção de acrílico plumbífero suspensa no teto e dispositivo para medição de produto kerma-área (PKA), grandeza relacionada à dose no paciente, não faziam parte do equipamento utilizado, como descrito na seção “4.1.2. Descrição do equipamento” no capítulo 1.

5.1.1. Dosimetria dos profissionais na prática clínica

Para a dosimetria dos profissionais, foram monitorados os médicos principais que conduziram procedimentos de RI vasculares. As doses incidentes em diferentes regiões do corpo do profissional, durante cada procedimento, foram monitoradas. Ao todo, sete profissionais que conduziram 50 procedimentos foram monitorados. Em todos os procedimentos, o profissional monitorado permaneceu aproximadamente 0,5 metro da região imageada do paciente. Como descrito na sessão “4.1.1. Seleção dos procedimentos” do capítulo 1.

A monitoração dos profissionais também se deu inteiramente como descrito na sessão “4.1.3. Dosimetria dos profissionais” do capítulo 1, com exceção de que neste capítulo apenas os profissionais principais foram monitorados. Portanto, as regiões monitoradas foram: cabeça, pescoço, tórax, abdômen, pés e mãos.

As modalidades de procedimentos monitoradas foram angiografias de membros inferiores e abdominais (20), angioplastia transluminal percutânea de membros inferiores e abdominal (15) e aneurisma de aorta abdominal com fixação de endopróteses (15). Estes procedimentos foram realizados com uma faixa entre 75 e 85 kVp, controle automático de mA, 1,9 a 3,8 quadros/s, nível de ruído "médio" e campo de visão de 32 cm.

5.1.2. Metodologias utilizadas para estimar a dose efetiva dos profissionais

Após a etapa de dosimetria dos profissionais, foram utilizadas doses na superfície das regiões corporais dos profissionais (obtidas no passo 1) para estimar a E com base em regulamentações de diferentes países. Estas estimativas foram realizadas para cada profissional monitorado e comparadas com a E de referência.

No Brasil, a regulamentação exige que a E seja medida com um dosímetro posicionado na altura mais exposta do tronco do profissional, fora dos aventais de proteção. A dose indicada nestes dosímetros deve ser corrigida por um fator de 0,1, de acordo com esta normativa (ANVISA, 1998). Esse fator de transmissão (0,1) é um valor conservador adotado para a eficiência dos aventais protetores.

Normalmente o dosímetro é utilizado na altura do tórax, sem avaliação prévia da região mais exposta. Os dois primeiros métodos adotados para estimar a E e comparar com a E de referência foram baseados na legislação brasileira:

- Doses do tórax fora dos aventais de proteção, corrigidas pelo fator 0,1 (Método 1);
- Doses no abdômen fora dos aventais de proteção, corrigidas pelo fator 0,1 (Método 2).

Nos Estados Unidos, o National Council on Radiological Protection (NCRP) recomenda a combinação de valores de leitura do dosímetro de pescoço, fora dos aventais protetores (indicando doses para a cabeça desprotegida) e a leitura de dosímetros de abdômen (altura da cintura), usando a equação 4 (NCRP, 1995, Miller et al., 2010a):

$$ENCRP \text{ (estimada)} = 0.5 H_{\text{DENTRO}} + 0.025 H_{\text{FORA}} \quad (4)$$

A fórmula acima foi utilizada para estimar as Es para cada procedimento monitorado, com mais dois métodos baseados na legislação da Norte-americana:

- Doses no pescoço acima das proteções para H_{FORA} e doses no tórax abaixo das proteções para H_{DENTRO} (Método 3);

- Doses no pescoço acima das proteções para H_{FORA} e doses no abdômen abaixo das proteções para o H_{DENTRO} (Método 4).

Para as regiões abaixo das proteções plumbíferas as doses foram obtida usando a dose de externas às proteções multiplicada por um fator de transmissão de 0,05, conforme apresentado na literatura (Christodoulou et al., 2003). Este valor de transmissão foi confirmado por medições experimentais.

Na Europa, o uso de um dosímetro no tórax, dentro do avental de proteção, foi previamente considerado como uma boa estimativa da E do operador de acordo com Miller *et al.* (Miller et al., 2010a).

Embora um único dosímetro sob o avental de proteção não forneça nenhuma informação sobre as regiões desprotegidas, estimativas das Es dos profissionais foram realizadas usando mais dois outros métodos:

- Doses no tórax corrigidas pelo fator de atenuação de 0,05 (Método 5);

- Doses no abdômen corrigidas pelo fator de atenuação de 0,05 (Método 6).

As eficiências das Es estimadas de acordo com estes 6 métodos citados anteriormente nesta seção foram avaliadas comparando procedimento a procedimento com as Es de referência calculadas da maneira descrita na seção “5.1.3. Doses efetivas de referência e fatores de correlação ente doses externas e internas” apresentada abaixo.

5.1.3. Doses efetivas de referência e fatores de correlação ente doses externas e internas

Para uma medição mais precisa das Es dos profissionais monitorados a ser utilizada como referência, fatores de correlação (FCs) foram calculados entre doses externas (na superfície do corpo) e doses de órgãos ou tecidos internos. As Es calculadas neste passo foram utilizadas como referência para comparações com as Es estimadas no passo 2.

Utilizou-se um fantoma equivalente ao paciente que consistia de um paralelepípedo de dimensões 30 x 30 x 30 cm³ de acrílico para simular a absorção e dispersão da radiação pelo paciente durante os procedimentos (AAPM, 1982). Um fantoma antropomórfico Alderson RANDO (modelo ART-200, RDS Phantoms, Califórnia, EUA) foi colocado na posição típica do profissionais na sala de procedimentos (aproximadamente 0,5 m do fantoma equivalente ao paciente) para simular uma incidência de radiação espalhada semelhante à que atinge o corpo do intervencionista. O Alderson RANDO representa um homem de 175 cm de altura, 73,5 kg. Os dispositivos de proteção radiológica foram mantidos semelhantes às condições clínicas, com exceção óculos plumbíferos (o avental de chumbo e o protetor de tireoide foram posicionados no fantoma antropomórfico).

Conjuntos de TLDs com 3 dosímetros foram posicionados dentro do fantoma antropomórfico na posição dos principais órgãos ou tecidos listados pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP) (ICRP, 2007) para a medição da E, conforme listado na Tabela 6. As colunas da tabela mostram, respectivamente, a posição dosímetro externo, o número de dosímetros em cada posição externa, a posição dos dosímetros internos e o número de dosímetros em cada posição interna monitorada. A medula óssea foi monitorada em algumas posições que representa a maior concentração deste tecido em um corpo humano adulto (Cristy, 1981).

Tabela 6: Posição e número de dosímetros no fantoma antropomórfico.

Dosímetros externos	Número de dosímetros	Órgão ou tecido interno monitorado	Número de dosímetros
Cabeça	3	Mucosa oral	3
		Cérebro	3
		Glândulas salivares (lado direito e esquerdo)	6
Pescoço	3	Tireoide	3
Tórax	3	Esôfago (região superior do tórax)	3
		Esôfago (região central do tórax)	3
		Mama (direita e esquerda)	6
		Pulmão (região superior do tórax, lado direito e esquerdo)	6
		Pulmão (região central do tórax, lado direito e esquerdo)	6
		Pulmão (região inferior do tórax, lado direito e esquerdo)	6
		Coração	3
		Medula óssea (coluna torácica)	3
		Medula óssea (costelas, lado direito e esquerdo)	6
		Medula óssea (esterno)	3
		Timo	3
		Região Extratorácica	3
		Abdômen	3
Baço	3		
Fígado	3		
Pâncreas	3		
Intestino delgado	3		
Rins/glândulas suprarrenais (lado direito e esquerdo)	6		
Vesícula biliar	3		
Medula óssea (crista ilíaca direita e esquerda)	6		
Gônadas (ovário direito e esquerdo)	6		
Bexiga	3		
Útero	3		
Próstata	3		
Gônadas (testículos)	3		
Medula óssea (cabeça femoral direita e esquerda)	6		
Cólon	3		

As doses de pele foram estimadas usando a média das doses na superfície da cabeça, pescoço, peito, abdômen, mãos e pés, abaixo das proteções nas regiões que estas estavam presentes. Quando uma estrutura listada pela ICRP foi monitorada em diferentes regiões do fantoma antropomórfico, a dose média foi utilizada para o cálculo de E. Os órgãos bilaterais foram monitorados em ambos os lados. A superfície óssea corresponde apenas a 1% da E e, portanto, não foi monitorizada.

Conjuntos de TLDs também foram posicionados na superfície do fantoma antropomórfico nas mesmas regiões que foram posicionados no tórax, abdômen, pescoço e cabeça dos profissionais, acima das proteções radiológicas. Foram também utilizados dosímetros para medição da radiação de fundo e as suas leituras foram subtraídas de todas as doses medidas.

Os FCs foram determinados dividindo as doses externas pelas doses de órgãos internos de interesse de cada região (por exemplo: dose incidente em cada órgão dentro do tórax dividido pela dose incidente no tórax, dose incidente em cada órgão dentro do abdômen dividido por dose incidente no abdômen e assim por diante para cabeça e pescoço). Algumas estruturas internas listadas pela ICRP estavam presentes em mais de uma região, por exemplo medula óssea, portanto, essas estruturas têm um FC para cada região.

Estes procedimentos acima descritos foram repetidos para 75 e 85 kVp, três vezes para cada valor de kVp. Os demais parâmetros permaneceram os mesmos: controle automático de mA, 1,9 a 3,8 quadros/s, nível de ruído "médio" e campo de visão de 32 cm.

Os FCs foram aplicados nas doses externas dos profissionais monitoradas no passo 1 e foram obtidas doses absorvidas para os 24 órgãos ou tecidos internos listados pela ICRP para cada profissional monitorado em cada procedimento. As Es de referência foram calculadas para cada procedimento como a soma das doses absorvidas pelo órgão ou tecidos internos, multiplicado

por fatores de ponderação de cada tecido de acordo com a ICRP (ICRP, 2007) e a equação 3 da sessão “2.2.3. Dose efetiva” dos fundamentos teóricos.

5.1.4. Análises estatísticas

A análise estatística foi realizada utilizando o software MINITAB 14 (Minitab, EUA). Os valores médios de FCs obtidos para cada estrutura para 75 e 85 kVp foram comparados utilizando o teste de Wilcoxon e gráfico de regressão linear. As estimativas obtidas utilizando os Métodos 1 a 6 foram comparadas com a E de referência através do gráfico de Bland Altman para as médias da diferença (Bland and Altman, 1999). A diferença (%) refere-se ao E obtido com os métodos testados menos a E de referência dividida pela E de referência. Estas diferenças foram calculadas para cada procedimento monitorizado.

5.2. Resultados

Foram monitoradas as doses incidentes na cabeça, pescoço, tórax, abdômen, pés e mãos de sete profissionais que realizaram 50 procedimentos de RI vascular. A média e o desvio padrão (DP) do tempo de fluoroscopia foi de 13,2 ±10,3 min. As doses nas partes do corpo dos profissionais monitoradas na prática clínica estão resumidas na Tabela 7.

Tabela 7: Doses equivalentes nas regiões monitoradas na prática clínica. Média, DP, mediana e *range* interquartil (RI_n) de doses equivalentes em todas as regiões monitoradas.

	Média ±SD (μSv)	Mediana (RI _n) (μSv)
Cabeça	70,7 ±101,7	39,4 (10,3 – 79,9)
Pescoço	71,7 ±93,9	44,3 (11,5 – 87,4)
Tórax	82,9 ±114,6	42,0 (13,5 – 95,8)
Abdômen	151,3 ±248,8	58,3 (14,7 – 176,2)
Pés	219,1 ±438,4	67,9 (16,8 – 166,0)
Mãos	340,0 ±936,0	59,7 (19,7 – 175,8)

As maiores doses equivalentes foram encontradas para as mãos (média de $340,0 \pm 936,0$ μSv), atingindo valores máximos superiores a $5700 \mu\text{Sv}$. A cabeça foi a região com as doses mais baixas (média de $70,7 \pm 101,7 \mu\text{Sv}$).

Os FCs para cada energia (75 e 85 kVp), a média dos CFs e o desvios padrão estão resumidos na Tabela 8. Estes fatores foram comparados estatisticamente usando o teste de Wilcoxon e nenhuma diferença estatística foi encontrada ($p = 0,07$).

Tabela 8: FCs para 75 kVp e 85 kVp, FCs médios e DP dos FCs para cada tecido ou órgão.

Dosímetros externos	Órgão e tecidos monitorados	75 kVp FCs	85 kVp FCs	FCs médio \pm DP
Cabeça	Mucosa oral	0,24	0,28	$0,26 \pm 0,029$
	Cérebro	0,17	0,14	$0,15 \pm 0,022$
	Glândulas salivares	0,23	0,26	$0,25 \pm 0,022$
Pescoço*	Tireoide	0,032	0,028	$0,030 \pm 0,0032$
Tórax*	Esôfago	0,013	0,015	$0,014 \pm 0,0017$
	Mama	0,049	0,050	$0,049 \pm 0,00054$
	Pulmão	0,021	0,020	$0,020 \pm 0,00070$
	Coração	0,021	0,020	$0,021 \pm 0,0010$
	Medula óssea (coluna torácica)	0,014	0,013	$0,013 \pm 0,0011$
	Medula óssea (costelas)	0,034	0,031	$0,032 \pm 0,0021$
	Medula óssea (esterno)	0,035	0,035	$0,035 \pm 0,000012$
	Timo	0,033	0,032	$0,032 \pm 0,00046$
	Região Extratorácica	0,050	0,049	$0,049 \pm 0,00044$
Abdômen*	Estômago	0,035	0,036	$0,036 \pm 0,00052$
	Baço	0,017	0,017	$0,017 \pm 0,00021$
	Fígado	0,020	0,022	$0,021 \pm 0,0011$
	Pâncreas	0,012	0,012	$0,012 \pm 0,00021$
	Intestino delgado	0,033	0,036	$0,035 \pm 0,0018$
	Rins/suprarrenais	0,011	0,012	$0,011 \pm 0,0010$
	Vesícula biliar	0,023	0,027	$0,025 \pm 0,0028$
	Gônadas (ovários)	0,020	0,025	$0,023 \pm 0,0033$
	Bexiga	0,015	0,018	$0,016 \pm 0,0019$
	Útero	0,014	0,016	$0,015 \pm 0,0019$
	Próstata	0,010	0,010	$0,010 \pm 0,000015$
		Gônadas (testículos)	0,046	0,049

*Dosímetros externos posicionados acima das proteção radiológicas.

A Figura 8 mostra a regressão linear dos valores dos FCs para 75 e 85 kVp. A equação da reta de regressão linear entre eles é $y = 1,1x - 0,0022$ com um $R^2 = 0,98$.

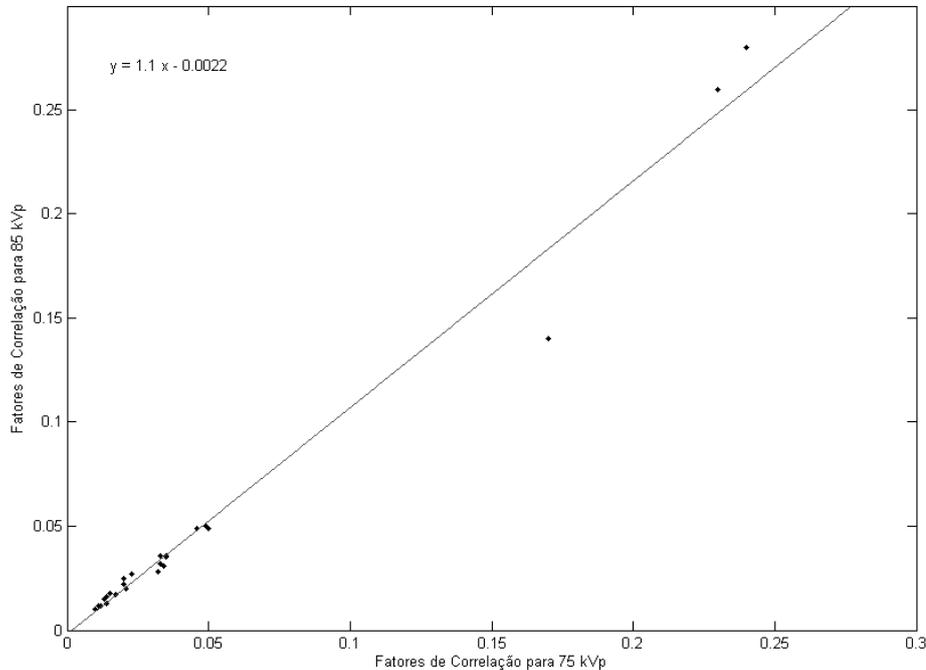


Figura 8: Regressão linear dos FCs medidos para 75 e 85 kVp.

Na regressão linear entre FCs de 75 kVp e 85 kVp, o coeficiente angular próximo a 1, o coeficiente linear foi próximo a 0, o R^2 foi próximo a 1 e o desvio padrão relativamente baixo entre eles corroborou com o resultado do teste de Wilcoxon: sem diferença estatística entre esses grupos. Portanto, as medias entre os FCs das duas energias foram utilizadas para calcular as Es de referência.

A Figura 9 mostra os gráficos de *boxplot* da E de referência (Dose Efetiva) e as Es estimadas de acordo com os 6 métodos avaliados.

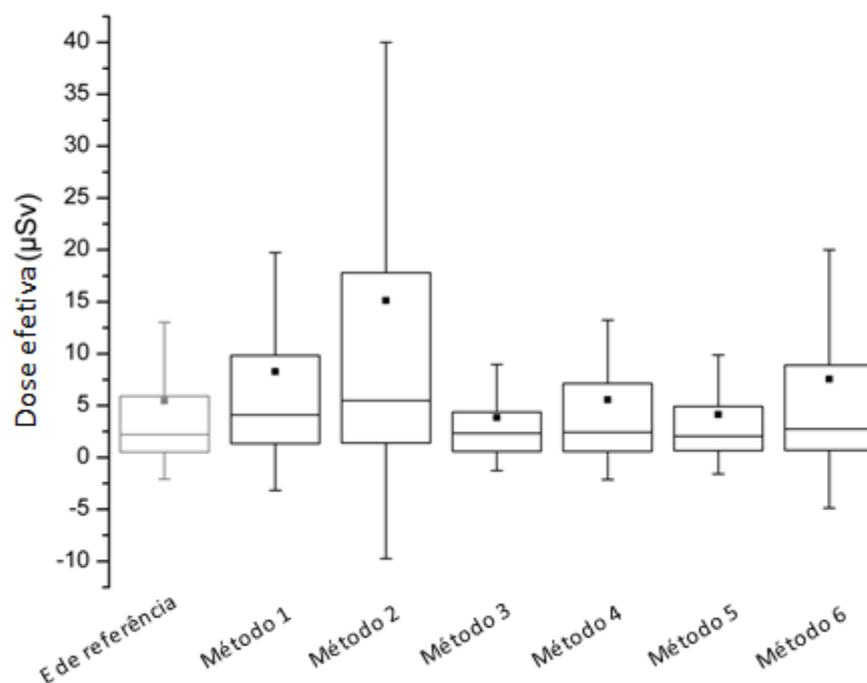


Figura 9: E de referência calculada utilizando os FCs e os 6 métodos para estimar as doses efetivas adotados neste estudo. Cada caixa representa os seguintes valores estatísticos: os limites inferior e superior da caixa indicam os 25º e 75º percentis; A linha horizontal sólida na caixa marca a mediana; o quadrado representa o valor médio e as barras de erro acima e abaixo da caixa representam o desvio padrão.

Gráficos de Bland Altman foram utilizados para comparar a E de referência com as Es estimadas com os métodos avaliados. As figuras 10, 11 e 12 apresentam os Gráficos de Bland Altman para a diferença e média entre as Es de referência e as Es estimadas usando os 6 métodos.

Os Métodos 1 e 2 foram os mais conservadores para estimar a E dos profissionais entre todos os avaliados, superestimando a E em aproximadamente 100% e 200% em média, respectivamente. De acordo com nossa metodologia, os métodos mais precisos foram os 3, 4 e 5. Esses métodos não superestimaram ou subestimaram, em média, as E dos profissionais mais que poucos por cento.

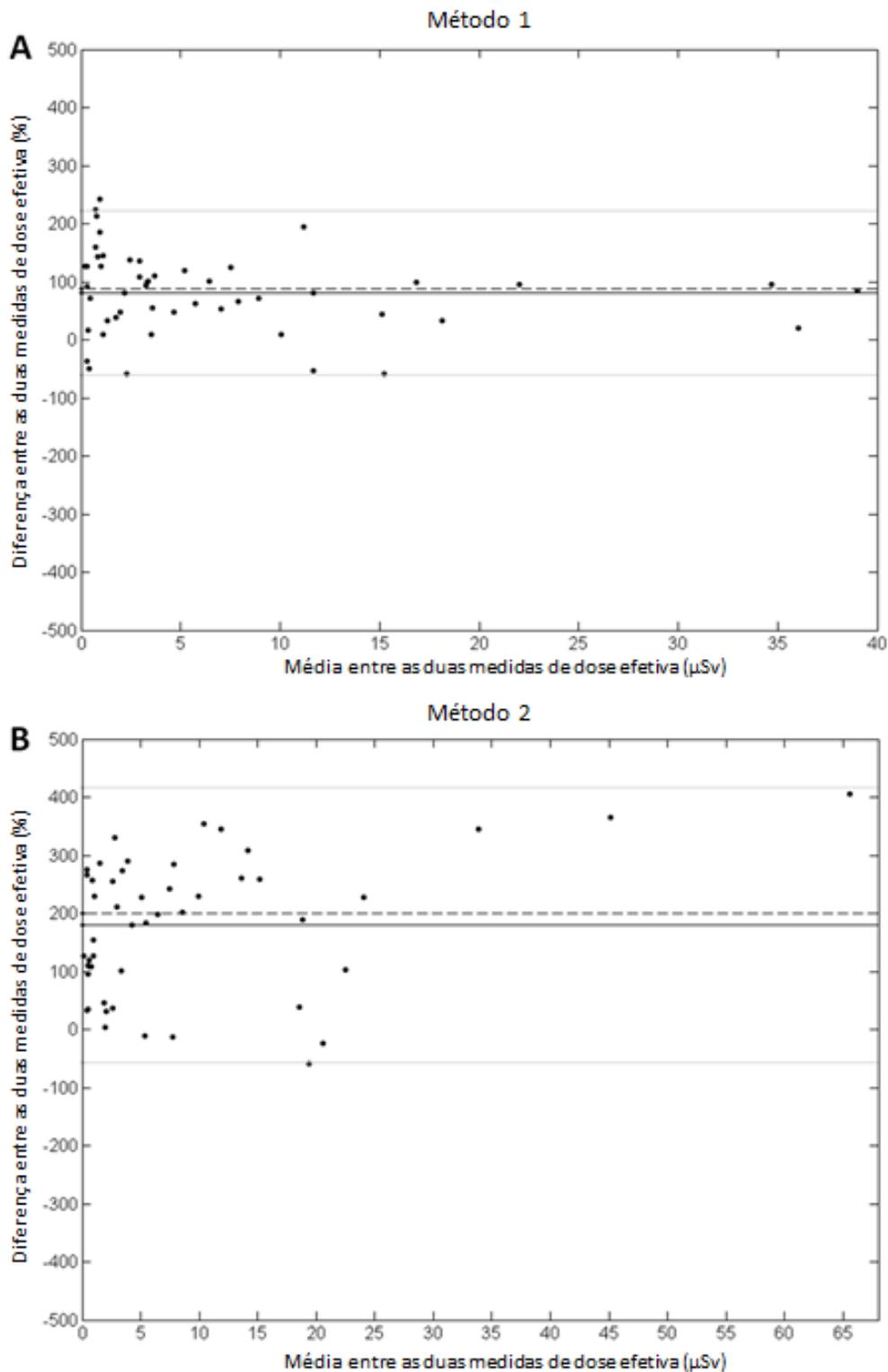


Figura 10: Bland Altman para a diferença e média entre a E de referência e as Es estimativas usando os Métodos 1 (A) e 2 (B). A diferença refere-se ao E obtido com a metodologia testada menos a E de referência dividido pela E de referência. Estas diferenças foram calculadas para cada procedimento monitorado. As linhas centrais pretas correspondem ao valor médio dos desvios. As linhas cinzas contínuas indicam o intervalo de 2 desvios-padrão. As linhas pretas tracejadas correspondem ao valor da mediana das diferenças.

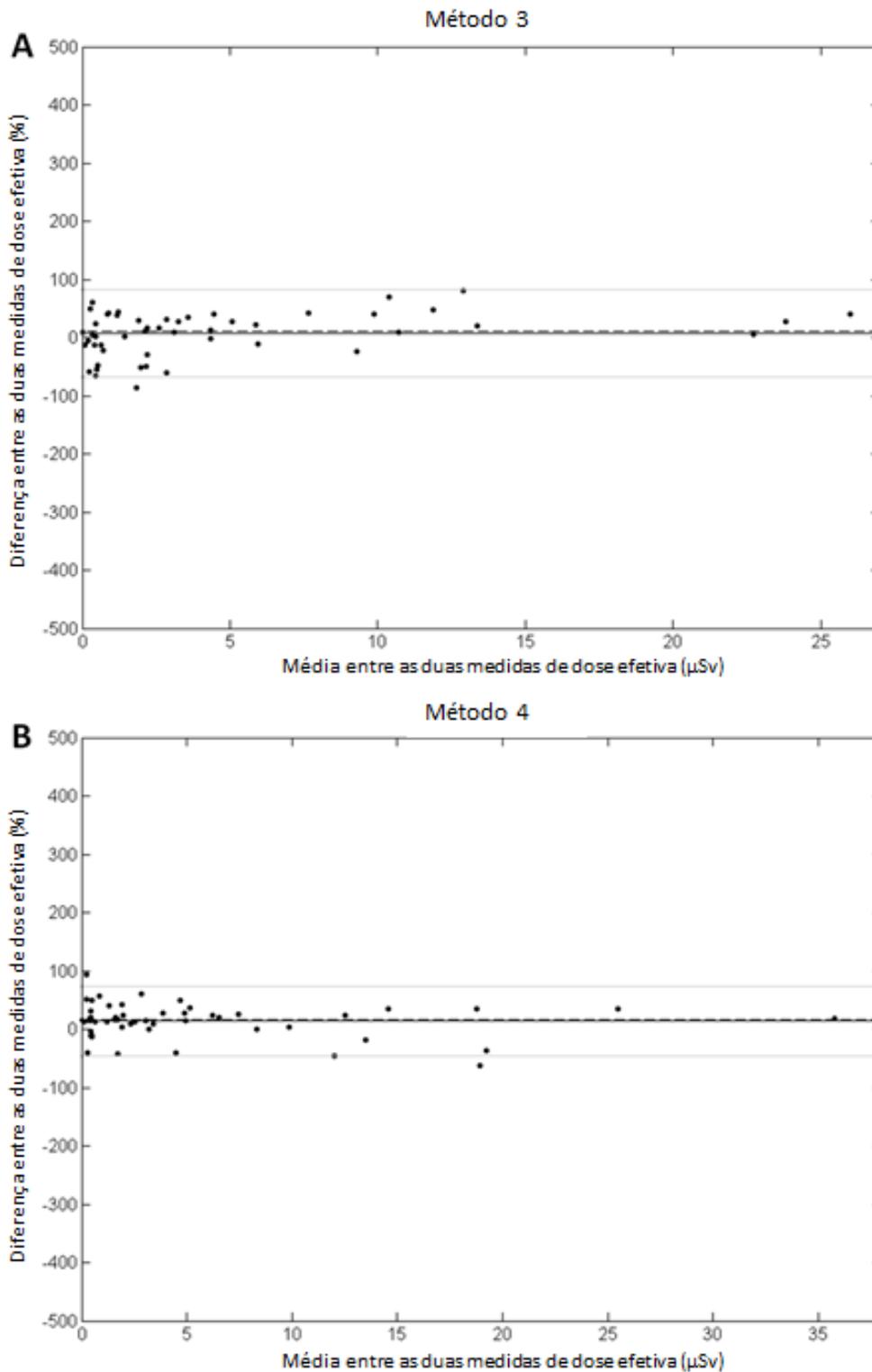


Figura 11: Bland Altman para a diferença e média entre a E de referência e as Es estimativas usando os Métodos 3 (A) e 4 (B). A diferença refere-se ao E obtido com a metodologia testada menos a E de referência dividido pela E de referência. Estas diferenças foram calculadas para cada procedimento monitorado. As linhas centrais pretas correspondem ao valor médio dos desvios. As linhas cinzas contínuas indicam o intervalo de 2 desvios-padrão. As linhas pretas tracejadas correspondem ao valor da mediana das diferenças.

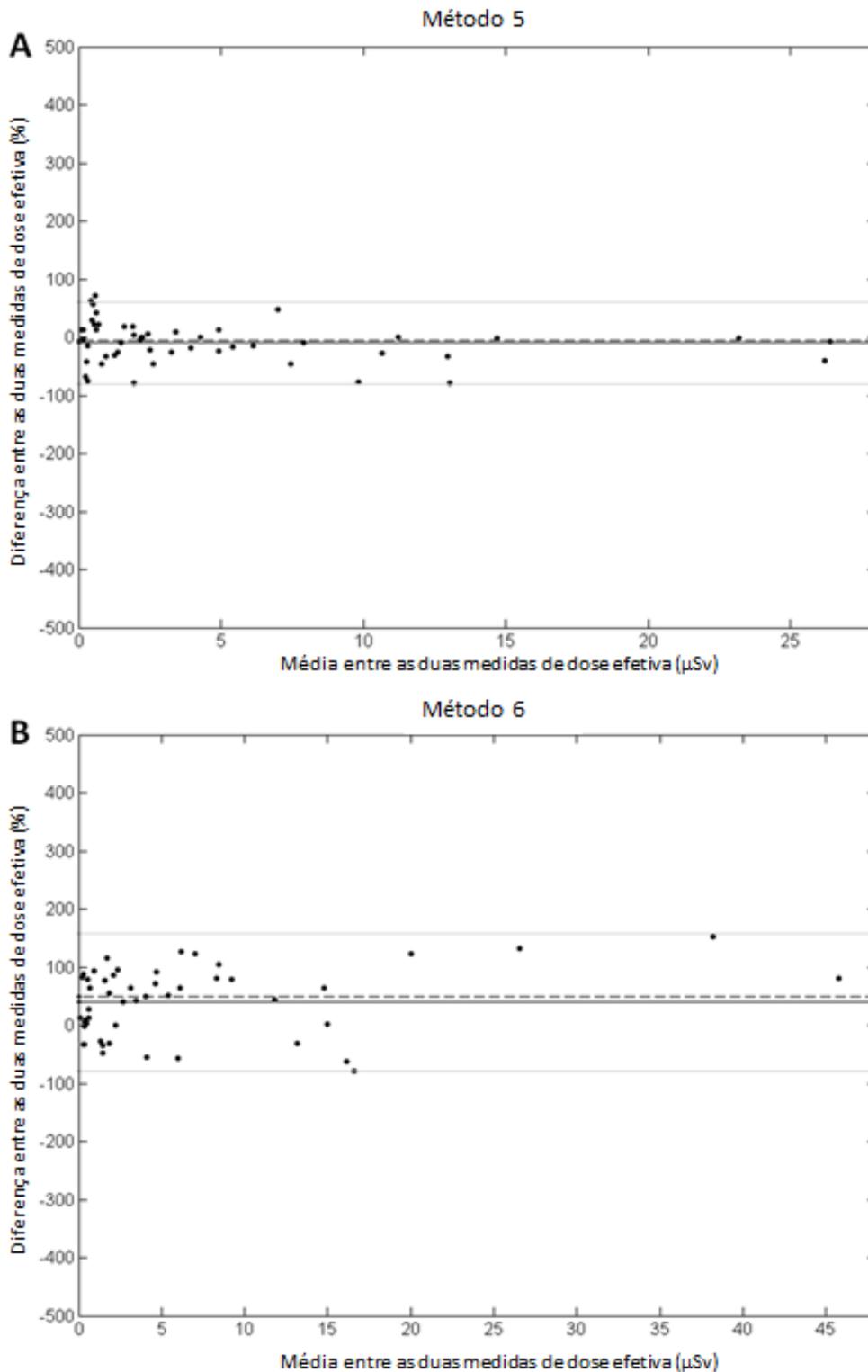


Figura 12: Bland Altman para a diferença e média entre a E de referência e as Es estimativas usando os Métodos 5 (A) e 6 (B). A diferença refere-se ao E obtido com a metodologia testada menos a E de referência dividido pela E de referência. Estas diferenças foram calculadas para cada procedimento monitorado. As linhas centrais pretas correspondem ao valor médio dos desvios. As linhas cinzas contínuas indicam o intervalo de 2 desvios-padrão. As linhas pretas tracejadas correspondem ao valor da mediana das diferenças.

5.3. Discussão

As doses equivalentes em diferentes partes do corpo e as Es foram avaliadas por dosimetria dos profissionais de rotina clínica. As maiores doses equivalentes foram medidas nas mãos dos profissionais. Utilizando a dosimetria dos profissionais durante a prática clínica e medições em situações artificiais, calculou-se as Es recebidas pelos profissionais monitorados em cada procedimento (E de referência). Es estimadas usando 6 métodos aplicados em diferentes países foram comparados com as Es de referência dos profissionais para cada procedimento, possibilitando assim uma análise da eficiência desses 6 métodos.

Os métodos 1 e 2 superestimaram E em aproximadamente 100% e 200% em média, respectivamente. Os seus valores de desvio padrão são extremamente elevados, atingindo mais de 400% no método 2. No entanto, essas metodologias não subestimaram os valores de E mais do que as outras. Do ponto de vista da segurança, a superestimação destes métodos pode constituir uma margem de segurança para as exposições ocupacionais, fazendo deles mais conservadores do que os demais.

Os Métodos 3, 4 e 5 apresentaram médias e medianas de diferenças próximas de 0% e seus desvios padrão foram os menores. Dentre estas três estimativas, para fins de proteção radiológica, a 5 é a metodologia menos adequada para aplicação na rotina, uma vez que não utiliza dosímetros externos. Portanto, as informações sobre regiões não protegidas não são registradas. O método 6 superestimou em média e mediana as Es em aproximadamente 50%.

O método mais preciso foi o Método 4, recomendado pela NCRP. Sua diferença média e mediana em relação à referência E foi próxima de 0% e seu desvio padrão foi o menor. Para fins de proteção radiológica, esta metodologia possui uma característica positiva, uma vez que considera as doses abaixo e acima dos aventais de proteção radiológica.

A maioria dos nossos resultados está de acordo com outros trabalhos presentes na literatura. Valores médios de 70 μSv para a cabeça e 40 μSv para as mãos (pulso) foram encontrados e são consistentes com aqueles encontrados por Efstathopoulos *et al.* (Efstathopoulos et al., 2011). As doses médias encontradas para o tórax desprotegido foi em torno de 80 μSv por procedimento, que é quase metade dos resultados encontrados por Sailer *et al.* (Sailer et al., 2015). Isso pode ser explicado pelo fato de que Sailer *et al.* avaliaram procedimentos com aproximadamente metade do tempo médio de fluoroscopia quando comparados aos nossos procedimentos (Sailer et al., 2015). Para o pescoço, acima das proteções plumbíferas, encontramos uma média de 71 μSv que está de acordo com Delichas *et al.* (Delichas et al., 2003).

Doses medianas de 42 μSv foram encontradas para o tórax acima dos aventais plumbíferos, enquanto Hausler *et al.* encontraram 16 μSv (Hausler et al., 2009). Esta diferença pode ser atribuída ao uso de escudo de acrílico suspenso no teto nos procedimentos monitorados por Hausler *et al.*

Neste estudo, as Es de referências dos profissionais para cada procedimento foram calculadas utilizando medidas clínicas e os FCs medidos com fantomas. A mediana das Es de referência encontrada foi de 2,2 μSv , o que está de acordo com os resultados de Hausler *et al.* (Hausler et al., 2009).

As estruturas que mais contribuem para E estão posicionadas na cabeça, tórax e abdômen. Geralmente, os dosímetros pessoais são utilizados na altura do tórax (Bacchim Neto et al., 2016, Miller et al., 2010a). A mediana da dose encontrada no tórax e no abdômen, acima dos aventais protetores, foi de 0,04 mSv e 0,06 mSv, respectivamente. Essa diferença evidencia que a posição do dosímetro pessoal deve ser escolhida cuidadosamente e merece atenção em um setor de RI.

Os FCs médios encontradas para 75 kVp foram comparadas com aquelas encontradas para 85 kVp para cada órgão e não houve diferença estatística. Isso também pode ser observado na regressão linear apresentada na Figura 8 e seu correspondente valor R^2 . A equação de regressão linear e o valor de R^2 apresentaram forte associação e baixa dispersão entre os FCs de 75 e 85 kVp. Portanto, para os cálculos das Es de referência foram utilizados os FCs médios entre as duas energias para cada órgão ou tecido.

Neste capítulo foram avaliados um número considerável de procedimentos das três modalidades mais comumente realizadas neste setor, no entanto, este estudo apresenta algumas limitações. Mais modalidades poderiam ser monitoradas para uma avaliação mais completa. Proteções radiológicas estacionárias disponíveis podem influenciar os resultados obtidos. Portanto, avaliações em circunstâncias de configurações de proteções estacionárias diferentes poderiam contribuir significativamente para os resultados deste capítulo.

5.4. Conclusão

Neste capítulo avaliamos a eficiência de 6 metodologias diferentes para avaliar E em profissionais durante procedimentos intervencionistas. O método mais conservador para estimativa da E dos profissionais foi o recomendado pela legislação brasileira com dosímetro posicionado no abdômen (Método 2). Este método superestimou a E em 200% em média, porém não subestimou esta grandeza mais que outros métodos. Portanto, este método não prejudica a segurança dos profissionais em termos de E. Esta superestimação das Es pode ser considerado como uma margem de segurança para as exposições ocupacionais. O método mais preciso foi o utilizado na América do Norte, recomendado pelo NCRP (Método 4). Este método não superestimou a E dos profissionais mais do que alguns por cento e seu desvio padrão em relação à E referência foram os mais baixos. Portanto, recomenda-se a escolha de metodologias que

empregam, pelo menos, dois dosímetros, um por baixo e por cima de aventais protetores. Assim, a E pode ser avaliada com mais precisão e informações sobre regiões protegidas e não protegidas estarão disponíveis. Além disso, em algumas situações onde a dose nas mãos pode ser alta, dosímetros adicionais para esta região também são recomendados.

Capítulo 6: Conclusões finais

- Os profissionais adequadamente protegidos, trabalhando em uma rotina normal, provavelmente não estão expostos à níveis de radiação maiores do que os limites estabelecidos nacionalmente e internacionalmente;

- Algumas regiões dos profissionais em alguns procedimentos podem receber, durante o ano, níveis de doses perigosamente perto dos limites anuais;

- Dosímetros posicionados no tórax podem subestimar as doses para outras regiões do corpo, especialmente abdômen, extremidades e cristalinos;

- O método mais conservador para estimativa da E dos profissionais foi o recomendado pela legislação brasileira com dosímetro posicionado no abdômen acima das proteções plumbíferas (Método 2). Este método superestimou a E em 200% em média, porém não subestimou esta grandeza mais que outros métodos. No entanto, esta superestimação pode ser considerado como uma margem de segurança para as exposições ocupacionais;

- O método mais preciso foi o utilizado na América do Norte, recomendado pelo NCRP (Método 4). Este método não superestimou a E dos profissionais mais do que alguns por cento e seu desvio padrão em relação à E referência foram os mais baixos;

- Recomenda-se a escolha de metodologias que empregam, pelo menos, dois dosímetros, um por baixo e por cima de aventais protetores. Assim, a E pode ser avaliada com mais precisão e informações sobre regiões protegidas e não protegidas estarão disponíveis;

- Em algumas situações onde a dose nas mãos pode ser alta, dosímetros adicionais para esta região são recomendados.

Capítulo 7: Referências bibliográficas

- AAPM 1982. Standardized methods for measuring diagnostic x-ray exposures.
- ANVISA 1998. Portaria Nº 453. Aprova o regulamento técnico que estabelece as diretrizes básicas de proteção radiológica em radiodiagnóstico médico e odontológico. Agência Nacional de Vigilância Sanitária: Diário Oficial da União.
- ATTIX, F. H. 1986. *Introduction to radiological physics and radiation dosimetry*, New York, Wiley.
- BACCHIM NETO, F. A., ALVES, A. F., MASCARENHAS, Y. M., NICOLUCCI, P. & PINA, D. R. 2016. Occupational radiation exposure in vascular interventional radiology: A complete evaluation of different body regions. *Phys Med*, 32, 1019-24.
- BLAND, J. M. & ALTMAN, D. G. 1999. Measuring agreement in method comparison studies. *Stat Methods Med Res*, 8, 135-60.
- CHIDA, K., KAGA, Y., HAGA, Y., KATAOKA, N., KUMASAKA, E., MEGURO, T. & ZUGUCHI, M. 2013. Occupational dose in interventional radiology procedures. *AJR Am J Roentgenol*, 200, 138-41.
- CHRISTODOULOU, E. G., GOODSITT, M. M., LARSON, S. C., DARNER, K. L., SATTI, J. & CHAN, H. P. 2003. Evaluation of the transmitted exposure through lead equivalent aprons used in a radiology department, including the contribution from backscatter. *Medical Physics*, 30, 1033-1038.
- CNEN 2011. Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica. *CNEN-NN-3.01*.
- CRISTY, M. 1981. Active bone marrow distribution as a function of age in humans. *Phys Med Biol*, 26, 389-400.
- DANCE, D. R., CHRISTOFIDES, S., MAIDMENT, A. D. A., MCLEAN, I. D. & NG, K. H. 2014. *Diagnostic Radiology Physics: A handbook for teachers and students*, Viena, Austria, IAEA.
- DELICHAS, M., PSARRAKOS, K., MOLYVDA-ATHANASSOPOULOU, E., GIANNOGLOU, G., SIOUNDAS, A., HATZIIOANNOU, K. & PAPANASTASSIOU, E. 2003. Radiation exposure to cardiologists performing interventional cardiology procedures. *Eur J Radiol*, 48, 268-73.
- DOMIENIK, J., BRODECKI, M., CARINOU, E., DONADILLE, L., JANKOWSKI, J., KOUKORAVA, C., KRIM, S., NIKODEMOVA, D., RUIZ-LOPEZ, N., SANS-MERCE, M., STRUELENS, L. & VANHAVERE, F. 2011. Extremity and eye lens doses in interventional radiology and cardiology procedures: first results of the ORAMED project. *Radiat Prot Dosimetry*, 144, 442-7.
- EFSTATHOPOULOS, E. P., PANTOS, I., ANDREOU, M., GKATZIS, A., CARINOU, E., KOUKORAVA, C., KELEKIS, N. L. & BROUNTZOS, E. 2011. Occupational radiation doses to the extremities and the eyes in interventional radiology and cardiology procedures. *British Journal of Radiology*, 84, 70-77.
- HAUSLER, U., CZARWINSKI, R. & BRIX, G. 2009. Radiation exposure of medical staff from interventional x-ray procedures: a multicentre study. *Eur Radiol*, 19, 2000-8.
- ICRP 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103. *Ann ICRP*, 37, 1-332.
- JACOB, S., DONADILLE, L., MACCIA, C., BAR, O., BOVEDA, S., LAURIER, D. & BERNIER, M. O. 2013. Eye lens radiation exposure to interventional cardiologists: a retrospective assessment of cumulative doses. *Radiat Prot Dosimetry*, 153, 282-93.
- KIM, K. P., MILLER, D. L., BERRINGTON DE GONZALEZ, A., BALTER, S., KLEINERMAN, R. A., OSTROUMOVA, E., SIMON, S. L. & LINET, M. S. 2012. Occupational radiation doses to operators performing fluoroscopically-guided procedures. *Health Phys*, 103, 80-99.
- KNOLL, G. F. 2010. *Radiation detection and measurement*, Hoboken, N.J., John Wiley.
- KOUKORAVA, C., CARINOU, E., SIMANTIRAKIS, G., VRACHLIOTIS, T. G., ARCHONTAKIS, E., TIERRIS, C. & DIMITRIOU, P. 2011. Doses to operators during interventional radiology procedures: focus on eye lens and extremity dosimetry. *Radiat Prot Dosimetry*, 144, 482-6.
- MILLER, D., VAÑÓ, E., BARTAL, G., BALTER, S., DIXON, R., PADOVANI, R., SCHUELER, B., CARDELLA, J. & DE BAÈRE, T. 2010a. Occupational Radiation Protection in Interventional Radiology: A Joint Guideline of the Cardiovascular and Interventional Radiology Society of Europe and the Society of Interventional Radiology. *CardioVascular and Interventional Radiology*, 33, 230-239.

- MILLER, D. L., BALTER, S., SCHUELER, B. A., WAGNER, L. K., STRAUSS, K. J. & VANO, E. 2010b. Clinical radiation management for fluoroscopically guided interventional procedures. *Radiology*, 257, 321-32.
- NCRP 1995. *Use of personal monitors to estimate effective dose equivalent and effective dose to workers for external exposure to low-LET radiation : recommendations of the National Council on Radiation Protection and Measurements*, Bethesda, MD, National Council on Radiation Protection and Measurements.
- NIKODEMOVA, D., BRODECKI, M., CARINOU, E., DOMIENIK, J., DONADILLE, L., KOUKORAVA, C., KRIM, S., RUIZ-LOPEZ, N., SANS-MERCE, M., STRUELENS, L., VANHAVERE, F. & ZAKNOUNE, R. 2011. Staff extremity doses in interventional radiology. Results of the ORAMED measurement campaign. *Radiation Measurements*, 46, 1210-1215.
- OKUNO, E. & YOSHIMURA, E. 2010. *Física das Radiações*, São Paulo, SP Brasil.
- PODGORSAK, E. B. & INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. 2005. *Radiation oncology physics : a handbook for teachers and students*, Vienna, International Atomic Energy Agency.
- PRASAD, K. N., COLE, W. C. & HAASE, G. M. 2004. Radiation protection in humans: extending the concept of as low as reasonably achievable (ALARA) from dose to biological damage. *British Journal of Radiology*, 77, 97-99.
- ROTHKAMM, K. & LOBRICH, M. 2003. Evidence for a lack of DNA double-strand break repair in human cells exposed to very low x-ray doses. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100, 5057-5062.
- SAILER, A. M., SCHURINK, G. W., BOL, M. E., DE HAAN, M. W., VAN ZWAM, W. H., WILDBERGER, J. E. & JEUKENS, C. R. 2015. Occupational Radiation Exposure During Endovascular Aortic Repair. *Cardiovasc Intervent Radiol*, 38, 827-32.
- SCHONFELD, S. J., LEE, C. & BERRINGTON DE GONZALEZ, A. 2011. Medical exposure to radiation and thyroid cancer. *Clin Oncol (R Coll Radiol)*, 23, 244-50.
- SOARES, F. A. P., PEREIRA, A. G. & FLÔR, R. C. 2011. Utilização de vestimentas de proteção radiológica para redução de dose absorvida: uma revisão integrativa da literatura. *Radiologia Brasileira*, 97-103.
- STADTMANN, H. & HRANITZKY, C. 2008a. Comparison of different dose algorithms used to evaluate a two element LiF : Mg,Ti TL personal dosimeter. *Radiation Measurements*, 43, 571-575.
- STADTMANN, H. & HRANITZKY, C. 2008b. Uncertainty assessment and comparison of different dose algorithms used to evaluate a two element LiF:Mg,Ti TL personal dosimeter. Austrian Research Centers GmbH.
- TAHUATA, L., P.A.SALATI, I., PRINZIO, R. D. & PRINZIO, A. D. 2003. *Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos*, Rio de Janeiro, RJ Brasil.
- THORNTON, R. H., DAUER, L. T., ALTAMIRANO, J. P., ALVARADO, K. J., ST GERMAIN, J. & SOLOMON, S. B. 2010. Comparing Strategies for Operator Eye Protection in the Interventional Radiology Suite. *Journal of Vascular and Interventional Radiology*, 21, 1703-1707.
- UNSCEAR 2008. *Effects of ionizing radiation : UNSCEAR 2006 report to the General Assembly, with scientific annexes*, New York, United Nations.
- VANHAVERE, F., CARINOU, E., DOMIENIK, J., DONADILLE, L., GINJAUME, M., GUALDRINI, G., KOUKORAVA, C., KRIM, S., NIKODEMOVA, D., RUIZ-LOPEZ, N., SANS-MERCE, M. & STRUELENS, L. 2011. Measurements of eye lens doses in interventional radiology and cardiology: Final results of the ORAMED project. *Radiation Measurements*, 46, 1243-1247.
- VANO, E., GONZALEZ, L., FERNANDEZ, J. M. & HASKAL, Z. J. 2008. Eye lens exposure to radiation in interventional suites: Caution is warranted. *Radiology*, 248, 945-953.
- VANO, E., GONZALEZ, L., GUIBELALDE, E., FERNANDEZ, J. M. & TEN, J. I. 1998. Radiation exposure to medical staff in interventional and cardiac radiology. *British Journal of Radiology*, 71, 954-960.
- VANO, E., KLEIMAN, N. J., DURAN, A., REHANI, M. M., ECHEVERRI, D. & CABRERA, M. 2010. Radiation cataract risk in interventional cardiology personnel. *Radiat Res*, 174, 490-5.
- WAGNER, L. K., EIFEL, P. J. & GEISE, R. A. 1994. Potential biological effects following high X-ray dose interventional procedures. *J Vasc Interv Radiol*, 5, 71-84.

WARDMAN, P. 2009. The importance of radiation chemistry to radiation and free radical biology (The 2008 Silvanus Thompson Memorial Lecture). *British Journal of Radiology*, 82, 89-104.

Apêndice A

Em anexo o artigo “Occupational Radiation Exposure in Vascular Interventional Radiology: A Complete Evaluation of Different Body Regions” referente ao Capítulo 1 deste trabalho de mestrado que está publicado na revista *Physica Medica: European Journal of Medical Physics*.



Technical note

Occupational radiation exposure in vascular interventional radiology: A complete evaluation of different body regions



Fernando Antonio Bacchim Neto^a, Allan Felipe Fattori Alves^a, Yvone Maria Mascarenhas^b, Patrícia Nicolucci^c, Diana Rodrigues de Pina^{d,*}

^a Instituto de Biociências de Botucatu, Departamento de Física e Biofísica, UNESP – Universidade Estadual Paulista, Distrito de Rubião Junior S/N, Botucatu, 18618-000 São Paulo, Brazil

^b Sapra Landauer, Rua Cid Silva César, 600, São Carlos, 13562-400 São Paulo, Brazil

^c CIDRA – Centro de Instrumentação, Dosimetria e Radioproteção, Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, USP – Universidade de São Paulo, Av. Bandeirantes, 3900 Bairro Monte Alegre, Ribeirão Preto, 14040-901 São Paulo, Brazil

^d Departamento de Doenças Tropicais e Diagnóstico por Imagem, Faculdade de Medicina de Botucatu, UNESP – Universidade Estadual Paulista, Distrito de Rubião Junior S/N, Botucatu, 18618-000 São Paulo, Brazil

ARTICLE INFO

Article history:

Received 8 April 2016

Received in Revised form 10 June 2016

Accepted 29 June 2016

Available online 21 July 2016

Keywords:

Radiation protection

Interventional radiology

Occupational exposure

ABSTRACT

Purpose: To perform a complete evaluation on radiation doses, received by primary and assistant medical staff, while performing different vascular interventional radiology procedures.

Materials and methods: We evaluated dose received in different body regions during three categories of vascular procedures: lower limb angiography (Angiography), lower limb percutaneous transluminal angioplasty (Angioplasty) and stent graft placement for abdominal aortic aneurysm treatment (A. A. A. Treatment). We positioned the dosimeters near the eye lens, thyroid, chest, abdomen, hands, and feet of the interventional physicians. Equivalent dose was compared with annual dose limits for workers in order to determine the maximum number of procedures per year that each physician could perform. We assessed 90 procedures.

Results: We found the highest equivalent doses in the A. A. A. Treatment, in which 90% of the evaluations indicated at least one region receiving more than 1 mSv per procedure. Angioplasty was the only procedural modality that provided statistically different doses for different professionals, which is an important aspect on regards to radiological protection strategies. In comparison with the dose limits, the most critical region in all procedures was the eye lens.

Conclusions: Since each body region of the interventionist is exposed to different radiation levels, dose distribution measurements are essential for radiological protection strategies. These results indicate that dosimeters placed in abdomen instead of chest may represent more accurately the whole body doses received by the medical staff. Additional dosimeters and a stationary shield for the eye lens are strongly recommended.

© 2016 Associazione Italiana di Fisica Medica. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Interventional radiology (IR) is an area of radiology that exposes medical staff to the highest doses of radiation [1–3]. The scattered radiation to which medical staff are usually exposed to comes mainly from the patient, therefore professionals who remain close to the patient receive highest levels of radiation [4]. Many other factors can influence the levels of exposure for medical staff,

including the professional height, positioning in the room, the X-ray tube position relatively to table and patient, the use of radiological protection equipment, the total exposure time during the procedure and the condition of fluoroscopy and image acquisition [1–3].

Several studies have evaluated radiation exposure in IR to both describe medical staff exposure and improve radiological protection strategies [1,4,5]. However, these studies concentrated on a specific procedure or specific body region. Dosimetry is usually acquired under artificial conditions or neglects important body regions such as the abdomen [1,5,6].

The aim of our study was to investigate radiation exposure profiles in medical staff during different vascular IR procedures. We

* Corresponding author.

E-mail addresses: bacchim@ibb.unesp.br (F.A. Bacchim Neto), allan@ibb.unesp.br (A.F.F. Alves), yvone@sapra.com.br (Y.M. Mascarenhas), nicol@usp.br (P. Nicolucci), drpina@fmb.unesp.br (D.R.d. Pina).

performed a complete assessment and comparison of radiation doses in different regions of the body for both primary and assistant professionals on three modalities of procedures, representing the highest potential exposure to medical staff. We also estimated the maximum number of procedures that each professional could perform without exceeding annual dose limits and with different radiological protection efficiency.

2. Materials and methods

2.1. Selection of procedures

We evaluated three different vascular procedures based on three criteria: total exposure time (fluoroscopy time), procedure frequency and noise level, which is selected on each protocol and is influenced by tube current (mA). According to these features, we selected the most frequent procedures among those with the longest fluoroscopy time and higher tube current, which represent the procedures with highest potential doses to the medical staff. Procedures chosen were lower limb angiography (Angiography), lower limb percutaneous transluminal angioplasty (Angioplasty) and abdominal aortic aneurysm treatment (A. A. A. Treatment – angioplasty with stent grafts placement for abdominal aortic aneurysms). The number of procedures per group were 30 for Angiography, 30 for Angioplasty, and 30 for A. A. A. Treatment. Seven staff members participated in the study. One primary interventionist and one assistant composed the interventional staff for each procedure, and they were both monitored. For Angioplasty and Angiography protocols, both remained on the same side of the patient's table, the primary interventionist and assistant remained at 0.5 m and 1.0 m from the X-ray tube, respectively. During A. A. A. Treatment, they stood on opposite sides of the table, positioned symmetrically distant from the tube, both at 0.5 m from the X-ray tube.

2.2. Equipment description

All procedures were performed with the equipment LCV Plus (Advantax; General Electric Medical Systems, Milwaukee, Wis. USA), which was in accordance with all standard quality control tests. Lead blades underneath the patient table were part of the stationary shielding. However, the equipment did not present ceiling-suspended transparent shield.

Angiographies and Angioplasties were performed with the same protocol: 70 kVp, 1.9 frames/s, “medium” noise level, 32 cm field of view, and automatic control of mA.

All A. A. A. Treatment were performed with the same protocol: 85 kVp, 3.8 frames/s, “medium” noise level, 32 cm field of view, and automatic control of mA.

In all procedures the imaging system (X ray tube and image detector) was positioned by the interventionist in the range of 15° right and 15° left with respect to posteroanterior projection, according with the particularities of each procedure. The LCV Plus equipment does not provide the air kerma – area product (KAP) measurement and, therefore, patients' doses were not monitored.

2.3. Dosimetry of professionals

TLD-100 dosimeters (LIF: Mg, Ti Harshaw®) were used in all procedures. For each monitored region, a set of three dosimetric tablets were fixed to obtain higher accuracy and allow us to discard possible experimental reading errors.

Dosimeters were calibrated in Photon Dose Equivalent Hx (measured in Sv), according to current legislation in our country. Calibration of our TLDs was performed using a Co-60 source on a

4 π geometry free air exposure using a 3 mm Lucite® build up plate. Exposure conditions were verified by comparison with a secondary laboratory ionization chamber.

In each evaluation procedure, dosimeters were placed on the primary interventionist (i.e., the physician who conducted the intervention) and one assistant, who remained in the room throughout the entire procedure. Dosimeters were fixed at the following locations: a few inches below the eye lens (on top of the surgical mask), thyroid, chest, abdomen, hands (bottom of the wrist), and feet. Dosimeters were positioned above the radiological protection aprons, such as lead aprons and thyroid shields to ensure that measured doses were within a good sensibility range to use TLD. We monitored the extremities in both hands and feet, using the highest dose values per procedure for analysis (i.e., the highest dose received by the hands and the highest dose received by the feet in each professional per procedure).

Each group of dosimeters (eight sets with three TLD tablets each) contained a control group (one set with three TLD tablets). Readings from the control group were subtracted from readings of all regions to discard the background influence. We performed approximately 4500 TLD measurements throughout the dosimetry process.

We divided all dosimeters into three groups, according to each procedure category, and stored each group separately. All dosimeters were properly stored and read exactly 48 h from its respective radiation exposure procedure. The fluoroscopy time of each procedure was recorded for subsequent calculations.

2.4. Equivalent dose rate profile construction

Equivalent dose rates (EDRs) were obtained by calculating the rate between equivalent doses and fluoroscopy time. The EDRs were evaluated for different body regions (eye lens, thyroid, chest, abdomen, feet, and hands) for both professionals.

We performed statistical comparisons between our dose measurements and suggested radiological protection strategies for our medical staff.

2.5. Estimation of the maximum number of procedures per year

We determined the hypothetical maximum number of procedures per year (MNPY) that each professional can perform without exceeding annual dose limits, which is similar to Hausler et al. [1]. We divided the international dose limits by the median and maximum measured dose values for each body region.

The annual dose limits employed in the present study were based on Publication 103 of the International Commission on Radiological Protection and the Brazilian standard, which defines occupational dose limits for different regions of the body [2,7].

For the eye lens and whole body (measured at the chest), the dose limits are 20 mSv per year, averaged over defined periods of 5 years, with no single year exceeding 50 mSv. For extremities and skin, the dose limit is 500 mSv of the equivalent dose per year [2,7]. On regards to MNPY extremity measurements, we divided the annual dose limit (500 mSv) by the median and the higher dose received at all professionals' extremities for each procedure category.

We corrected our dose levels according to the attenuation values from the protective lead aprons, defined by international guidelines and the literature [8,9]. Based on these data and the mean energy used in these procedures, we considered 85% attenuation for 0.25 mm and 95% for 0.5 mm Pb lead apron, respectively. All lead aprons were in accordance with quality control tests, and their attenuation values were verified through testing with ionization chambers. For leaded protective glasses, a 60% attenuation

Table 1

Median (interquartile range) equivalent dose values (μSv) for eye lens, thyroid, chest, abdomen, feet, and hands in all of the procedures for both primary interventionists and assistants. These values were for an unshielded person and were obtained above the protective clothing.

	Eye lens	Thyroid	Chest	Abdomen	Feet	Hands
<i>Primary interventionist</i>						
Angiography	18.6 (10.2–49.9)	22.5 (4.4–66.5)	21.8 (5.8–85.4)	31.8 (8.2–227.6)	52.1 (9.7–123.5)	33.1 (11.7–149.2)
Angioplasty	53.7 (14.6–126.6)	58.8 (14.2–183.1)	103.8 (13.5–224.2)	152.2 (46.0–301.2)	95.8 (28.2–205.8)	178.2 (35.4–645.8)
A. A. Treatment	364.3 (143.1–472.7)	338.4 (79.3–422.3)	292.6 (88.4–459.5)	1177.3 (178.5–2134.7)	874.7 (218.6–1285.8)	2105.3 (826.2–4679.2)
<i>Assistant interventionist</i>						
Angiography	9.8 (1.2–57.4)	16.2 (9.1–56.7)	37.1 (14.7–85.9)	39.7 (6.8–129.2)	22.3 (13.9–90.9)	37.5 (8.5–84.3)
Angioplasty	28.0 (6.5–52.4)	35.3 (11.7–50.8)	43.8 (23.4–44.9)	44.3 (13.2–62.6)	70.6 (15.3–90.7)	33.6 (15.7–71.1)
A. A. Treatment	207.0 (101.2–383.8)	122.9 (118.5–280.8)	207.0 (73.6–407.0)	215.3 (72.0–2893.6)	790.3 (166.3–2484.7)	417.7 (210.3–5751.3)

value was assumed, defined by Thornton et al. and an international guideline [9,10].

2.6. Statistical analysis

The statistical analysis was performed using MINITAB 14 software (Minitab, USA). Significant differences in the median dose levels between the primary physician and assistant were determined using the Mann-Whitney test. The null hypotheses (i.e., “dose levels do not differ between different body regions in the same procedure modality” and “dose levels do not differ between the same body regions in different modalities”) were tested using the Kruskal-Wallis test for the equality of medians.

3. Results

The largest equivalent doses were found for A. A. A. Treatment, in which 90% of the evaluations indicated that at least one region received more than 1 mSv per procedure. The highest dose values in the hands for both professionals were approximately 9 mSv.

Table 1 summarizes the median (interquartile range) equivalent dose values (μSv) for each monitored region for both primary interventionists and assistants. These values were obtained above the protective clothing.

The mean fluoroscopy time was 6.7 ± 4.6 min for Angiography, 15.6 ± 10.7 min for Angioplasty, and 29.3 ± 17.2 min for A. A. A. Treatment.

3.1. Dose rate profiles

The EDRs for Angiography, Angioplasty, and A. A. A. Treatment, respectively, for both professionals were plotted as a box plot in Figs. 1–3. These profiles were determined for an unshielded person. Figs. 1–3 show the EDRs of the primary interventionists (black boxes) and assistants (gray boxes) for eye lens, thyroid, chest, abdomen, feet, and hands.

3.2. Equivalent dose rate for primary interventionist vs. assistant

To determine radiological protection strategies, the EDRs for different body regions were statistically compared for all procedures. Angioplasty was the only procedural modality that presented statistically different EDRs (medians) for different professionals for the following regions: eye lens ($p = 0.03$), chest ($p = 0.03$), abdomen ($p = 0.01$), and hands ($p = 0.03$). For Angiography and A. A. A. Treatment, the EDRs in the same regions showed no significant difference between both professionals.

3.3. Equivalent dose rate for different body regions for primary interventionists and assistants

The EDRs for different regions of the primary interventionists and assistants were analyzed for specific types of procedures.

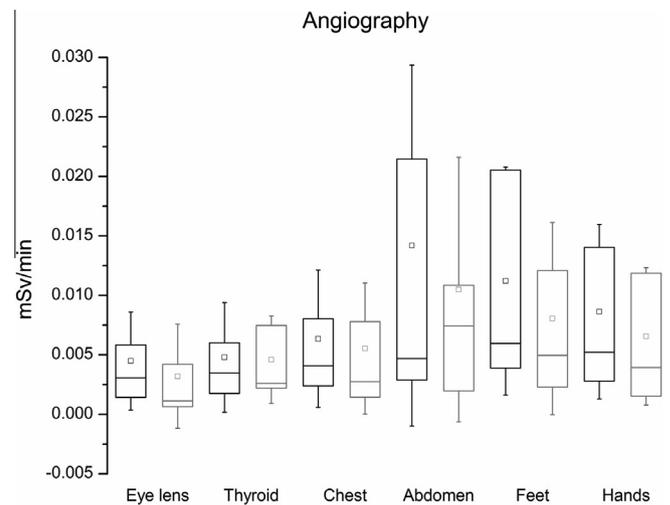


Fig. 1. Equivalent dose rates of the primary interventionist (black boxes) and assistant (gray boxes) for the eye lens, thyroid, chest, abdomen, feet, and hands for Angiography procedures. Each box represents the following statistical values: the lower and upper boundaries of the box indicate the 25th and 75th percentiles; the solid horizontal line in the box marks the median; and the square represents the mean value. The whiskers above and below the box are representing the standard deviation.

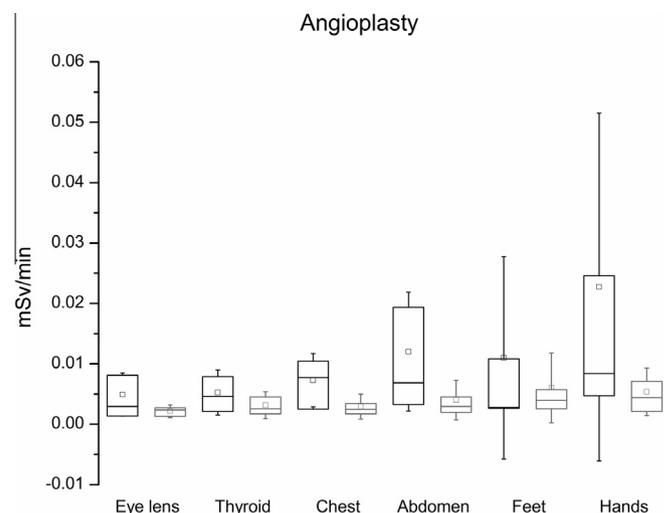


Fig. 2. Equivalent dose rates of the primary interventionist (black boxes) and assistant (gray boxes) for the eye lens, thyroid, chest, abdomen, feet, and hands for Angioplasty procedures. Each box represents the following statistical values: the lower and upper boundaries of the box indicate the 25th and 75th percentiles; the solid horizontal line in the box marks the median; and the square represents the mean value. The whiskers above and below the box are representing the standard deviation.

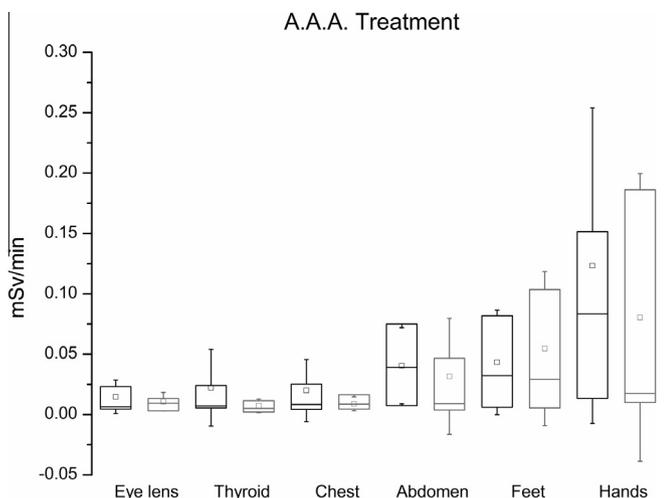


Fig. 3. Equivalent dose rates of the primary interventionist (black boxes) and assistant (gray boxes) for the eye lens, thyroid, chest, abdomen, feet, and hands for A. A. A. Treatment procedures. Each box represents the following statistical values: the lower and upper boundaries of the box indicate the 25th and 75th percentiles; the solid horizontal line in the box marks the median; and the square represents the mean value. The whiskers above and below the box are representing the standard deviation.

Table 2

Number of annual procedures that each professional may perform without exceeding the annual effective dose limits (measured at the chest). The results were based on the median and maximum dose values estimated in the present study, with 0.25 and 0.5 mm lead shielding.

Shielding	0.25 mm Pb		0.50 mm Pb	
	Median	Maximum	Median	Maximum
<i>Primary interventionist</i>				
Angiography	Unlimited	1560	Unlimited	Unlimited
Angioplasty	1290	600	Unlimited	1780
A. A. A. Treatment	460	290	1370	870
<i>Assistant interventionist</i>				
Angiography	Unlimited	1550	Unlimited	Unlimited
Angioplasty	Unlimited	Unlimited	Unlimited	Unlimited
A. A. A. Treatment	640	330	1930	980

The null hypothesis that the median dose would not differ for different body regions in the same procedure was discarded for aneurism treatment for the primary interventionists and assistants ($p = 0.05$).

3.4. Equivalent dose rate for each region in different procedures

The EDRs for each body region were obtained for all of the procedures, which allowed us to compare the EDRs for specific regions

Table 3

Number of annual procedures that each professional may perform without exceeding the annual equivalent dose limits (measured at respective regions). The results were based on the median and maximum dose values estimated in the present study, and a shielding factor of 60% for lead acrylic glass. For the extremities, we do not consider attenuation factors because shielding in these regions is not used.

Shielding	Eye lens				Extremities	
	None		Shielded		None	
	Median	Maximum	Median	Maximum	Median	Maximum
<i>Primary interventionist</i>						
Angiography	1080	400	Unlimited	1000	Unlimited	Unlimited
Angioplasty	370	160	930	390	Unlimited	770
A. A. A. Treatment	60	40	140	110	500	100
<i>Assistant interventionist</i>						
Angiography	2040	358	Unlimited	870	Unlimited	Unlimited
Angioplasty	720	380	1790	950	Unlimited	Unlimited
A. A. A. Treatment	100	50	240	130	640	90

in different procedures for both primary interventionists and assistants. The null hypothesis that the median dose would not differ between same body regions in different procedures was discarded for feet ($p = 0.04$) and hands ($p = 0.02$) for the primary interventionists. For the assistants, the null hypothesis was discarded for eye lens ($p = 0.01$), feet ($p = 0.03$), and hands ($p = 0.01$).

3.5. Estimation of the maximum number of procedures per year

We estimated the MNPY without reaching the annual limits of effective dose (chest dose) and equivalent dose (extremities and eye lens) for both primary interventionists and assistants. We considered two situations for the effective dose: a person wearing a 0.25 mm shielding lead apron and a person wearing a 0.50 mm shielding lead apron. Table 2 summarizes the MNPY for effective doses for both professionals. A similar calculation was performed for the eye lens, with the exception that, in this case, the shielding factor was 60%. For the extremities, we considered only unshielded people, since wearing protection in these regions is not common. Table 2 summarizes the MNPY for effective doses, and Table 3 shows the equivalent doses. MNPYs greater than 2500 were considered “unlimited” because more than 10 interventions per day is above the routine workload for a typical physician.

4. Discussion

We assessed the EDR profiles of medical staff for different IR procedures. We also evaluated the maximum number of procedures each professional could perform, without exceeding annual dose limits under different shielding configurations. These maximum values were based on measurements performed in a specific department and this methodology can be applied elsewhere to indicate the occupational exposure in others circumstances.

We found median dose rate for eye lens of the primary interventionist for A. A. A. Treatment (0.01 mSv/min) consistent with those found by Vano et al. [11], employing phantom measurements for the same equipment of fluoroscopy. Doses in interventionist legs found by Efsthopoulos et al. [12] during lower limbs angiographies were considerably near of our measurements for feet (around of 20 μSv for assistants and 50 μSv for primary interventionists). However, even the smallest eye lens median doses found in our study (9.8 μSv) were higher than the data showed by Hausler et al. [1] (2.4 μSv), which was an expected result, since they employed lead acrylic glass shielding, suspended from the ceiling. The MNPY values for maximum chest dose, for a shielded professional (0.25 mm Pb) in Angiographies and Angioplasties (around of 1560 and 600, respectively) were higher

than the values found by Hausler et al. [1] (around of 500 and 270, respectively).

In our study, A. A. A. Treatment resulted in median doses per procedure in agreement with Vano et al. [13] (around 300–400 μSv) for eye lens. Thus, our results were similar in some instance to others in the literature.

Longer procedures can result in higher dose exposures to medical staff when compared to shorter protocols, even under the same circumstances. Therefore, we employed EDRs to better describe exposure conditions for different procedures and to disregard the influence of exposure time.

The EDR profiles demonstrated that lower body regions (abdomen and feet) and hands presented higher EDRs. This occurred because of the X-ray tube positioning (i.e., below the table). High dose values for both abdomen and feet indicates that lead blades below the table were not correctly positioned to fully protect these regions. Extensive instrument manipulation during image acquisition causes high levels of hands exposure. However, in Angiography, because of the lower instrument manipulation during image acquisition, the hands presented lower EDRs compared with other body regions.

We found significant dose differences between the primary interventionists and assistants for Angioplasty. The eye lens, chest, abdomen, and hands of the assistants resulted in significantly lower EDRs compared with primary interventionists in these procedures. This difference occurs mainly due to the positioning of professionals during image acquisition, as described in the methods section “A. Selection of procedures”.

Since there are no instruments manipulation during image acquisition in angiographies, we assumed that this was the reason this difference was not found.

During longer A. A. A. Treatments, dose levels received for both professionals were not significantly different, probably because professionals are positioned on opposite sides of the table during the entire procedure, at equidistant positions of the X-ray tube, causing them to receive same dose levels.

For primary interventionists and assistants, the null hypothesis that dose levels would not differ between different body regions in the same type of procedure was discarded for A. A. A. Treatment. These results suggest the need for more than one dosimeter to accurately measure the doses received by these professionals.

The null hypothesis, i.e. that dose levels would not differ between the same regions of the body in different types of procedures, was discarded for feet and hands for the primary interventionists. For the assistants, this hypothesis was discarded for eye lens, feet, and hands.

A. A. A. Treatments are a modality that results in higher doses for eye lens and extremities. The MNPY for these regions were considerably close to the number of procedures performed in our institution annually. Considering that some professionals are always part of the intervention team for these procedures, they may be dangerously near exposure dose limits for the eye lens, which would not be indicated by a chest dosimeter solely.

Our dosimeters were calibrated using Photon Dose Equivalent (Hx) as described in “C. Dosimetry of professionals” section. According to H. Stadtmann and C. Hranitzky, doses measured using Hx are a good estimative for doses measured using Hp(0.07), for diagnostic radiology energies. For comparison with Hp(10) measurements, possible differences may arise from uncertainties of Hp(10) estimations at low energies [14,15].

There were some limitations in our study. The equipment used in this study does not have a KAP meter. Therefore, correlating patients and operators’ doses was not possible. Although we present a description on the occupational radiation doses in a single institution, we differentiate the exposure by the interventionist function in each procedure, which is an important aspect to be

considered. On regards to experimental design, a difference that can be noticed in this study in comparison to others is the position of the eye lens dosimeters. We placed the eye lens dosimeters on top of the surgical mask, between the eyes of the professional. Several studies have shown differences between left and right eye doses. However, our results agree with values presented in the literature [11,13].

5. Conclusion

The dose levels measured in our study indicate that professionals, who are properly shielded, in a normal routine schedule, do not exceed the annual dose limits. However, in some specific regions and for some specific procedures, the maximum number of annual procedures is fairly close to the number of procedures that are actually performed. Our analysis showed that individual dosimeters, positioned on the chest, may underestimate the doses for other body regions, especially abdomen, extremities, and eye lens. Therefore, a strategy involving professional rotation, additional dosimeters (especially for the extremities) and additional stationary shielding for the eye lens are strongly recommended, especially for Angiography.

These results also indicate that dosimeters placed in abdomen, instead of chest, may represent more accurately the whole body doses received by the medical staff. For a more accurate professional dosimetry, we can suggest the use of two dosimeters in the abdomen, one inside the lead protections and other outside.

This protocol can be applied to any interventional radiology department and provides extremely important information to determine radiation protection strategies.

Acknowledgements

The authors would like to thank all of the physicians at Botucatu Medical Hospital for their support and dedication throughout the study. The authors would also like to thank the Centro de Instrumentação, Dosimetria e Radioproteção (especially PhD. Cassiana Vicari de Moraes) of São Paulo State University and Sapra Landauer (especially PhD. Maria de Fátima Magon) for their support throughout the study.

References

- [1] Hausler U, Czarwinski R, Brix G. Radiation exposure of medical staff from interventional X-ray procedures: a multicentre study. *Eur Radiol* 2009;19:2000–8.
- [2] Valentin J. International Commission on Radiological Protection. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Oxford, England: Published for the International Commission on Radiological Protection by Elsevier; 2007.
- [3] Bor D, Olgar T, Toklu T, Caglan A, Onal E, Padovani R. Patient doses and dosimetric evaluations in interventional cardiology. *Phys Medica* 2009;25:31–42.
- [4] Ubeda C, Vano E, Gonzalez L, Miranda P, Valenzuela E, Leyton F, et al. Scatter and staff dose levels in paediatric interventional cardiology: a multicentre study. *Radiat Prot Dosimetry* 2010;140:67–74.
- [5] Miller DL, Balter S, Schueler BA, Wagner LK, Strauss KJ, Vano E. Clinical radiation management for fluoroscopically guided interventional procedures. *Radiology* 2010;257:321–32.
- [6] Kim KP, Miller DL, Berrington de Gonzalez A, Balter S, Kleinerman RA, Ostroumova E, et al. Occupational radiation doses to operators performing fluoroscopically-guided procedures. *Health Phys* 2012;103:80–99.
- [7] Comissão Nacional de Energia Nuclear. Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica. Norma NN-3.01. Rio de Janeiro; 2011.
- [8] Christodoulou EG, Goodsitt MM, Larson SC, Darner KL, Satti J, Chan HP. Evaluation of the transmitted exposure through lead equivalent aprons used in a radiology department, including the contribution from backscatter. *Med Phys* 2003;30:1033–8.
- [9] Miller D, Vañó E, Bartal G, Balter S, Dixon R, Padovani R, et al. Occupational radiation protection in interventional radiology: a joint guideline of the cardiovascular and interventional radiology society of Europe and the society of interventional radiology. *Cardiovasc Intervent Radiol* 2010;33:230–9.

- [10] Thornton RH, Dauer LT, Altamirano JP, Alvarado KJ, St Germain J, Solomon SB. Comparing strategies for operator eye protection in the interventional radiology suite. *J Vasc Interv Radiol* 2010;21:1703–7.
- [11] Vano E, Gonzalez L, Fernandez JM, Haskal ZJ. Eye lens exposure to radiation in interventional suites: caution is warranted. *Radiology* 2008;248:945–53.
- [12] Efstathopoulos EP, Pantos I, Andreou M, Gkatzis A, Carinou E, Koukorava C, et al. Occupational radiation doses to the extremities and the eyes in interventional radiology and cardiology procedures. *Brit J Radiol* 2011;84:70–7.
- [13] Vano E, Gonzalez L, Guibelalde E, Fernandez JM, Ten JL. Radiation exposure to medical staff in interventional and cardiac radiology. *Brit J Radiol* 1998;71:954–60.
- [14] Stadtmann H, Hranitzky C. Uncertainty assessment and comparison of different dose algorithms used to evaluate a two element LiF:Mg, Ti TL personal dosimeter. Austrian Research Centers GmbH; 2008.
- [15] Stadtmann H, Hranitzky C. Comparison of different dose algorithms used to evaluate a two element LiF:Mg, Ti TL personal dosimeter. *Radiat Meas* 2008;43:571–5.

Apêndice B

Em anexo o artigo “Efficiency of personal dosimetry methods in vascular interventional radiology” já finalizado referente ao Capítulo 2 deste trabalho de mestrado que será submetido à revista *Physica Medica: European Journal of Medical Physics*.

Efficiency of personal dosimetry methods in vascular interventionist radiology

Institutional Review Board (IRB)

This study was developed with the approval from the ethics committee of *Faculdade de Medicina de Botucatu (FMB-UNESP)* under protocol no. CAAE 16932513.5.0000.5411.

Acknowledgments

We sincerely thank the Brazilian funding agencies CAPES, FAPESP, and CNPq for their financial support.

Abstract

Objective: The aim of this study was to determine the best method for measuring the effective dose (*E*) received by the health professional during vascular interventionist procedures.

Methodology: Was evaluated the efficiency of 6 methods currently used to estimate professionals' *E*, based on national and international recommendations for interventionist radiology. Equivalent doses incident on head, neck, chest, abdomen, feet and hands of 7 professionals were monitored during 50 vascular interventionist radiology procedures, performed at the University Hospital, Botucatu Medical School, São Paulo State University, Brazil. Professionals' *E* of each procedure were estimated according to 6 methods commonly employed internationally. To determine the best method, it was performed a more efficient *E* measurement to be used as reference value (reference *E*) as means for comparison. We applied correlation factors (*CFs*) between external doses (monitored on professionals) and internal doses of 29 organs or tissues listed by the International Commission on Radiological Protection (ICRP) for *E* calculation. The *CFs* were obtained through patient simulator and anthropomorphic phantom dosimetry in artificial circumstances. The *CFs* were applied to the professionals' external doses monitored and the reference *Es* were obtained according with ICRP for each procedure. The reference dose was compared with all of the *Es* obtained using the 6 methods.

Results: The highest *E* were found for hands (0.34 ± 0.93 mSv). The median reference *E* calculated was 2.2 μ Sv. The two estimates described by Brazilian regulations overestimated *E* in approximately 100% and 200%, respectively. The more efficient method was the one recommended by National Council on Radiological Protection and

Measurements (NCRP) in the United States. Its mean and median differences, when compared to reference E , were close to 0% and its standard deviation was the lowest found.

Conclusion: Our study showed that the most precise method was the recommended by NCRP, which uses two dosimeters, namely one below radiological protection aprons, at abdomen height and one above radiological protection, on the neck. This result indicates that the use of methods that employ two dosimeters, one under and one above protective aprons, at least, are more efficient, providing better information regarding E estimates and information about shielded and unshielded regions.

Key words: Effective dose, personal dosimetry, interventionist radiology, anthropomorphic phantom.

1. Introduction

Physicians performing interventional X-ray procedures are exposed to the highest radiation doses when compared to all other health professionals [1]. Several studies have shown that, during interventional procedures, those physicians are exposed to non-uniform radiation levels throughout their bodies [2-4].

The effective dose (E) is the physical quantity used to measure the detriment caused by radiation in the human body, thus providing important information for radiological protection purposes. This quantity E is dependent on the equivalent doses measured in different organs and tissues of the body, which are, usually, the most sensitive to stochastic effects induction [5]. During each procedure, professionals use a personal dosimeter on the chest or at abdomen to estimate the value of E received [5].

There are different methods to estimate E during interventional procedures [6]. In Europe, a single personal dosimeter positioned on the anterior chest, below radiological protection aprons was previously considered a good estimate of E [5, 6]. However, this approach does not provide any information regarding unshielded regions of the professionals' body [5, 6].

In the United States, the National Council on Radiological Protection and Measurements (NCRP) recommends the use of two personal dosimeters, namely one above and other below radiological protection aprons [7]. The dosimeter above the aprons may be positioned on the neck [7], while the other, below radiological protections, may be placed on the chest or abdomen [7].

In Brazil, the Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), recommends the use of a single dosimeter above the protection aprons. This dosimeter should be positioned in the torso region that is most exposed to radiation [8].

During the interventionist procedures, professionals are exposed to non-uniform radiation fields, which reflects in different absorbed doses throughout tissues and organs. Thus, a precise estimate of E is a major concern for radiation protection purposes [4, 5]. However, to the best of our knowledge, there are no studies that assess properly the efficiency of a considerable number of methods to estimate professionals' E , since they can either underestimate or overestimate its correct value [2, 4].

Thus, the aim of this study was to determine the best method for measuring the effective dose (E) received by the health professional during vascular interventionist procedures. Therefore, the efficiency of 6 methods employed internationally to estimate the effective dose received by health professionals in interventional radiology procedures was evaluated.

2. Methods

This study was performed in three main steps, as describe in figure 1. The first step consisted of a complete dosimetry assessment on 7 physicians during 50 vascular interventional radiology procedures. Equivalent doses incident on head, neck, chest, abdomen, feet and hands were monitored and described in section 2.1.

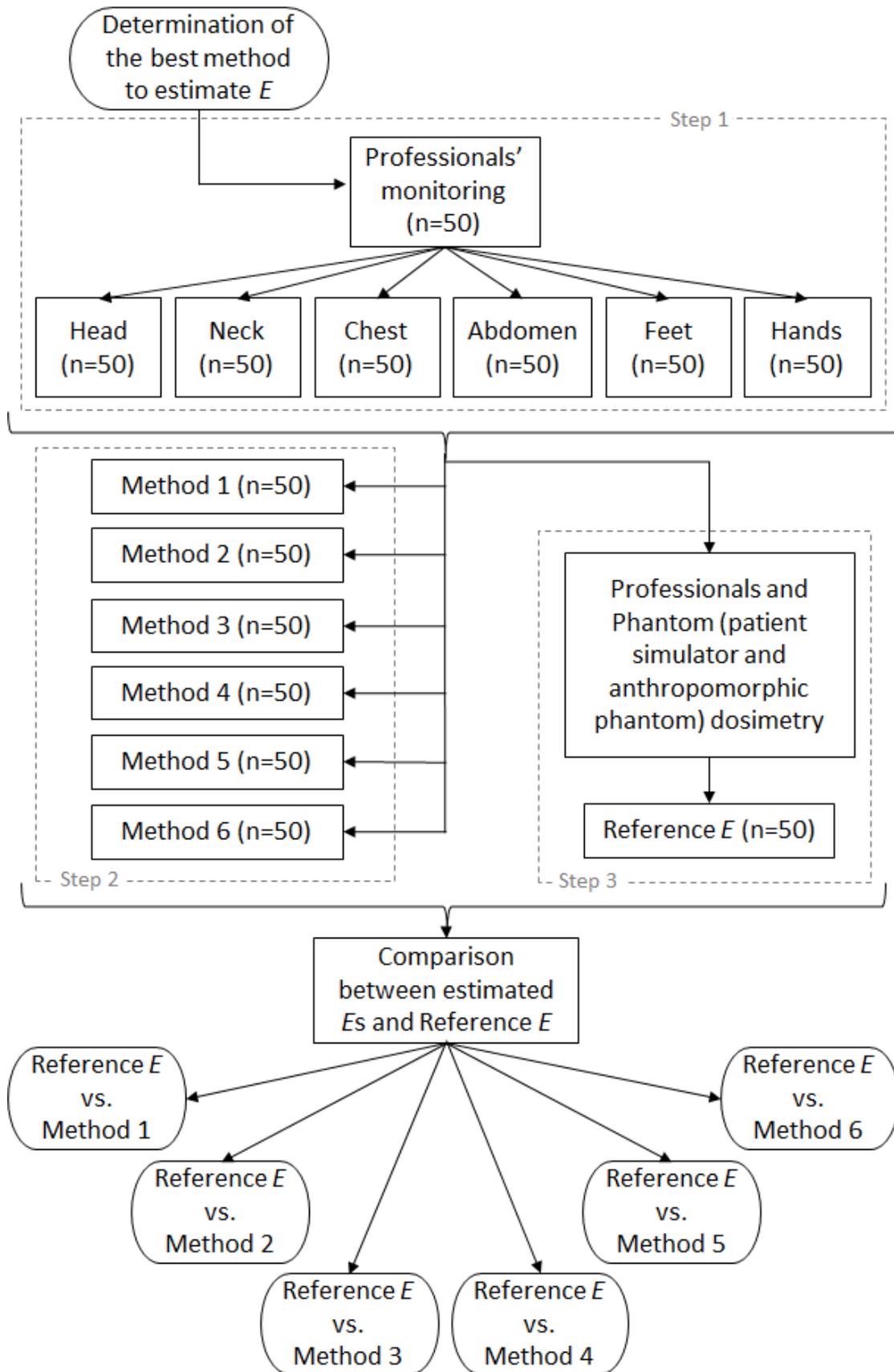


Figure 1. Flowchart with 3 steps performed and described in the methods section.

After monitoring radiation doses as described in step 1, the second step consisted of estimating the E values according to 6 different methodologies, as described in section 2.2.

To assess the efficiency of all 6 methods, a more accurate reference method was employed. In this Reference Method, Correlation Factors (CFs) were calculated between external and internal doses using an anthropomorphic phantom. 24 internal organs and tissues were assessed, according with the International Commission on Radiological Protection (ICRP) for effective dose measurements [5]. After applying the CFs on the external doses monitored in each professional, the E registered for each procedure was obtained, as described in section 2.3.

All six estimated values of E obtained in the second step were compared with the reference E of the third step, which allowed us to assess the efficiency of each procedure in comparison with reference values.

These steps were applied in 50 procedures performed in the Botucatu Medical School, São Paulo State University, Brazil. Procedures were performed using a LCV Plus equipment (Advantx General Electric Medical Systems, Milwaukee, Wis, USA). The equipment was in accordance with all standard quality control tests. Lead blades were placed underneath the patient's table for stationary shielding. Ceiling-suspended transparent shielding and patient dosimeter was not used.

2.1. Dosimetry Measurements on Professionals During Clinical Practice

The physicians who conducted vascular interventional procedures were monitored for dosimetry assessment. Incident doses in different body regions of the professional were monitored with dosimeters during each procedure . Altogether, seven professionals

who worked in the 50 evaluated procedures were monitored. In all procedures, the physician remained approximately 0.5 meter from the imaged patient.

Thermoluminescents dosimeters (TLDs) (TLD-100; LiF: Mg, Ti Harshaw) were used for dose measurements. Dosimeters were positioned on head (top of surgical mask), neck, chest, abdomen, feet and hands (wrists) of professionals, above radiological protection aprons. All monitored professionals used radiological protection aprons, such as lead aprons, thyroid shields and leaded glasses. In each evaluated region, three dosimeters were used for a more accurate dose measurement [4].

For each procedure, a control group of 3 TLDs was maintained out of controlled areas to monitor background radiation. Background measurements were subtracted from professionals' dosimetry.

Dosimeters were calibrated using a known dose level (1 mGy). The mean ratio between reading (nanoCoulombs) and absorbed dose (miliGrays) of each dosimeter were used as an individual calibration factor. During calibration, standard deviation for all TLD was below 7%.

The procedure modalities monitored were lower limb and abdominal angiographies (20), lower limb and abdominal percutaneous transluminal angioplasty (15) and abdominal aortic aneurysm treatment with stent grafts placement (15). These procedures were performed between 75 and 85 kVp, automatic mA control, 1.9 to 3.8 frames/s, "medium" noise level, and 32 cm field of view.

2.2. Other methodologies to estimate the professionals' effective dose

After the dosimetry step, the value of E was estimated according to six different methodologies. These estimates were performed for each professional monitored and compared to the reference E using clinical and anthropomorphic phantom dosimetry.

In Brazil, regulation requires E to be measured with a dosimeter positioned at the most exposed torso region, outside protective aprons. Dosimeter readings were corrected by a factor of 0.1, according to this normative [8].

Usually the dosimeter is used on the chest, without previous assessment of the most exposed region. The two first methods adopted to estimate effective dose and compare to reference E were based on Brazilian legislation:

- Chest dose outside protective aprons, corrected by the 0.1 factor (Method 1);
- Abdominal dose outside protective aprons, corrected by the 0.1 factor (Method 2).

In The United States, the NCRP recommends combining reading values from neck dosimeter, outside the protective aprons (indicating unshielded head doses), and the reading from abdomen (waist height) or chest, measured underneath protective aprons, using equation 1 [6, 7]:

$$E_{\text{NCRP}}(\text{estimate}) = 0.5 H_{\text{IN}} + 0.025 H_{\text{OUT}} \quad (1)$$

The formula above was used to estimate E s for each procedure monitored, with two other methods based on North America legislation:

- Neck unshielded dose for H_{OUT} and chest shielded dose for H_{IN} (Method 3);
- Neck unshielded dose for H_{OUT} and abdomen shielded dose for H_{IN} (Method 4).

For shielded regions, the dose incident below radiological protections was obtained using the outside protective aprons dose multiplied by a factor of 0.05, as presented by literature [9]. This transmission value was confirmed by experimental measurements.

In Europe, the use of one dosimeter on the anterior chest, inside protective apron, was previously assumed as a good estimate for the operator's E according to Miller and co-authors [6].

Although a single dosimeter under protective aprons does not provide any information about unshielded regions, estimates of E_s were performed using two other methods:

- Chest dose corrected by attenuation factor of 0.05 (Method 5);
- Abdomen dose corrected by attenuation factor of 0.05 (Method 6).

The efficiency of these 6 methods were assessed comparing each procedure with the reference E described in section 2.3.

2.3. Reference effective doses and correlation factors between external and internal doses

A patient equivalent phantom consisting of a 30 x 30 x 30 cm³ acrylic cube was used to simulate the radiation scattered in patients during interventional procedures [10]. The Alderson RANDO anthropomorphic phantom (model ART-200, RDS Phantoms, California, USA) was placed at approximately 0.5 m from patient equivalent phantom. This setup simulates the scattered radiation received by the physician's body. The Alderson RANDO represents a man with 175 cm height and 73.5 kg. Radiological protections apparatus was maintained similar to clinical conditions, with the exception of plumber glasses (i.e. lead apron and thyroid shield were positioned on the anthropomorphic phantom).

TLD sets with 3 dosimeters were positioned inside the anthropomorphic phantom in positions corresponding to the main organs and tissues, according with the International Commission on Radiological Protection (ICRP) [5] for the E measurement, as listed in Table 1. Columns shows both external and internal dosimeters position and their corresponding numbers. Bone marrow was monitored in several positions that represents the regions of major tissue concentration in an adult body [11].

Skin doses were estimated using the average doses on the surface of head, neck, chest, abdomen, hands and feet, underneath protection aprons. When one structure listed by ICRP was monitored in different regions of the anthropomorphic phantom, the average dose was used for E measurement. Bilateral organs were monitored in both sides. Bone surface was not monitored since it accounts to only 1% of E .

TLD were also positioned on the surface of the anthropomorphic phantom in the same regions as the physician's chest, abdomen, neck and head, above protections. Dosimeters for background measurement were also used and their readings were subtracted from all measured doses.

The CF s were determined dividing the external by the internal doses of each region monitored (*i.e.* dose incident in each organ within the chest divided by dose incident on chest, dose incident in each organ within the abdomen divided by dose incident on abdomen). Some internal structures listed by ICRP were present in more than one region, e.g. bone marrow; therefore, these structures present one CF for each region.

All procedures above were repeated for 75 and 85 kVp, three times for each kVp. All other parameters were maintained: automatic mA control, 1.9 to 3.8 frames/s, "medium" noise level, and 32 cm field of view.

After applying the *CFs*, the absorbed doses of 24 internal organ were determined for each procedure monitored. The *Es* were calculated for each procedure as the sum of the internal organ or tissues absorbed doses, multiplied by individual tissue weighting factors, according to ICRP [5].

Table 1. Position and number of TLDs in anthropomorphic phantom.

External dosimeters	Number of dosimeters	Internal organ or tissue monitored	Number of dosimeters
Head	3	Oral Mucosa	3
		Brain	3
		Salivary Glands (right and left side)	6
Neck	3	Thyroid	3
Chest	3	Oesophagus (upthoracic level)	3
		Oesophagus (midthoracic level)	3
		Breast (right and left)	6
		Lung (upthoracic level, right and left side)	6
		Lung (midthoracic level, right and left side)	6
		Lung (downthoracic level, right and left side)	6
		Heart	3
		Bone-marrow (thoracic spine)	3
		Bone-marrow (ribs, right and left side)	6
		Bone-marrow (sternum)	3
		Thymus	3
		Extrathoracic Region	3
		Abdomen	3
Spleen	3		
Liver	3		
Pancreas	3		
Small intestine	3		
Kidneys/Adrenals (right and left side)	6		
Gall bladder	3		
Bone-marrow (right and left iliac crest)	6		
Gonads (right and left ovary)	6		
Bladder	3		
Uterus	3		
Prostate	3		
Gonads (testicle)	3		
Bone-marrow (right and left femoral head)	6		
Colon	3		

2.4. Statistical Analysis

The statistical analysis was performed using MINITAB 14 software (Minitab, USA). Mean values of *CFs* obtained for each structure for 75 and 85 kVp were compared using the Wilcoxon test and linear regression plot. The estimates obtained from Methods 1 to 6 were compared with reference *E* through Bland Altman for means of difference [12]. The difference (%) refers to the *E* obtained from the tested methods minus the reference *E*, divided by reference *E*. Differences were calculated for each procedure.

3. Results

Doses incident on head, neck, chest, abdomen, feet and hands of seven health professionals who conducted 50 vascular interventionist radiology procedures were monitored. Mean and standard deviation (*SD*) of the fluoroscopy time was 13.2 ± 10.3 min. Partial body doses of professionals' dosimetry are summarized in Table 2.

Table 2. Partial body equivalent doses for professionals' dosimetry. Mean, *SD*, median and interquartile range (*IR*) of equivalent doses in all monitored regions.

	Mean \pm SD (μ Sv)	Median (<i>IR</i>) (μ Sv)
Head	70.7 \pm 101.7	39.4 (10.3 - 79.9)
Neck	71.7 \pm 93.9	44.3 (11.5 - 87.4)
Chest	82.9 \pm 114.6	42.0 (13.5 - 95.8)
Abdomen	151.3 \pm 248.8	58.3 (14.7 - 176.2)
Feet	219.1 \pm 438.4	67.9 (16.8 - 166.0)
Hands	340.0 \pm 936.0	59.7 (19.7 - 175.8)

The highest equivalent doses were found for hands ($340.0 \pm 936.0 \mu$ Sv), reaching the maximum of 5,700 μ Sv. Head received the lowest doses ($70.7 \pm 101.7 \mu$ Sv).

The average *CFs* for each energy (75 and 85 kVp) and their standard deviation are summarized in Table 3. These factors were compared by Wilcoxon test and no statistical difference was found ($p=0.07$).

Table 3. Average *CFs* for 75 kVp and 85 kVp, Mean and *SD* of *CFs* for each tissue or organ used for calculating the reference *E*.

External dosimeters	Internal organs or tissues	75 kVp <i>CFs</i>	85 kVp <i>CFs</i>	<i>CF</i> Average \pm <i>SD</i>
Head	Oral Mucosa	0.24	0.28	0.26 \pm 0.029
	Brain	0.17	0.14	0.15 \pm 0.022
	Salivary Glands	0.23	0.26	0.25 \pm 0.022
Neck*	Thyroid	0.032	0.028	0.030 \pm 0.0032
Chest*	Oesophagus	0.013	0.015	0.014 \pm 0.0017
	Breast	0.049	0.050	0.049 \pm 0.00054
	Lung	0.021	0.020	0.020 \pm 0.00070
	Heart	0.021	0.020	0.021 \pm 0.0010
	Bone-marrow (thoracic spine)	0.014	0.013	0.013 \pm 0.0011
	Bone-marrow (ribs)	0.034	0.031	0.032 \pm 0.0021
	Bone-marrow (sternum)	0.035	0.035	0.035 \pm 0.000012
	Thymus	0.033	0.032	0.032 \pm 0.00046
	Extrathoracic Region	0.050	0.049	0.049 \pm 0.00044
Abdomen*	Stomach	0.035	0.036	0.036 \pm 0.00052
	Spleen	0.017	0.017	0.017 \pm 0.00021
	Liver	0.020	0.022	0.021 \pm 0.0011
	Pancreas	0.012	0.012	0.012 \pm 0.00021
	Small intestine	0.033	0.036	0.035 \pm 0.0018
	Kidneys/Adrenals	0.011	0.012	0.011 \pm 0.0010
	Gall bladder	0.023	0.027	0.025 \pm 0.0028
	Gonads (ovary)	0.020	0.025	0.023 \pm 0.0033
	Bladder	0.015	0.018	0.016 \pm 0.0019
	Uterus	0.014	0.016	0.015 \pm 0.0019
	Prostate	0.010	0.010	0.010 \pm 0.000015
	Gonads (testicle)	0.046	0.049	0.048 \pm 0.0021

*External dosimeters positioned above radiological protection aprons.

Figure 2 shows linear regression values of *CFs* for 75 and 85 kVp. The linear regression obtained between them was $y = 1.1 x - 0.0022$ with $R^2 = 0.98$.

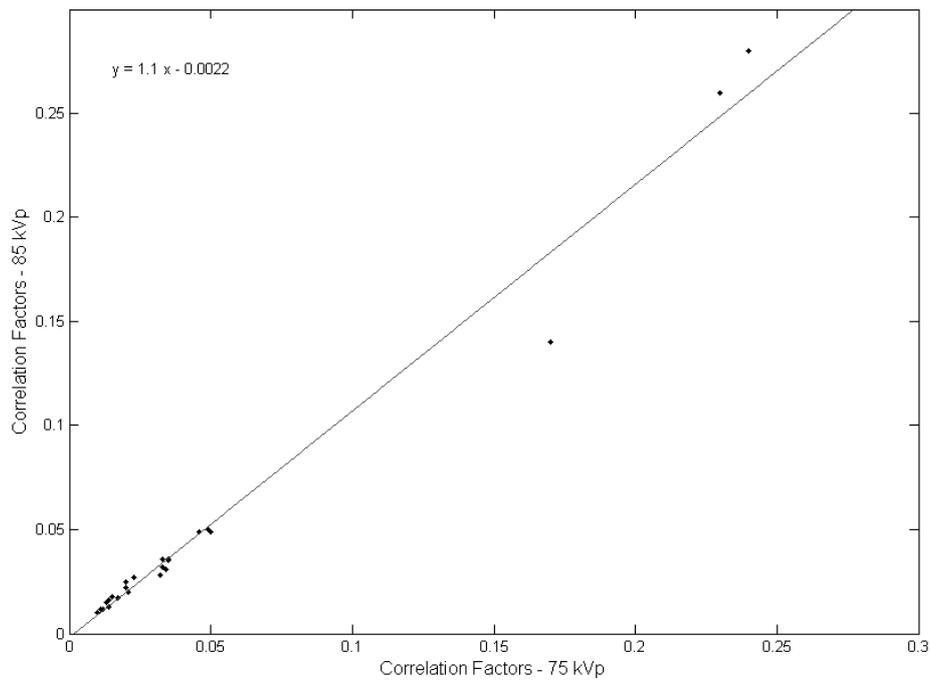


Figure 2. Linear regression of *CFs* measured for 75 and 85 kVp.

In the linear regression between 75 kVp and 85 kVp *CFs*, the angular coefficient was close to 1 and the linear coefficient to 0. The R^2 was near to 1 and the relatively low standard deviation corroborates the result from the Wilcoxon test: no statistical difference was found between these groups. Therefore, the average *CFs* between the two energies was used to calculate reference *E* values.

Figure 3 shows box plots of reference *E* (Effective Dose) calculated with the *CFs* and the 6 methods used to estimate effective doses.

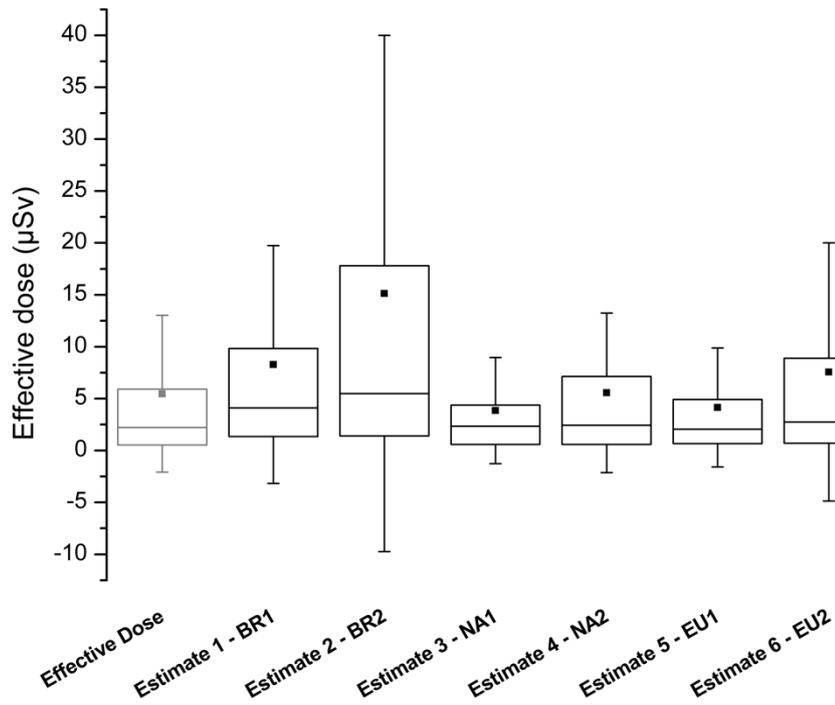


Figure 3. Reference E_s calculated using the CFs and the 6 methods employed to estimate effective doses. Each box represents the following statistical values: lower and upper boundaries indicates the 25th and 75th percentiles; solid horizontal line marks the median; and the square represents the mean value. Whiskers above and below the box represent standard deviation.

Bland Altman plots for the difference and average between reference E and each estimate are shown in figures 4, 5 and 6.

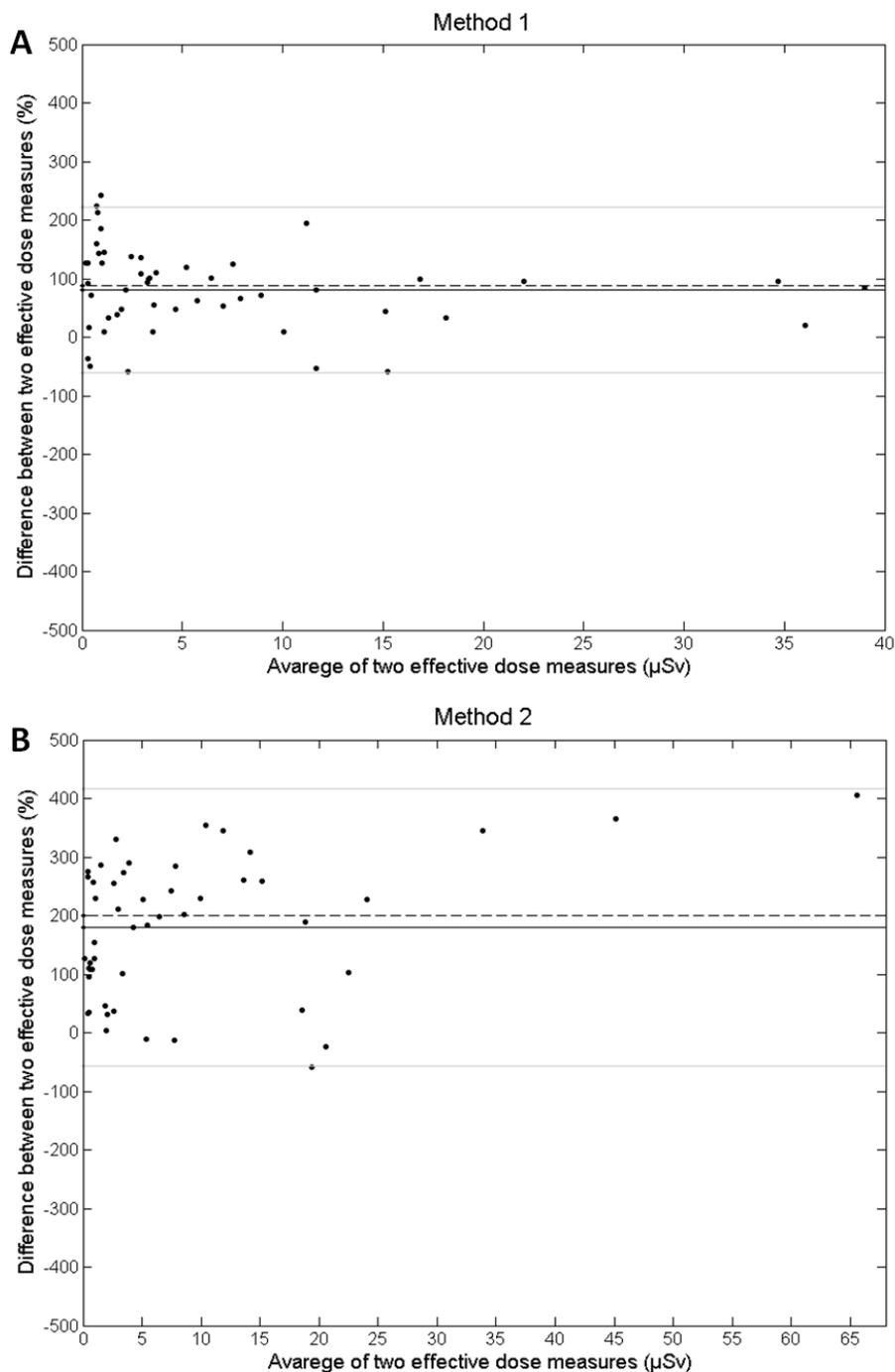


Figure 4. Bland Altman plot for difference and average between reference E and estimates of Methods 1 (A) and 2 (B). The difference refers to the E obtained with the tested methodology minus the reference E divided by reference E . These differences were calculated for each monitored procedure. The black continuous central lines correspond to the mean deviation values. The gray continuous lines indicate the interval of 2 standard deviations. The black dashed central lines correspond to the median value of differences.

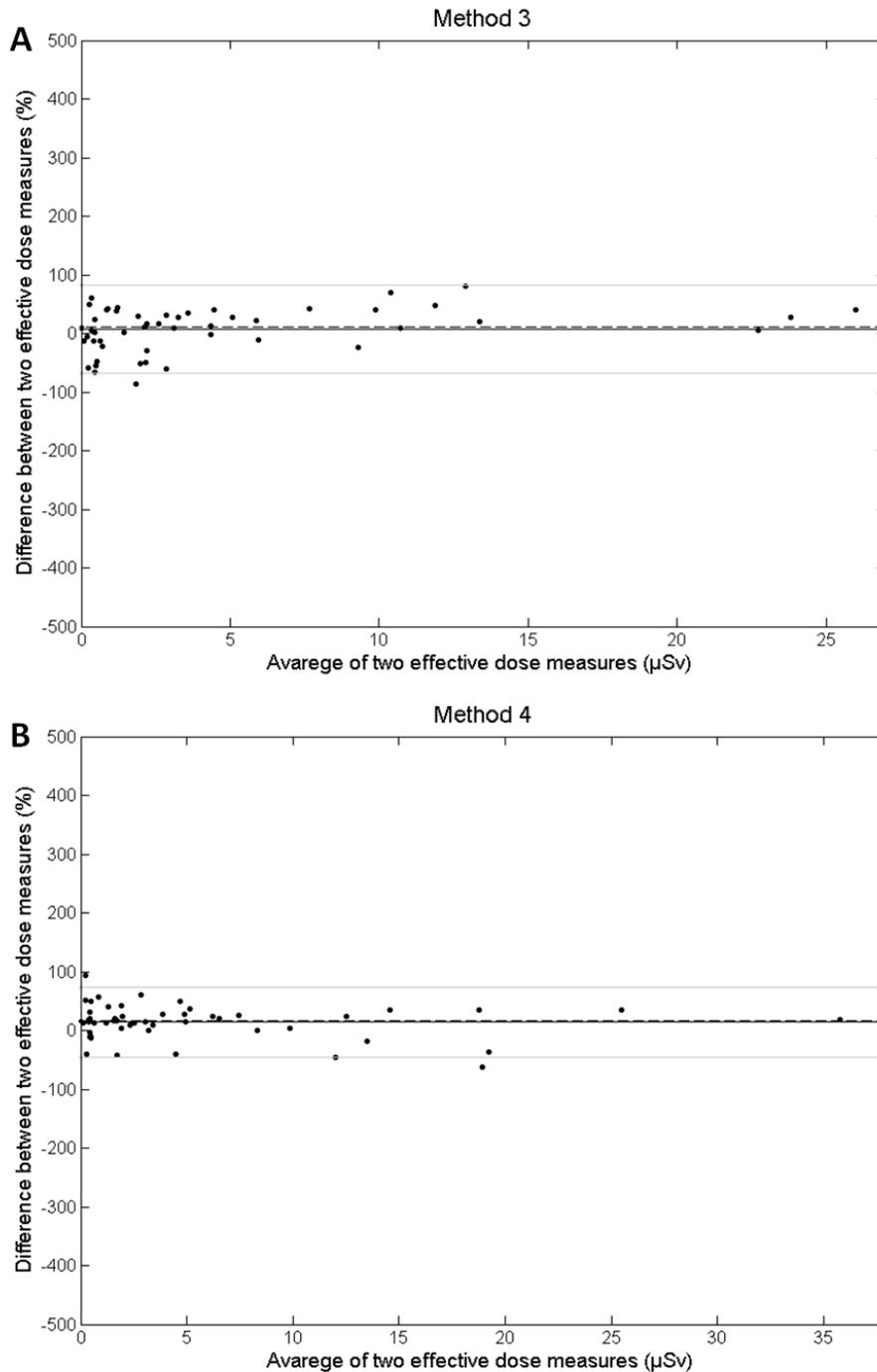


Figure 5. Bland Altman plot for difference and average between reference E measured and estimates of Methods 3 (A) and 4 (B). The difference refers to the E obtained with the tested methodology minus the reference E divided by reference E . These differences were calculated for each monitored procedure. The black continuous central lines correspond to the mean value of deviations. The gray continuous lines indicate the interval of 2 standard deviations. The black dashed central lines corresponds to the median value of differences.

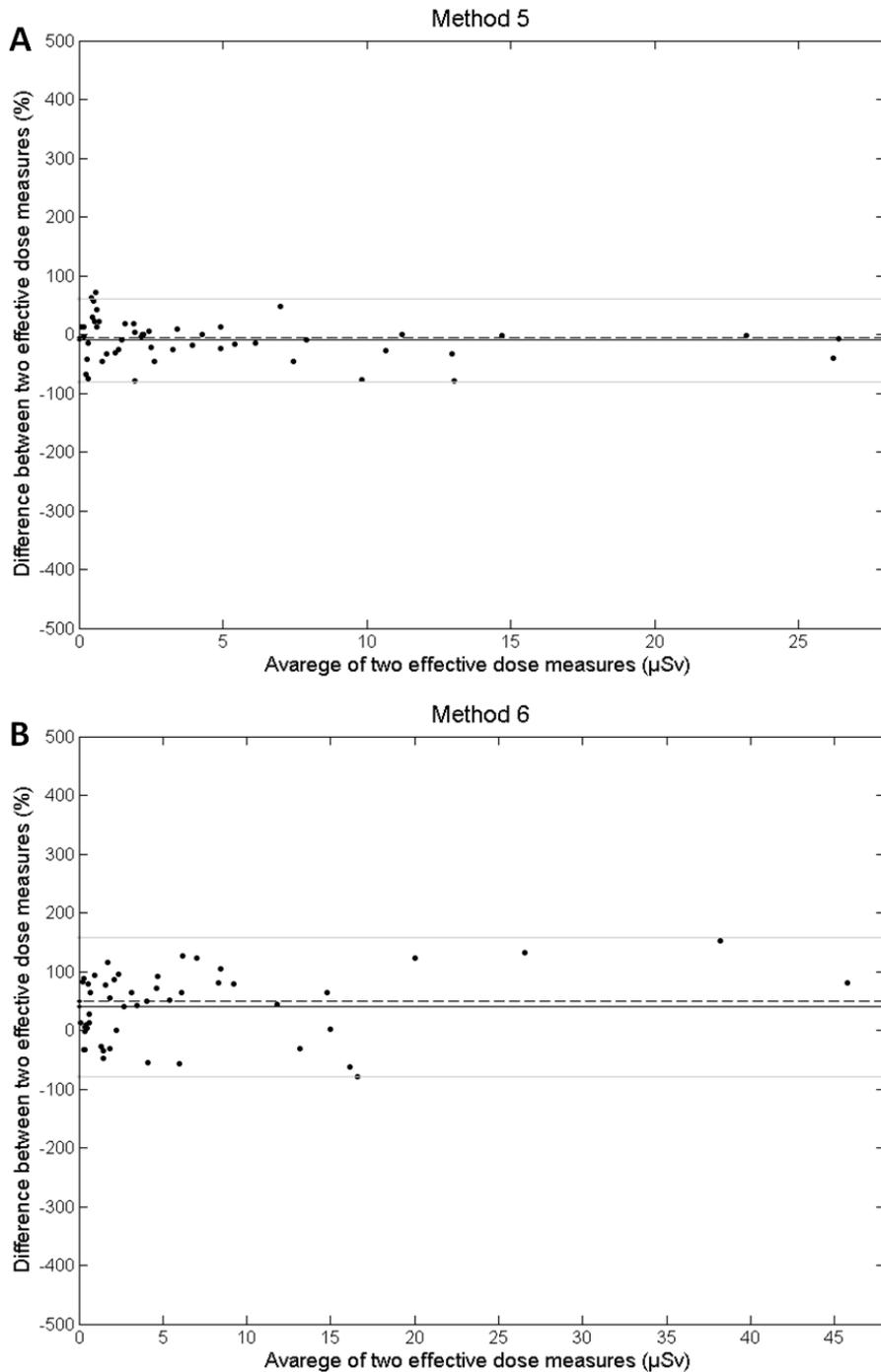


Figure 6. Bland Altman plot for difference and average between reference E measured and estimates of Methods 5 (A) and 6 (B). The difference refers to the E obtained with the tested methodology minus the reference E divided by reference E . These differences were calculated for each monitored procedure. The black continuous central lines corresponds to the mean value of deviations. The gray continuous lines indicate the interval of 2 standard deviations. The black dashed central lines correspond to the median value of differences.

Bland Altman plots were used to compare the reference E and the 6 methods to estimate E received by the physicians. Methods 1 and 2, were the most conservative methodologies among those evaluated, overestimating E in approximately 100% and 200% on average, respectively. According to our methodology, the most precise methods were 3, 4 and 5. These methods did not overestimate nor underestimate, on average, the professionals E more than few percent.

4. Discussion

This study assessed the partial body doses and E received by health professionals, using clinical routine dosimetry, which revealed its higher value for the hands. Associating clinical dosimetry with phantom measurements, the reference E received by the professionals was calculated in each procedure. This last step allowed the comparison between reference E with estimated E , which were calculated using 6 different methods applied in different countries.

This comparison showed that methods 1 and 2 overestimated E in approximately 100% and 200% on average, respectively. Their standard deviation were extremely high, reaching more than 200% in the second method. However, these methodologies did not underestimate E values more than the others did. From a safety point of view, the overestimation of these methods can provide a safety margin for occupational exposures.

Methods 3, 4 and 5 presented mean and median differences close to 0% and low standard deviations. Among them, for radiological protection purposes, method 5 is the least suitable for routine application since it does not use external dosimeters. Therefore, information about unshielded regions are not accounted for. Method 6 overestimated the mean and median values of E with differences up to 50%.

Method 4, recommended by NCRP, was the most precise. Its mean and median differences, in relation to reference E , were close to 0% and its standard deviation was the lowest. For radiological protection purposes, it is the most adequate for monitoring interventional professionals, since it considers doses below and above radiological protection aprons.

Most results were in accordance with previous reports. Mean values of 70 μSv for unshielded head and 40 μSv were found for hands (wrist), which are consistent with those found by Efstathopoulos and co-authors (2011) [13]. Mean doses found for unshielded chest around 80 μSv per procedure, which is nearly half of the values presented by Sailer and co-authors (2014) [14]. However, Sailer and co-authors (2014) assessed approximately half of mean fluoroscopy time when compared with the procedures evaluated here [14]. For unshielded neck, the mean value of 71 μSv obtained here is in accordance with Delichas and co-authors (2003) [15].

Median doses of 42 μSv were measured above lead aprons in chest, while Hausler and co-authors (2009) found 16 μSv [2]. This difference can be attributed to the use of ceiling suspended acrylic shield in the procedures monitored by Hausler.

In this study, health professionals' reference E were calculated using clinical measurements and the phantom CF s for each procedure. The median reference E found was 2.2 which are in accordance with results by Hausler [2].

The organs and tissues that contribute most to the E parameter are located on the head, chest and abdomen. Generally, personal dosimeters are used at the chest height [4, 6]. The median dose obtained for chest and abdomen, above protective aprons, were 0.04 mSv and 0.06 mSv, respectively. This difference indicates that the dosimeter position

contributes significantly to the effective dose measurement. Thus, dosimeter positioning should be a major concern in an interventionist department.

Mean *CFs* found for 75 kVp of each organ were compared with those found for 85 kVp and no statistical difference was observed. This can also be seen in the linear regression presented in Figure 2 and its correspondent R^2 value. The linear regressions and R^2 value showed a strong association and low dispersion between *CFs* for 75 and 85 kVp. Therefore, the average *CF* between the two energies were used for *E* calculations.

Although this study consisted of a substantial evaluation on the three more common procedures performed by the hospital service, a greater number of modalities should be monitored for a more complete assessment. The influence of available stationary protections (and different configurations thereof) in the effective dose should also be addressed.

5. Conclusions

This study presents the efficiency evaluation of 6 different methodologies to assess effective doses in health professionals during interventionist procedures. The most conservative method for *E* estimation was the recommended by the Brazilian legislation, with a dosimeter positioned on the professionals' abdomen (Method 2). This method overestimated *E* in 200% on average. However, it did not underestimate *E* more than the others modalities. Therefore, this method does not undermines the professionals' safety. The most accurate methodology was the method used in the US, recommended by NCRP (Method 4). This method did not overestimate the physician's *E* more than few percent and its standard deviation from the reference *E* were the lowest. Therefore, this methodology, which employs at least two dosimeters, one under and one above protective aprons, is recommended. It provides a more precise assessment on the effective dose with

information about both shielded and unshielded regions. Additionally, in some situations, where hands' dose can be high, additional dosimeters for these region are also recommended.

6. References

1. Smilowitz, N.R., S. Balter, and G. Weisz, *Occupational hazards of interventional cardiology*. *Cardiovasc Revasc Med*, 2013. **14**(4): p. 223-8.
2. Hausler, U., R. Czarwinski, and G. Brix, *Radiation exposure of medical staff from interventional x-ray procedures: a multicentre study*. *Eur Radiol*, 2009. **19**(8): p. 2000-8.
3. Miller, D.L., et al., *Clinical radiation management for fluoroscopically guided interventional procedures*. *Radiology*, 2010. **257**(2): p. 321-32.
4. Bacchim Neto, F.A., et al., *Occupational radiation exposure in vascular interventional radiology: A complete evaluation of different body regions*. *Phys Med*, 2016. **32**(8): p. 1019-24.
5. ICRP, *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. *ICRP publication 103*. *Ann ICRP*, 2007. **37**(2-4): p. 1-332.
6. Miller, D.L., et al., *Occupational radiation protection in interventional radiology: a joint guideline of the Cardiovascular and Interventional Radiology Society of Europe and the Society of Interventional Radiology*. *Cardiovasc Intervent Radiol*, 2010. **33**(2): p. 230-9.
7. National Council on Radiation Protection and Measurements., *Use of personal monitors to estimate effective dose equivalent and effective dose to workers for external exposure to low-LET radiation : recommendations of the National Council on Radiation Protection and Measurements*. NCRP report. 1995, Bethesda, MD: The Council. vi, 64 p.
8. ANVISA, *Portaria Nº 453. Aprova o regulamento técnico que estabelece as diretrizes básicas de proteção radiológica em radiodiagnóstico médico e odontológico*. 1998, Diário Oficial da União: Agencia Nacional de Vigilância Sanitária.
9. Christodoulou, E.G., et al., *Evaluation of the transmitted exposure through lead equivalent aprons used in a radiology department, including the contribution from backscatter*. *Medical Physics*, 2003. **30**(6): p. 1033-1038.
10. AAPM, *Standardized methods for measuring diagnostic x-ray exposures*. 1982.
11. Cristy, M., *Active bone marrow distribution as a function of age in humans*. *Phys Med Biol*, 1981. **26**(3): p. 389-400.
12. Bland, J.M. and D.G. Altman, *Measuring agreement in method comparison studies*. *Stat Methods Med Res*, 1999. **8**(2): p. 135-60.
13. Efstathopoulos, E.P., et al., *Occupational radiation doses to the extremities and the eyes in interventional radiology and cardiology procedures*. *British Journal of Radiology*, 2011. **84**(997): p. 70-77.
14. Sailer, A.M., et al., *Occupational Radiation Exposure During Endovascular Aortic Repair*. *Cardiovasc Intervent Radiol*, 2015. **38**(4): p. 827-32.
15. Delichas, M., et al., *Radiation exposure to cardiologists performing interventional cardiology procedures*. *Eur J Radiol*, 2003. **48**(3): p. 268-73.